

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
ENGENHARIA AEROESPACIAL

CAROLINA RUIZ PEÑA

POTENCIAL DE CONCENTRAÇÃO DE EMISSÃO DE POLUENTES DAS
OPERAÇÕES LTO EM SOLO: ESTUDO DE CASO DO AEROPORTO DE
GUARULHOS

Joinville
2023

CAROLINA RUIZ PEÑA

POTENCIAL DE CONCENTRAÇÃO DE EMISSÃO DE POLUENTES DAS
OPERAÇÕES LTO EM SOLO: ESTUDO DE CASO DO AEROPORTO DE
GUARULHOS

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dra. Renata Cavion

Coorientador(a): Dr. Helry Dias

Joinville

2023

CAROLINA RUIZ PEÑA

POTENCIAL DE CONCENTRAÇÃO DE EMISSÃO DE POLUENTES DAS
OPERAÇÕES LTO EM SOLO: ESTUDO DE CASO DO AEROPORTO DE
GUARULHOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Aeroespacial, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 07 de Dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Nome do Orientador/Presidente
Orientador/Presidente
Dra. Renata Cavion

Simone Becker Lopes
Membro(a)
UFSC

Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto/
Membro(a)
UFSC

Dedico este trabalho à minha mãe, que me motivou a estudar a carreira de engenharia e que me apoia e incentiva na realização deste e de outros projetos na minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e ao meu irmão pelo apoio incondicional, ao meu marido pela paciência e aos amigos que estiveram ao meu lado, oferecendo ajuda ao longo deste percurso.

À minha professora e orientadora, que foi fundamental para a realização deste trabalho, agradeço pelo empenho e dedicação.

“ Você não pode ensinar nada a ninguém, mas pode ajudar as pessoas a descobrirem por si mesmas. ”

Galileu Galilei

RESUMO

Aumento exponencial no setor de transporte aéreo resulta em um incremento nas emissões das aeronaves, acarretando impactos negativos na saúde das pessoas e no meio ambiente. As aeronaves, por sua operação, liberam poluentes como resultado da queima de combustível, áreas com elevada concentração de tráfego, como o aeroporto de Guarulhos, são pontos com potencial de concentração de poluentes e demandam medições da qualidade do ar para proteger a saúde das pessoas nas proximidades e a qualidade do meio biótico. A aplicação da metodologia baseada nos fatores de emissão do banco de dados publicado pela ICAO (AEED) demonstra ser uma ferramenta confiável para determinar as emissões provenientes das operações de decolagem e pouso, quantificá-las e quantificar os poluentes emitidos. O Sistema de Informação Geográfica (SIG) possibilita mapear as emissões computacionalmente, ajudando na interpretação dos resultados e servindo como suporte visual às informações fornecidas pelas ferramentas de medição no local, ambas ferramentas são importantes para poder determinar o impacto que o aeroporto em questão está gerando no meio. Dos poluentes liberados pelas aeronaves destacam as emissões de dióxido de carbono como o principal gás de efeito estufa emitido. Nas operações do Aeroporto de Guarulhos, as etapas que mais impactam a qualidade do ar local são decolagem, taxiamento e pouso, destacando-se a decolagem como a mais poluente por unidade de tempo, a subida como a mais poluente em quantidade total e o taxiamento como a etapa mais poluente em valores totais no solo, por ser a etapa mais longa no tempo. A pista de decolagem do Aeroporto de Guarulhos é a que tem potencial de acumular a maior quantidade de poluentes em termos de quilogramas totais, e os pontos de espera das pistas de taxiamento são locais com grande potencial de acumulação de poluentes. A aviação é uma das indústrias mais difíceis de descarbonizar, as novas tecnologias visam reduzir progressivamente as emissões de poluentes, almejando alcançar o objetivo de zero emissões até 2050.

Palavra-chave: fator de emissão; aeronave; poluentes; banco de dados.

ABSTRACT

Exponential growth in the aviation sector results in an increase in aircraft emissions, leading to negative impacts on human health and the environment. Aircraft, through their operations, release pollutants as a result of fuel combustion. Areas with high traffic concentration, such as Guarulhos Airport, serve as potential points of pollutant concentration, necessitating air quality measurements to protect the health of nearby individuals and the biotic environment. The application of methodology based on emission factors from the database published by the International Civil Aviation Organization (ICAO AEED) proves to be a reliable tool for determining emissions arising from takeoff and landing operations, quantifying them, and assessing the emitted pollutants. The Geographic Information System (GIS) enables the computational mapping of emissions, aiding in result interpretation and serving as visual support for on-site measurement tool data. Both tools are crucial for determining the impact the airport in question has on the environment. Among the pollutants released by aircraft, carbon dioxide emissions stand out as the primary greenhouse gas emitted. Within the operations at Guarulhos Airport, the stages that most significantly impact local air quality are takeoff, taxiing, and landing. Takeoff stands out as the most polluting per unit of time, ascent as the most polluting in total quantity, and taxiing as the stage with the highest total ground-level pollution due to its longer duration. The takeoff runway at Guarulhos Airport has the potential to accumulate the highest quantity of pollutants in terms of total kilograms, while the waiting points on taxiways are locations with a high potential for pollutant accumulation. Aviation is one of the most challenging industries to decarbonize; however, new technologies aim to progressively reduce pollutant emissions, targeting the goal of achieving zero emissions by 2050.

Keywords: emission factor; aircraft; pollutants; database.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões da aviação	14
Figura 2 – Emissões de COV em aeródromos brasileiros	16
Figura 3 – Composição Atmosférica e Reações Químicas	20
Figura 4 – CDA	22
Figura 5 – Turbofan, Turbojato e Turbohélice	24
Figura 6 – Eficiência Turbofan, Turbojato e Turbohélice	24
Figura 7 – Reserva de combustível do Boeing 787	25
Figura 8 – Potência durante o ciclo LTO	26
Figura 9 – Banco de dados de emissões por modelo de motor	28
Figura 10 – Configuração de impulso do motor	29
Figura 12 – Aeronaves e motores representativos	31
Figura 13 – Emissões de um motor turbofan	31
Figura 14 – Metodologias para o cálculo de emissões	37
Figura 15 – Fluxograma da metodologia a seguir	38
Figura 16 – Fluxograma da metodologia de cálculo	41
Figura 17 – Localização do GRU Airport	46
Figura 18 – Conexões do GRU Airport	47
Figura 19 – Pistas 09L/27R, 09R/78L	48
Figura 20 – Fragmento das movimentações durante janeiro 2019	50
Figura 21 – Fragmento da tabela com as emissões por poluente por modelo de motor	50
Figura 22 – Índices simplificados de emissão das aeronaves	51
Figura 23 – Fatores de emissão genéricos	52
Figura 24 – Código Python para tratamento de dados	53
Figura 25 – Movimentações por aeronave durante o 2019 e 2020 em SBGR	54
Figura 26 – 10 aeronaves mais utilizadas durante o 2019 e 2020	55
Figura 27 – Número de operações durante o 2019 e 2020	55
Figura 28 – Relação de modelo de aeronave com modelo de motor compatível	56
Figura 29 – Fatores de emissão por aeronave (2019)	57
Figura 30 – Fatores de emissão por aeronave (2020)	58
Figura 31 – Comparação de emissões totais e por passageiro	59
Figura 32 – Evolução no tempo das emissões de CO2 para os motores compatíveis com o A320 e para o A320 neo	60
Figura 33 – Emissões por etapa	61
Figura 34 – Emissões por etapa	62
Figura 35 – Emissões totais por aeronave durante o 2019	63

Figura 36 – Emissões totais por aeronave durante o 2020	64
Figura 37 – Ponderação das aeronaves mais utilizadas do 2019 e 2020	65
Figura 38 – Média Ponderada para o 2019 e 2020	66
Figura 39 – Comparação de emissões de HC e CO em toneladas	66
Figura 40 – Comparação de emissões de NOx e MP em toneladas	67
Figura 41 – Comparação de emissões de H2O e SO2 em toneladas	67
Figura 42 – Comparação de emissões de CO2 durante o 2019 e 2020 em Kilo toneladas	67
Figura 43 – Total de emissões para o 2019 e 2020	68
Figura 44 – Comparação das emissões totais por poluente durante o 2019 e 2020	68
Figura 45 – Comparativa das metodologias para as emissões anuais de HC, MP e SO2 durante o 2019	69
Figura 46 – Comparação das metodologias para as emissões anuais de CO, NOx e CO2 durante o 2019	70
Figura 47 – Modelos de aeronaves para operação de 1h	71
Figura 48 – Percurso das aeronaves	72
Figura 49 – Emissões por etapa	73
Figura 50 – Emissões das aeronaves	73
Figura 51 – Tabela de atributos QGIS	74
Figura 52 – Emissões totais por trajeto	75
Figura 53 – Emissões totais por Km	76
Figura 54 – Modelo de aeronave, número de operações e ponderação para o 2019 e 2020	89
Figura 55 – Emissões totais de cada poluente por aeronave para o 2019	93
Figura 56 – Emissões totais de cada poluente por aeronave para o 2020	96
Figura 57 – Emissões totais de cada poluente por aeronave por mês	97
Figura 58 – Índices simplificados de emissão de aeronaves	98

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	JUSTIFICATIVA	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	IMPACTOS DOS POLUENTES DA AVIAÇÃO NA ATMOSFERA	19
2.1.1	Medidas de limitação de emissões na aviação	21
2.2	CATEGORIAS DE MOTORES AERONÁUTICOS E COMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO	23
2.2.1	Tipos de motores aeronáuticos	23
2.2.2	Combustíveis utilizados na aviação	24
2.2.3	Especificações dos motores	26
2.2.3.1	Fator de Emissão	27
2.3	EMISSÕES DAS AERONAVES	28
2.3.1	Principais Poluentes oriundos das atividades da aviação	31
2.3.1.1	Emissões acidificantes	32
2.3.1.2	Emissões de efeito estufa	32
2.3.1.3	Material Particulado	33
2.4	MAPEAMENTO DAS EMISSÕES DAS AERONAVES	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	38
3.2	ETAPA 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	38
3.3	ETAPA 3: DEFINIÇÃO DO OBJETO E LOCAL DE ESTUDO	39
3.4	ETAPA 4: COLETA DE DADOS	39
3.5	ETAPA 5: PROCESSAMENTO DE DADOS	40
3.6	ETAPA 6: CÁLCULOS DE EMISSÕES	41
3.7	ETAPA 7: APRENDIZAGEM DA FERRAMENTA QGIS	42
3.8	ETAPA 8: MAPEAMENTO	42
3.9	ETAPA 9: ANÁLISE DE RESULTADOS	43
4	ESTUDO DE CASO: AEROPORTO DE GUARULHOS	45
4.1	ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	45
4.2	ETAPA 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	45
4.3	ETAPA 3: DEFINIÇÃO DO OBJETO E LOCAL DE ESTUDO	45
4.4	ETAPA 4: COLETA DE DADOS	49
4.4.1	Metadados de movimentação aeroportuária	49

4.4.2	Banco de dados AEED para ciclos LTO da ICAO	50
4.4.3	Emissões de poluentes por tipo de Aeronave	51
4.5	ETAPA 5: PROCESSAMENTO DE DADOS	52
4.5.1	Filtragem do arquivo: metadados das movimentações aeroportuárias	52
4.5.2	Relação do modelo de aeronave com o motor compatível	56
4.5.3	Relação Aeronave-Motor-Fator de Emissão	56
4.6	ETAPA 6: CÁLCULOS	62
4.6.1	Multiplicar o número de Operações pelo Fatores de Emissão	62
4.6.2	Média ponderada	65
4.6.3	Cálculo das emissões por mês	66
4.6.4	Total de Emissões por ano	68
4.7	INCERTEZAS E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS APLICANDO METODOLOGIAS DIFERENTES	69
4.8	ETAPAS 7, 8 E 9: MAPEAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
5	CONCLUSÃO E LINHAS FUTURAS	77
	REFERÊNCIAS	80
.1	APÊNDICE-A	86
.2	APÊNDICE-B	98

1 INTRODUÇÃO

O transporte aéreo está em constante crescimento, em resposta á uma população que aumenta rapidamente. A problemática da superpopulação mundial está diretamente relacionada à crescente demanda por bens e serviços, tornando necessário um sistema de transporte rápido e altamente interconectado (ARA, 2014). A globalização e os preços mais acessíveis têm sido motivos para o aumento exponencial do número de passageiros nas últimas décadas, com uma taxa média de crescimento global de aproximadamente 4% ao ano. Estima-se que o número de passageiros alcance 4 bilhões até 2024 (IATA, 2022)

O crescimento do setor aéreo é motivado pelo incremento no número de passageiros, para isto são necessárias um maior número de aeronaves operando e, como consequência, aumentam os impactos negativos no planeta. Os impactos da indústria tem influência a nível global, o elevado consumo de matérias primas não renováveis e combustíveis fósseis, contribuindo para esgotar as reservas fósseis de forma acelerada (EC, 2008).

A nível local, preocupam os efeitos sobre a flora, a fauna local, e também o ruído, já que nas proximidades dos aeródromos é habitual superar os níveis de decibéis (dB) recomendados pela OMS. As operações aeroportuárias também prejudicam a qualidade do ar, o que acaba repercutindo de forma negativa na saúde das pessoas e no meio biótico (ICAO, 2020).

O impacto gerado a nível local que mais preocupações levanta é o atmosférico. As emissões oriundas da aviação causam um grande impacto na qualidade do ar. O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022) afirma que o setor aéreo é responsável por 2% das emissões de carbono procedentes da atividade humana. Os poluentes são liberados principalmente nas operações de voo das aeronaves, mas existem outras emissões provenientes do movimento de veículos operacionais dos aeródromos, operações com Unidades de Potência Auxiliar (APU) ou a manutenção dos motores.

A modificação na composição do ar, resultante da liberação de diversos poluentes durante a queima de combustíveis fósseis, acarreta consequências significativas para a saúde humana. A Tabela 1 correlaciona os principais poluentes com seus respectivos impactos na saúde humana. Alguns poluentes, como o CO₂, podem ser tolerados em maiores quantidades, enquanto outros, como o Material Particulado, apresentam potencial prejudicial mesmo em concentrações reduzidas.

Os impactos na saúde resumidos na Tabela 1 são mais críticos quanto maior a concentração no ar e quanto maior exposição, isto significa que os bairros vizinhos aos aeroportos e os trabalhadores em solo do aeroporto, assim como passageiros

frequentes, experimentarão consequências mais severas.

POLUENTE	IMPACTOS NA SAÚDE
Material Particulado (MP)	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas pulmonares (Obstrução, câncer, asma) • Dor de garganta • Irritação dos olhos
Dióxido de Carbono (CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • Dor de cabeça; fadiga • Mudanças no metabolismo
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> • Dor de cabeça • Ansiedade • Doenças cardiovasculares
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldades pulmonares e asma • Irritação dos olhos e garganta • Impacto no sangue e fígado

Tabela 1 – Impactos dos poluentes na saúde

Fonte: (EEA, 2023)

A Figura 1.a representa a origem das emissões anuais do transporte no Brasil, onde é possível observar que o meio mais poluente em termos de quantidade total de emissões é o rodoviário, sendo aproximadamente 5 vezes mais poluente que a aviação. A Figura 1.b ilustra a comparação das emissões de diferentes meios de transporte por passageiro e quilômetro. É possível determinar que o automóvel com 1 passageiro pode emitir mais emissões de CO₂ quando comparado com outros meios, no entanto, o meio mais poluente enquanto a emissões totais é o aéreo.

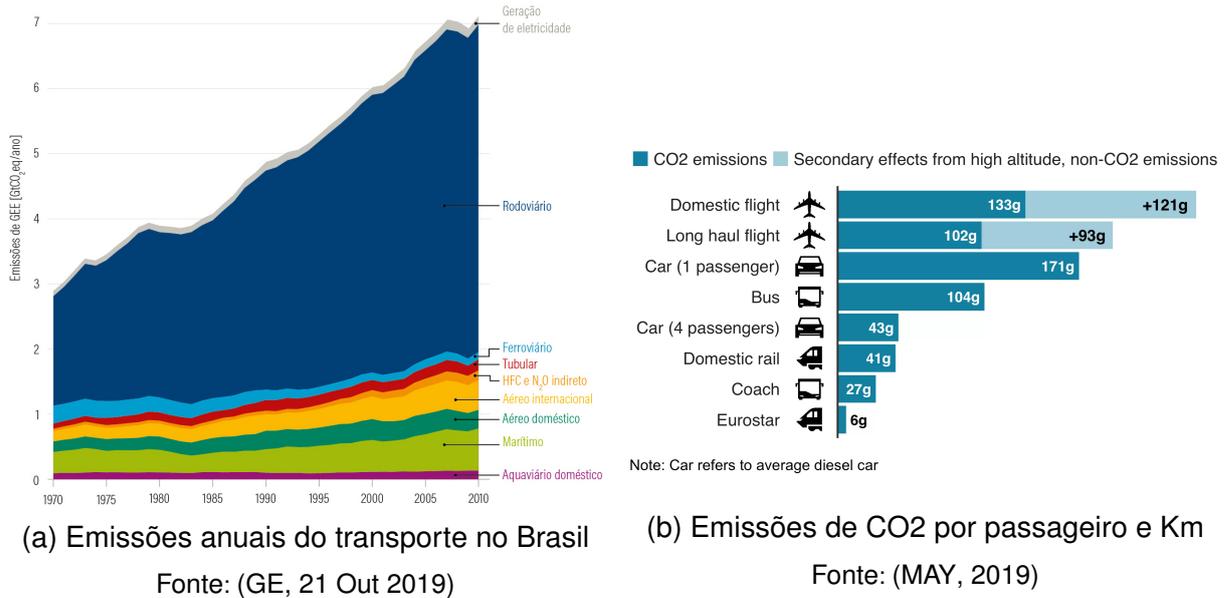


Figura 1 – Emissões da aviação

O dióxido de carbono permanece na atmosfera por aproximadamente 100 anos, o CO₂ emitido nas rotas aéreas é dispersado uniformemente por toda a atmosfera, diferentemente de outras fontes onde as emissões estão mais localizadas, por esse motivo, os impactos das emissões das aeronaves são mais difíceis de avaliar (IPCC, 2018).

Os impactos negativos mencionados têm motivado o setor a tomar medidas de mitigação, no entanto, é uma das indústrias mais difíceis de descarbonizar. A complexidade das operações e as limitações de peso são fatores que dificultam a transição para a aviação verde. Por um lado, as baterias elétricas são muito pesadas, inviabilizando voos de longa distância e alta capacidade. Por outro lado, a propulsão por hidrogênio enfrenta desafios relacionados ao armazenamento, uma vez que ocupa um volume até três vezes maior do que o combustível atual, sendo necessário redesenhar os tanques de combustível das aeronaves. Por último, os biocombustíveis de aviação, SAF (combustíveis de aviação sustentável), ainda são muito caros devido à oferta limitada (DODD, 2023).

A OACI contribui estabelecendo rigorosas medidas de emissões de CO₂ e certificação de aeronaves contidas no Volume III no Anexo 16 do Convênio de Chicago 'Proteção do meio ambiente' sendo a norma sobre as emissões de CO₂ das aeronaves a primeira norma de desenho mundial sobre as emissões de CO₂ de qualquer setor. A norma será aplicada aos novos desenhos a partir de 2020, aquelas aeronaves que não sigam a norma a partir de 2028 não poderão ser fabricadas, exceto se modificarem os desenhos adequadamente (CIVIL, 2018)

As novas tecnologias aprimoram a eficiência do combustível, contribuindo para a mitigação do impacto da aviação na qualidade do ar. Para o setor, a alternativa

mais viável é o SAF (combustível de aviação sustentável). A regulamentação ReFuelEU Aviation da União Europeia exigirá o uso de 2% de combustível ecológico até 2025, e irá aumentando a cada cinco anos, se exigirá utilizar misturas de SAF de um 6% em 2030, um 20% em 2035, um 34% em 2040, um 42% em 2045 e um 70% em 2050 (UE, 2023).

Para atingir a meta de zero emissões do setor não há uma solução única, é necessária a combinação de diferentes tecnologias e a colaboração de todos os agentes, para cada cenário haverá uma solução sustentável ótima (BRENNAN, 2022).

Para compreender a magnitude dos impactos causados pela aviação e a urgência na implementação de medidas mitigadoras, é essencial quantificar as emissões. A complexidade desses cálculos é aumentada devido ao grande número de variáveis envolvidas. Atualmente, não existe uma metodologia universal para calcular as emissões decorrentes das operações das aeronaves, resultando em uma grande variação nos resultados e introduzindo incertezas que devem ser levadas em consideração (SIA, 2023).

O método mais confiável para a avaliação da qualidade do ar no ambiente aeroportuário e nas áreas circunvizinhas consiste na instalação de medidores específicos. Estes instrumentos são capacitados a realizar medições in loco da concentração de poluentes no local de análise. A instalação desses dispositivos nos aeroportos e em suas proximidades possibilita determinar a qualidade do ar local e determinar a contribuição do aeroporto na emissão de gases de efeito estufa (ICAO, 2023).

Os instrumentos de medição da qualidade do ar revelam-se confiáveis e proveitosos para avaliações in loco. Contudo, carecem da habilidade de quantificar emissões durante a fase de cruzeiro. Com o intuito de realizar medições e espacializar emissões sem depender de aparatos físicos, destaca-se o software AEDT (Aviation Environmental Design Tool), desenvolvido pela FAA de uso para trabalhadores autorizados. O AEDT possui a capacidade de modelar dinamicamente o desempenho das aeronaves no tempo e espaço, exibindo informações sobre a queima de combustível, emissões, ruído e qualidade do ar resultante (AEDT, 2023).

Como alternativa ao AEDT para espacializar as emissões dos ciclos LTO, pode-se optar pelo QGIS, ferramenta que permite ao usuário criar mapas temáticos baseados em informações georreferenciadas. No entanto, deparamo-nos com limitações devido à escassez de dados disponíveis e de referências que abordem a geolocalização das emissões provenientes de aeronaves (QGIS, 2023).

Os locais que mais precisam estar sobre controle e quantificando suas emissões e a qualidade do ar são áreas potencialmente concentradoras de emissões, como grandes aeroportos com um elevado número de operações.

De acordo com informes divulgados pela ANAC no inventário nacional de emissões, o aeroporto de Guarulhos está em 1º lugar no ranking dos maiores aéro-

portos poluidores do país. A Figura 2 ilustra as emissões de compostos orgânicos voláteis nos principais aeródromos brasileiros, é possível identificar ao GRU Airport como o mais poluidor. A ANAC também estima que as emissões de NOx e SO2 são superiores no aeroporto de Guarulhos quando comparado com outros (ANAC, 2019).

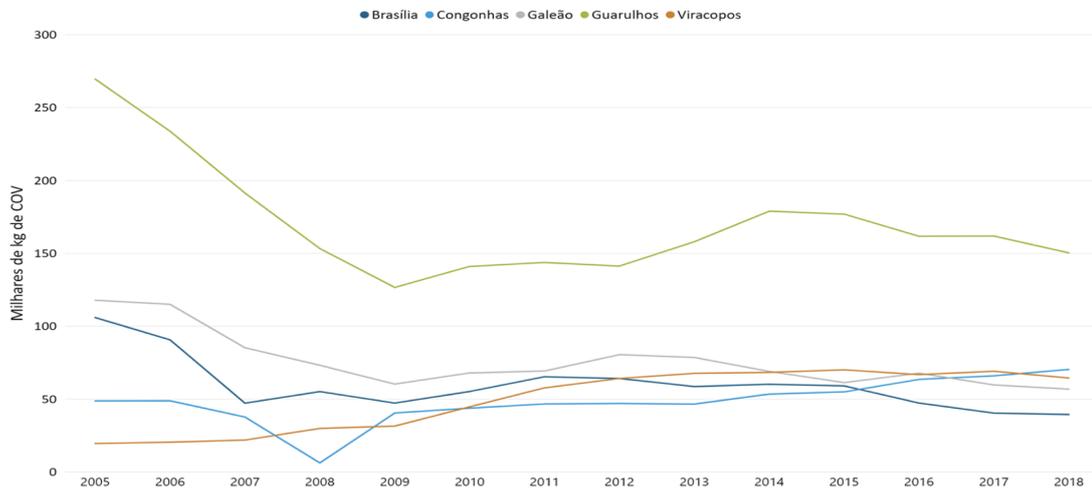


Figura 2 – Emissões de COV em aeródromos brasileiros

Além de ser o mais poluente, o território do Aeroporto de Guarulhos (GRU) também se destaca como o mais quente do município. A sensação térmica em Guarulhos pode ser até dez graus superior à temperatura registrada em outras regiões do estado, fato que pode ser atribuído às intensas atividades do aeroporto (GUARULHOS, 2019).

O município possui dois medidores de qualidade do ar, porém, esses não estão situados nas imediações do aeroporto, o que significa que a concentração de poluentes na área aeroportuária permanece desconhecida (CETESB, 2019).

As emissões de poluentes em um aeroporto derivam de diversas atividades, sendo as mais significativas em termos de volume de emissão aquelas associadas às operações das aeronaves, conhecidas como operações LTO (Landing and Takeoff). As atividades LTO englobam as operações de ignição dos motores, taxiamento de chegada e partida, decolagem, ascensão (até 915 metros), aproximação (abaixo de 915 metros) e pouso (ICAO, 2020).

Nesse contexto, o foco do presente trabalho é a análise das emissões de poluentes gerados pelo tráfego de aeronaves em solo no aéreo de Guarulhose, para tal fim, são apresentadas algumas questões que pretendem responder aos assuntos tratados.

- Para diferentes aeronaves, quais são os principais gases emitidos no ciclo de voo?
- Qual é a proporção de poluentes emitidos em cada ciclo de voo?

- Quais são as restrições vigentes em matéria ambiental do tráfego aéreo?
- É possível espacializar as emissões dos trajetos aéreos em solo mediante uma ferramenta SIG?
- Como as novas tecnologias poderão diminuir o impacto ambiental das operações de voo?

1.1 OBJETIVOS

Para calcular, espacializar e analisar os diferentes poluentes oriundos das atividades nos ciclos LTO das principais aeronaves que operam na atualidade, propõem-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo geral

Verificar a concentração de emissão de poluentes gerados pelas aeronaves durante as operações em solo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar quais operações aéreas são mais críticas em relação à emissão de poluentes.
- Comparar a divergência dos resultados do cálculo das emissões totais utilizando três métodos de estimação diferentes
- Caracterizar a operação aérea do aeroporto de Guarulhos relacionados à emissão de poluentes.

1.2 JUSTIFICATIVA

As emissões de gases e partículas oriundos do tráfego aéreo são de especial importância por serem emitidos diretamente na troposfera superior e na estratosfera inferior, onde produzem mudanças na composição da atmosfera. Os poluentes alteram a concentração dos gases de efeito estufa, entre os que se inclui o dióxido de carbono (CO₂), óxido de nitrogênio (NO_x), Ozônio (O₃), metano (CH₄).

Preocupam especialmente as emissões que ocorrem nos ciclos de decolagem e pouso, pois as aeronaves estão mais próximas ao solo e as emissões modificam a composição do ar das zonas urbanas da região. Nos ciclos de decolagem e pouso, as aeronaves emitem abundantes quantidades de poluentes nas proximidades do aeroporto, e os grandes núcleos urbanos, no seu entorno estarão submetidos a essas emissões.

É importante que os aeroportos que concentram um número grande de operações, como o de Guarulhos, efetúe medições periódicas dos níveis de poluentes

para ter controle sobre a qualidade do ar e avaliar a evolução do mesmo. Desta forma, atuar caso se atinjam níveis insalubres. O município de Guarulhos conta com duas estações de medição da qualidade do ar, em Pimentas e Paços, mas nenhuma se encontra nas proximidades do GRU Airport. O aeroporto também não conta com medidores da qualidade do ar nas suas instalações, nem contabiliza as emissões oriundas das operações, ao não ter esses dados a gravidade da situação é desconhecida.

As duas estações de monitoramento da qualidade do ar de Guarulhos apontaram que o material particulado e o dióxido de nitrogênio foram superiores ao recomendado durante o 2019 e também durante a pandemia (RGH, 2022). Além disso nenhuma das estações realiza medições de todos os poluentes, abordando apenas SO₂, MP, CO, O₃ e NO₂, desta forma os índices de CO₂, HC e H₂O permanecem desconhecidos (MPSP, 2022). A falta de medições regulares da qualidade do ar nas proximidades, impede a determinação da gravidade do problema e a identificação de uma solução adequada.

A ausência de levantamentos estatísticos dos órgãos públicos foi a motivação para a elaboração do presente trabalho, que busca dimensionar as emissões de poluentes e o prejuízo gerado pelas operações LTO em solo no aeroporto de Guarulhos, São Paulo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção aborda detalhadamente os principais temas que o presente trabalho visa responder e analisar: os impactos da aviação na atmosfera; a identificação das medidas para limitação de emissões e a exploração de como as novas tecnologias buscam aprimorar os impactos negativos; a classificação dos motores aeronáuticos; a definição dos combustíveis utilizados na aviação; a identificação dos principais fabricantes de motores aeronáuticos; a especificação das emissões das aeronaves; a determinação dos principais poluentes provenientes das atividades aeronáuticas; e o mapeamento das emissões das aeronaves por meio da ferramenta SIG.

2.1 IMPACTOS DOS POLUENTES DA AVIAÇÃO NA ATMOSFERA

Os poluentes exercem um impacto prejudicial nos ecossistemas, desencadeando a perda de biodiversidade e afetando a qualidade do ar, podendo prejudicar a saúde dos seres vivos. Os principais poluentes emitidos pelos motores das aeronaves são CO₂ (dióxido de carbono), SO₂ (dióxido de enxofre), HC (hidrocarbonetos), CO (monóxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrogênio), MP e vapor de água. Esses poluentes são liberados em diversas altitudes, desde o nível do solo até de cruzeiro, a uma altitude aproximada de 35.000 pés (OVERTON, 2022).

As emissões em solo resultantes das operações nos aeroportos têm um impacto imediato no ar local, afetando consequentemente as pessoas e o ambiente. À medida que a aeronave sobe ou desce, os poluentes são liberados em várias altitudes da troposfera, conforme evidenciado no percurso destacado em vermelho na Figura 3 (OVERTON, 2022).

Os gases emitidos em altitudes baixas e médias da troposfera interagem com os fenômenos meteorológicos, podendo ser deslocados para outras regiões e passar por transformações químicas ao reagirem com os componentes da atmosfera. Quando a aeronave atinge a altitude de cruzeiro, conforme ilustrado na Figura 3, sua atividade torna-se altamente eficiente. No entanto, devido a ser a fase mais extensa do voo, a fase de cruzeiro é responsável por 90% das emissões totais da operação, fazendo com que a alta troposfera acumule a maior quantidade de poluentes provenientes das aeronaves (OVERTON, 2022).

Da quantidade total de poluentes emitidos, aproximadamente 30% consiste em vapor de água, liberado pelas aeronaves na forma de trilhas de condensação. H₂O não é considerado um poluente, pois penetra rapidamente na estratosfera, conforme ilustrado na Figura 3, resultando em um impacto direto mínimo no aquecimento. No entanto, as trilhas de condensação retêm raios infravermelhos, gerando um efeito de

aquecimento até três vezes maior do que o impacto do CO₂. Mesmo que essas trilhas tenham uma vida útil de apenas algumas horas, sua influência coletiva, decorrente de milhares de voos, acarreta sério efeito de aquecimento. Esse efeito é tão significativo atualmente que ultrapassa a influência total de aquecimento de todo o CO₂ emitido por aeronaves (OVERTON, 2022).

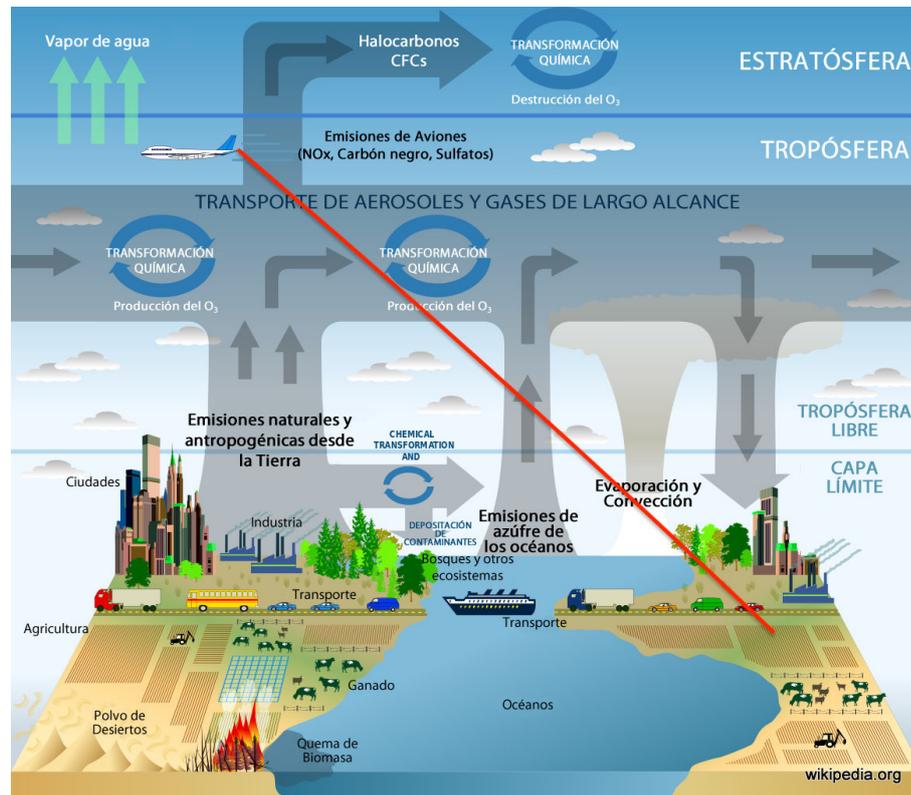


Figura 3 – Composição Atmosférica e Reações Químicas (CCG, 2019)

Dentre os poluentes emitidos pelas aeronaves, dois merecem especial atenção devido aos impactos na saúde: o óxido nítrico e as partículas em suspensão. A exposição prolongada a esses poluentes pode acarretar uma série de consequências para a saúde, que variam desde efeitos respiratórios leves até o desenvolvimento de alergias e, em casos extremos, até mesmo a ocorrência de morte prematura (UNECE, 2022).

As partículas ultrafinas estão presentes em alta concentração nas pistas, embora a quantidade em massa de material particulado seja significativamente baixa em comparação com outros poluentes, o impacto gerado pelo MP é consideravelmente maior. Quando inaladas, as partículas conseguem atingir os pulmões, causando graves consequências para a saúde, especialmente em pessoas expostas durante longos períodos, como vizinhos e trabalhadores do aeroporto, sendo os mais prejudicados os funcionários que desempenham suas atividades nas pistas (BENDTSEN K.M., 2021).

O CO₂ não é tóxico para os seres humanos quando exposto a concentra-

ções médias, o problema surge quando a concentração é elevada, como ocorre na aviação. O CO₂ é o principal gás efeito estufa emitido nas atividades das aeronaves, abrangendo praticamente 70% do total de emissões. A lenta eliminação desse gás na atmosfera contribui para o CO₂ se tornar o principal gás do efeito estufa. Cerca de 30% da quantidade desse gás é naturalmente removida da atmosfera ao longo de 30 anos, mais 50% desaparece em alguns séculos, e os restantes 20% permanecem na atmosfera por milhares de anos (OVERTON, 2022).

O óxido de nitrogênio (NO_x) e o dióxido de enxofre (SO₂), originários da queima de combustíveis fósseis nos motores das aeronaves e emitidos a atmosfera. Ao reagirem com a umidade ambiente, bactérias ou outros catalisadores, transformam-se em ácido nítrico e ácido sulfúrico, respectivamente. Durante a precipitação, esses ácidos, junto com partículas como fuligem e cinzas, precipitam-se na forma de chuva ácida, provocando danos aos ecossistemas, resultando em alterações graves e na perda de biodiversidade (NG, 2022).

2.1.1 Medidas de limitação de emissões na aviação

A preocupação pelas mudanças climáticas das últimas décadas tem impulsionado a necessidade de estabelecer vários instrumentos legais visando atingir níveis na qualidade do ar que não gerem impacto negativo ao entorno.

Os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar fazem parte do Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), sob a responsabilidade do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Esses padrões são fundamentados nos valores de referência de qualidade do ar recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2005, juntamente com os critérios estabelecidos para a sua implementação (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2022).

O Acordo de Paris visa evitar um aumento de 1,5 graus na temperatura global, os 119 países membros da OACI a estabelecerem uma meta conjunta de alcançar emissões líquidas zero de carbono até o ano de 2050 a fim de lograr uma aviação sustentável (ICAO, 2022).

O maior desafio reside na redução gradual das emissões, ao mesmo tempo em que o setor precisa atender à crescente demanda de passageiros que desejam viajar. Até o ano de 2050, é prevista uma demanda total de 10 milhões de passageiros, o que implicará na necessidade de mitigar 1,8 gigatoneladas de CO₂ nesse mesmo ano. Para alcançar o sucesso na transição energética, é fundamental que todos os agentes da indústria, incluindo companhias aéreas, fabricantes, produtores de Combustível de Aviação Sustentável (SAF) e operadores de aeroportos, colaborem em um quadro comum. Essa colaboração deve contar com o apoio dos governos e organizações reguladoras, os quais devem estabelecer políticas e medidas concretas dentro de prazos determinados (ECODES, 2021).

Para mitigar as emissões de carbono, a estratégia prevê uma redução de 65% por meio do uso de Combustíveis de Aviação Sustentável (SAF), 13% por meio da adoção de novas tecnologias de propulsão com hidrogênio, um aumento de 3% na eficiência através da implementação de novas tecnologias, 11% por meio da captura de carbono e os 8% restantes por meio de compensações (ECODES, 2021).

O papel dos governos desempenha um papel fundamental, especialmente no caso do SAF (Combustível de Aviação Sustentável), onde a tecnologia para a sua produção já existe, porém, atualmente, não é uma opção viável devido aos custos mais elevados em comparação com os combustíveis fósseis. A solução passa pelo aumento da oferta, que pode ser alcançado por meio de incentivos e financiamento para a construção de novas instalações. O objetivo é que ao longo dos anos a produção de SAF aumente de 7.900 milhões de litros em 2025 (2% do consumo total de combustível) para 449.000 milhões de litros em 2050 (65% do consumo total de combustível) (ECODES, 2021).

Entre as medidas de redução de emissões se encontra as melhoras nos sistemas de controle de tráfego para aumentar a eficiência y evitar esperas innecesarias nas pistas e nas proximidades do aeroporto. Uma medida que melhora a eficiencia é o CDA (Continuous Descent Approach), ou "Aproximação desde o Ponto de Descida Contínua". Como ilustra a Figura 4, em vez de descer e manter altitude constantemente, faz uma descida contínua, essa técnica permite economizar combustível ao não mudar repetidamente o embuxo dos motores e ao voar a altitudes maiores por mais tempo, onde a resistência aerodinâmica é menor (HUSAIN, 2023).

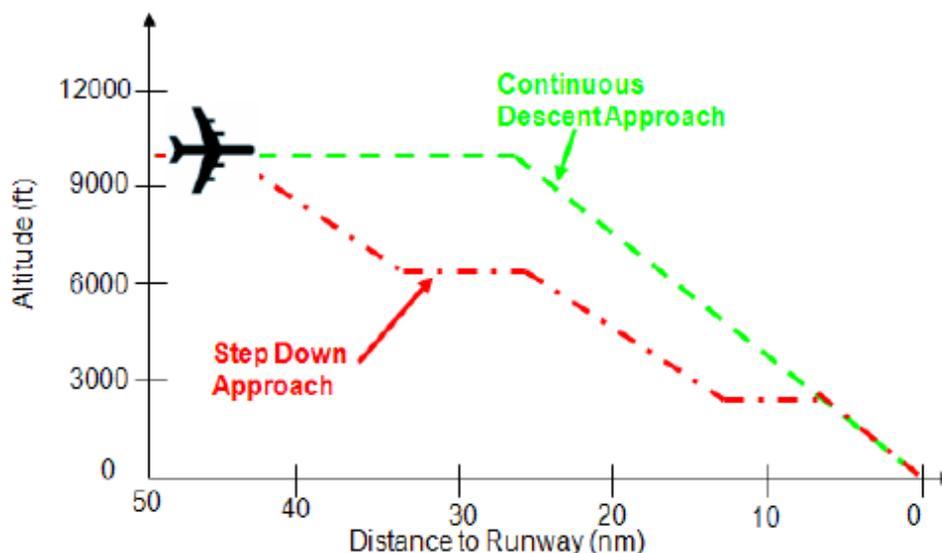


Figura 4 – CDA
(ALAM HUSEIN ABBASS, 2010)

2.2 CATEGORIAS DE MOTORES AERONÁUTICOS E COMBUSTÍVEIS DE AVIAÇÃO

Os motores desempenham um papel essencial na emissão de poluentes, visto que o processo de combustão ocorre durante o funcionamento dos mesmos, especificamente no componente denominado câmara de combustão. A principal causa dessas emissões está associada à combustão de combustíveis fósseis para gerar a energia para impulsionar a aeronave. A seguir são tratados os principais fabricantes, os tipos de combustíveis empregados e as normas regulatórias de certificação vigentes.

2.2.1 Tipos de motores aeronáuticos

De acordo com a companhia aérea Plus Ultra, a classificação dos motores de propulsão aeroespacial se divide em três grandes categorias, com base em sua estrutura interna, estágios e funcionalidade. Cabe destacar que cada motor apresenta a máxima eficiência sob condições específicas de peso, altitude e velocidade, por esse motivo, dependendo do tipo de aeronave e das condições de voo, existirá um modelo propulsivo que maximiza a eficiência e diminui o consumo de combustível, e conseqüentemente, diminui as emissões (PLUS ULTRA, 2023):

- **Turbohélice.** O nome deste tipo de motor deriva da presença de uma hélice na entrada, conforme ilustrado no desenho à direita na Figura 5 (turboprop). Como indicado na curva de eficiência propulsiva da Figura 6, a linha verde representa o motor turbo-hélice, o pico de eficiência é atingido a uma velocidade Mach de 0.5, ou seja, velocidades de voo inferiores a 800 km/h.
- **Turbojato.** Como pode ser visto no primeiro desenho da Figura 5 (turbojet), o ar percorre o seguinte trajeto: difusor de entrada, compressor, câmara de combustão, turbina e bocal. Como evidenciado na curva azul da Figura 6, a maior velocidade Mach se traduz em uma maior eficiência propulsiva.
- **Turbofan.** Conforme ilustrado no terceiro desenho da Figura 5 (turbofan), sua estrutura é praticamente idêntica à dos turbojatos, com a diferença do fan ou ventilador na entrada. A grande vantagem do turbofan é sua notável eficiência a velocidades Mach 0.8, conforme ilustrado na curva vermelha da Figura 6, isto faz com que seja o mais utilizado em vôos comerciais.

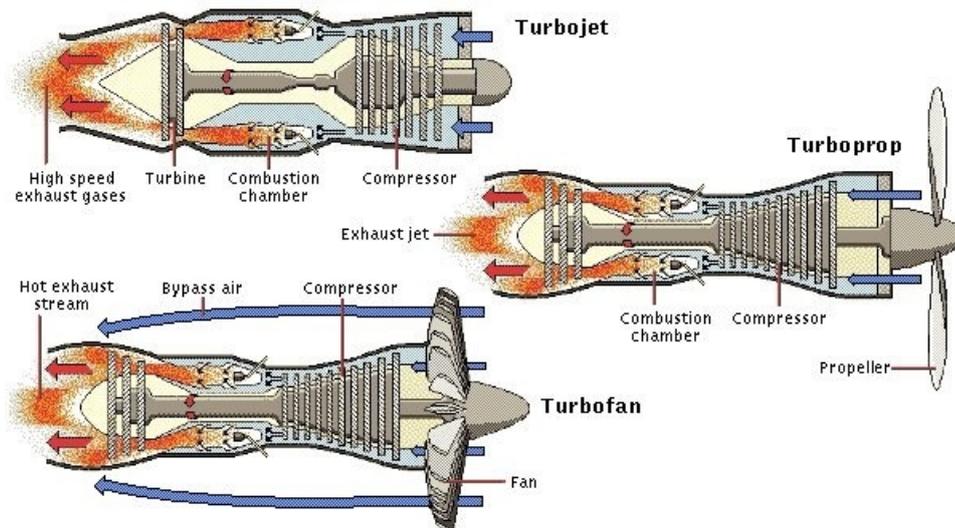


Figura 5 – Turbofan, Turbojato e Turbohélice (BARDERAS, 2020)

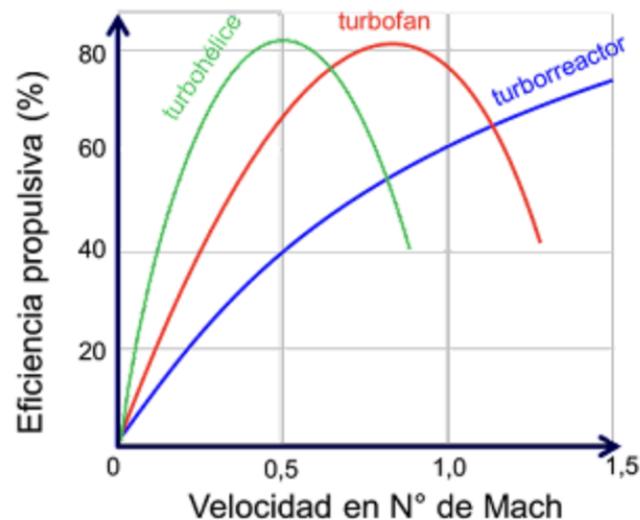


Figura 6 – Eficiência Turbofan, Turbojato e Turbohélice (GREAT BUSTARDS FLIGHT, 2017)

2.2.2 Combustíveis utilizados na aviação

Nas aeronaves, o combustível é armazenado nas asas e no tanque central, como ilustrado na Figura 7. As reservas de carburante estão estrategicamente posicionadas para permitir uma melhor sustentação e evitar uma flexão excessiva e fadiga do material na junção das asas com a fuselagem, também serve para equilíbrio e o centrado da aeronave, pois os tanques estão localizados o mais próximo possível do centro de gravidade. O peso total do combustível pode chegar a 50% do peso de decolagem do voo (AIR NET, 2017).

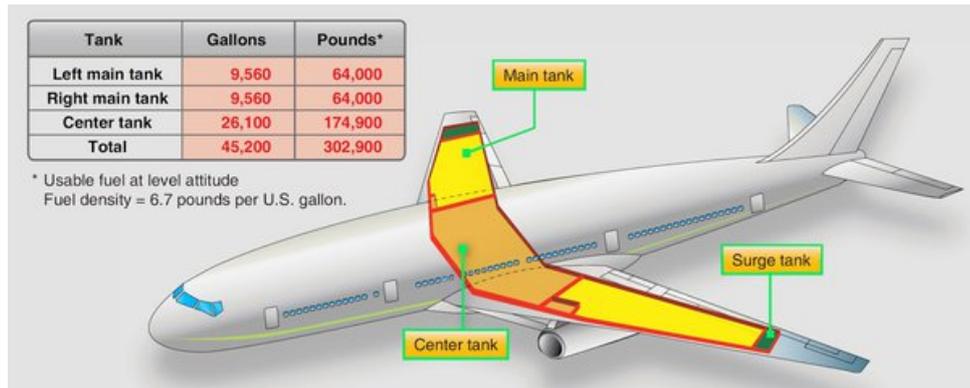


Figura 7 – Reserva de combustível do Boeing 787
(AIR NET, 2017)

Os combustíveis utilizados na aviação são misturas especificamente formuladas para cada tipo de motor:

- **Jet A-1.** É o combustível mais amplamente empregado na aviação atualmente, compatível com a maioria das aeronaves a jato, helicópteros, turboélices e motores a pistão de ignição por compressão. Este combustível de querosene passa por um processo de refinamento e é enriquecido com diversos aditivos que desempenham funções cruciais, tais como prevenir o crescimento de organismos no combustível, evitar a ignição não controlada da mistura e impedir o congelamento em altitudes de cruzeiro (OILTANKING, 2023).
- **AvGas 100LL.** Sua adaptação a diferentes temperaturas e pressões proporciona níveis mais elevados de segurança às aeronaves. Este combustível com baixo teor de chumbo é normalmente utilizado apenas em motores de pistão mais antigos em aeronaves esportivas e pequenas aeronaves privadas (OILTANKING, 2023).
- **JP-8.** É um combustível derivado do querosene é utilizado em aeronaves militares composto de aproximadamente 65% de gasolina e 35% de querosene. O JP-8 é enriquecido com aditivos específicos que atuam como inibidores de corrosão, inibidores de formação de gelo no sistema de combustível, antioxidantes e como melhoradores da condutividade (REPSOL, 2023).
- **Bioquerosene.** A busca por um combustível mais barato e responsável com o meio impulsionou numerosas investigações e desenvolvimento de alternativas, é o caso do bioquerosene. A partir de matéria orgânica como algas e óleos vegetais misturado com querosene, se obtêm o bioquerosene, os resultados bem sucedidos nos voos teste mantém a esperança de conseguir uma alternativa verde, o principal problema a enfrentar é a abundante quantidade de biocombustível necessário para a queima e a pouca disponibilidade que se tem da mesma na atualidade (DOMINELLI, 2012)

2.2.3 Especificações dos motores

Os fabricantes de motores aeronáuticos são responsáveis por fornecer informações à ICAO. Esta entidade publica bancos de dados nos quais é possível consultar todas as informações relacionadas às emissões por tipo de motor. Para garantir a veracidade dos dados, o comitê da ICAO revisa e testa esses motores.

Os cálculos são realizados em ciclos Landing and Take-Off (LTO) (Decolagem, Subida Inicial, descida e Pouso) e em condições atmosféricas padrão, conforme definido na Atmosfera Padrão Internacional (ISA). A Agência Europeia de Segurança da Aviação (EASA) também publica informações sobre a potência utilizada pelos motores em cada fase do voo, sob condições padrão (EASA, 2023).

A Figura 8 esquematiza as fases do ciclo LTO, detalhando a potência aplicada pelos motores e o tempo médio de cada operação. Durante a decolagem, a aeronave emprega 100% da potência disponível para elevar a carga máxima da viagem. Posteriormente, ao iniciar a inclinação (pitch), os motores são configurados com 85% do empuxo máximo, marcando a fase de ascensão. Essa fase tem início quando as rodas perdem contato com a pista e se encerra ao atingir 914 metros de altitude (ICAO, 2023).

Quando a aeronave está chegando no aeroporto e se encontra a 914 metros de altitude começa a fase de aproximação, na qual os motores operam com uma potência reduzida de 30%, seguidamente entra na etapa pouso ao tocar o solo, o empuxo é invertido para frear a aeronave. A etapa denominada "idle" na Figura 8 refere-se às operações de ignição dos motores e às atividades em solo que abrangem todos os aspectos do manejo da aeronave no aeroporto, conhecidos como taxiamento in-out. Nessa fase, os motores operam com 7% do empuxo máximo (ICAO, 2023).

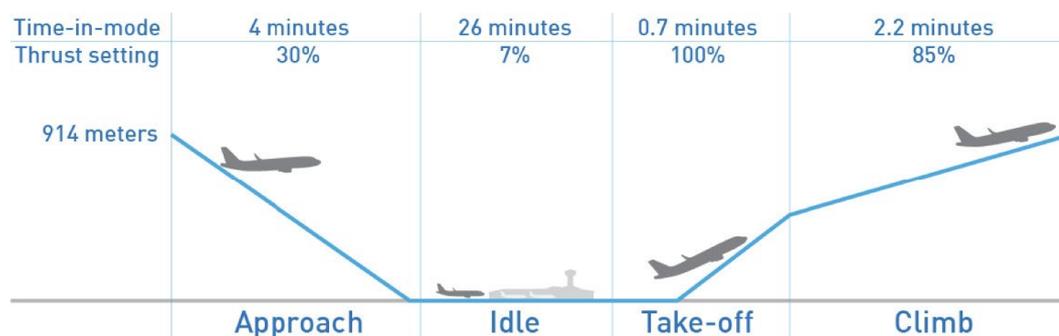


Figura 8 – Potência durante o ciclo LTO (ICAO, 2023)

2.2.3.1 Fator de Emissão

Na análise das emissões provenientes do tráfego aéreo, costuma-se trabalhar com o fator de emissão do motor em questão. O fator de emissão é um valor representativo que relaciona a quantidade de poluentes emitidos na atmosfera com uma atividade associada à sua liberação. Se expressa em termos de quilogramas de cada espécie de emissão por ciclo LTO por motor. Seguindo o Manual sobre a qualidade do ar Doc 9889, os fatores de emissão são aplicados exclusivamente ao ciclo LTO durante a certificação. As emissões totais e o consumo de combustível são calculados com base no tempo em que a aeronave opera em modos e níveis de empuxo padronizados pela OACI (ICAO, 2020).

A Organização de Aviação Civil Internacional (OACI) disponibiliza um banco de dados das emissões dos motores (AEED), permitindo a consulta da quantidade e do tipo de poluente emitido em cada operação sob condições de atmosfera padrão. Este banco de dados é utilizado para determinar a quantidade de poluentes emitidos abaixo dos 3.000 pés, etapas LTO, é o método escolhido no presente trabalho. Para a etapa de cruzeiro existem outros softwares como o EUROCONTROL's Aircraft Database (BADA), baseado num método desenvolvido pela Boeing, no entanto o acesso é restrito a membros do setor, por esse motivo não pôde ser utilizado no presente trabalho (EUROCONTROL, 2022).

Embora existam diferentes métodos e softwares para calcular emissões, atualmente, não há um sistema padronizado. Os diferentes métodos e softwares se baseiam em premissas diferentes, levando a resultados divergentes. No entanto, como as emissões não são visíveis, é importante destacar o impacto que elas causam no meio ambiente e incentivar o cálculo de emissões para compreender que há um problema e quantificá-lo. Dessa forma, conscientizar o público e as entidades para trabalharem conjuntamente na solução (SIA, 2023)

A Figura 9 apresenta um trecho do banco de dados AEED publicado pela ICAO, atualizado em junho de 2023. As linhas em branco se referem a motores utilizados e em produção, as filhas em azul escuro correspondem aos motores mais antigos e fora de produção, enquanto as filhas em cinza representam os motores cujos fatores de emissão foram recentemente revisados (ICAO, 2023).

O banco de dados é extenso, dentre os dados disponíveis, interessam a identificação do motor, e as emissões de poluentes durante o ciclo LTO, expressado em unidades g/LTO. As informações de interesse são as colunas ressaltadas em amarelo na Figura 9, estas são: o modelo do motor; HC [g/LTO]; CO [g/LTO]; NO_x [g/LTO]; Fuel [Kg/LTO]; nvPM [mg/LTO]. O combustível serve para poder calcular a quantidade de CO₂, H₂O e SO₂, ao serem estes poluentes resultado de multiplicar os Kg de combustível necessário por um fator definido.

GSDB No	Engine Identification	Current Engine Status	HC LTO Total mass (g)	CO LTO Total Mass (g)	NO _x LTO Total mass (g)	Fuel LTO Cycle (kg)	nvPM LTO Total Mass (mg)
1	PS-90A	Out of production	138	2123	11648	657	45395
13	PS-90A		470	4216	8287	617	46393
13	PS-90A1		241	3739	9847	648	41582
13	PS-90A2		820	4825	7902	590	42253
3	BR700-710A1-	Out of production	279	3913	2576	299	42253
4	BR700-710A1-	Out of production	156	4212	2790	299	47188
4	BR700-710A2-		160	4239	2784	299	46114
6	BR700-710C4-		301	4449	2850	294	46114
4	BR700-715A1-	Out of production	34	2753	4002	335	46547
4	BR700-715A1-	Out of production	25	3390	3340	339	48261
4	BR700-715B1-	Out of production	27	2693	4583	351	45773
4	BR700-715B1-	Out of production	20	3300	3958	360	45773
4	BR700-715C1-	Out of production	22	2655	5314	370	46114
4	BR700-715C1-	Out of production	18	3236	4588	377	45841
11	BR700-725A1-		398	5899	2565	305	45841

Figura 9 – Banco de dados de emissões por modelo de motor (ICAO, 2023)

O nvPM refere-se ao material particulado não volátil. A própria base de dados alerta que os resultados desse poluente podem não ter sido reportados pelos fabricantes simultaneamente aos demais poluentes, o que pode resultar em possíveis divergências entre os dados dos outros poluentes e o nvPM. Em alguns casos, os fabricantes não forneceram valores para esse poluente, sendo identificados como 'NO DATA' (ICAO, 2023).

2.3 EMISSÕES DAS AERONAVES

As fases LTO destacam-se como as mais críticas do voo em termos da quantidade de poluentes emitidos por segundo. Essas fases seguem os padrões estabelecidos pela OACI, proporcionando uma maior disponibilidade de informações sobre consumo e emissões, o que confere maior confiabilidade aos dados. As variações na quantidade de emissões em cada etapa são influenciadas pela configuração do empuxo dos motores e pelo peso da aeronave, como ilustrado na Figura 10 (ICAO, 2020).

Na fase de decolagem, representada pela coluna vermelha da Figura 10, a aeronave utiliza 100% do impulso máximo que será empregado durante o voo, resultando nas maiores emissões por segundo entre todas as etapas de um voo. Já na fase de subida, representada em amarelo na Figura 10, a aeronave ajusta um ângulo de ascensão, e o impulso necessário é de 85%. As etapas de decolagem e subida combinadas contribuem com 51% das emissões totais durante os ciclos LTO, conforme ilustrado na Figura 11.a, nos pedaços amarelo e vermelho (ANAC, 2019).

Durante a fase de aproximação e pouso, representada em verde na Figura 10, a aeronave necessita desacelerar e perder altitude. Para auxiliar na frenagem, os motores podem reverter o empuxo, operando com um impulso de 30%. A contribuição desta etapa para as emissões totais do ciclo LTO é destacada em verde na Figura 11.a, totalizando aproximadamente 24% (ANAC, 2019).

Nas etapas de taxiamento, identificadas em azul na Figura 10, os motores são configurados com um impulso correspondente a 7% do valor máximo. Dado que a fase de taxiamento é a mais longa do ciclo LTO, as emissões acabam sendo ligeiramente superiores às da aproximação, pouso e decolagem consideradas individualmente, totalizando aproximadamente 26% das emissões totais do ciclo LTO, conforme ilustrado na porção azul da Figura 11.a (ANAC, 2019).

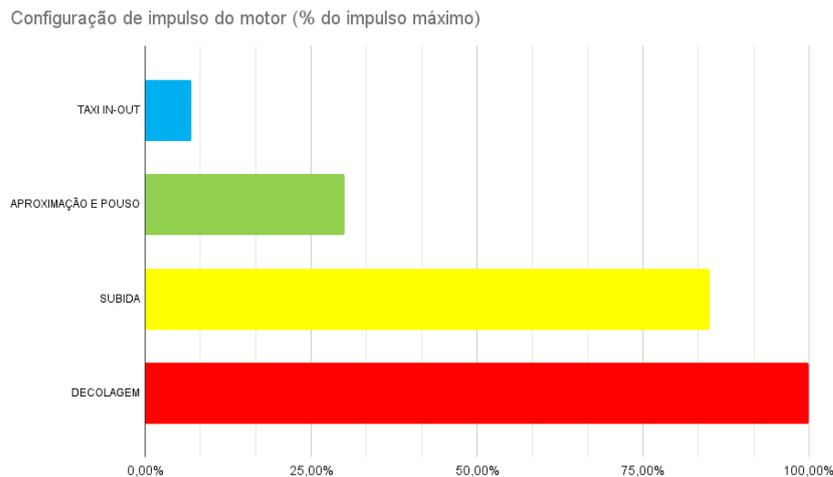
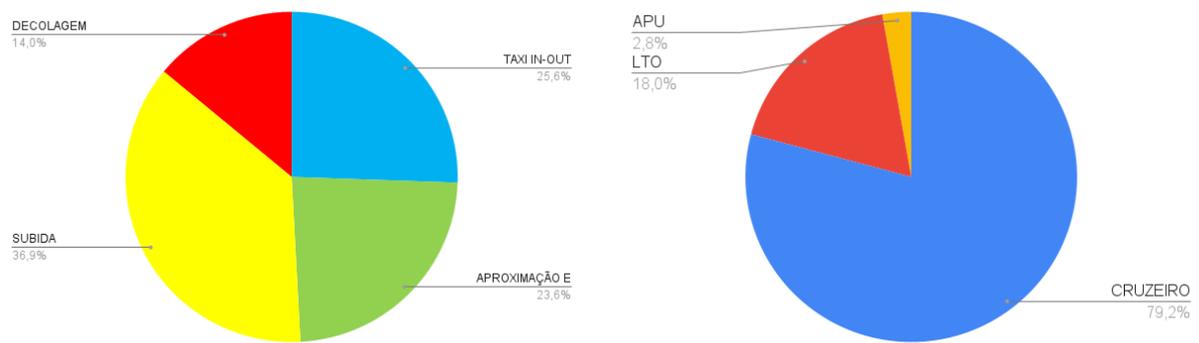


Figura 10 – Configuração de impulso do motor
Fonte: Autora com base nos dados do AEED

A etapa de cruzeiro é a mais longa do voo, conseqüentemente, a que emite mais poluentes na troposfera. No entanto, as etapas LTO (Decolagem, Subida, Aproximação e Pouso) são altamente poluentes e apresentam a maior taxa de poluentes emitidos por segundo. A Figura 11.b mostra a contribuição de emissões de cada etapa para um voo doméstico, sendo o pedaço em azul as emissões durante o cruzeiro, é possível concluir que a etapa de cruzeiro é a mais poluente, a maior duração do voo, maior a proporção de emissões no cruzeiro (ANAC, 2019).

A OACI estima que as incertezas nos diferentes fatores relacionados ao ciclo LTO são de aproximadamente 15%. No entanto, para as atividades de cruzeiro, supõe-se que essas incertezas variem entre 20% e 45%. As emissões de poluentes na etapa de cruzeiro estão fora do escopo do presente trabalho (ICAO, 2020).



(a) Contribuição de cada etapa nas emissões totais dos ciclos LTO (b) Contribuição de cada etapa nas emissões totais do ciclo de voo

Fonte: Autora com base nos dados do AEED e no inventário de emissões da ANAC

Os dados apresentados nas Figuras 10 e 11 podem variar ligeiramente dependendo do modelo de motor em questão. Para determinar os poluentes emitidos nas etapas de LTO por cada aeronave, é necessário associar a aeronave ao modelo de motor compatível. No Documento 9889 da ICAO, é indicado o tipo de motor homologado para cada modelo de aeronave. Um trecho da tabela em questão é ilustrado na Figura 12, e pode-se observar que alguns modelos, como o A319, são compatíveis com dois ou mais modelos de motores (ICAO, 2020).

As colunas 'Motor OACI' e 'UID do motor' da Figura 12 contêm o código do motor que deve ser pesquisado na coluna 'identificação do motor' da tabela da Figura 9. Dessa maneira, é possível estabelecer uma relação entre um modelo de aeronave, seu correspondente modelo de motor e as emissões atribuídas para cada ciclo LTO, isto é, a coluna 'Motor OACI' é o dado comum que estabelece a conexão entre as duas tabelas.

Tipo de aeronave genérico	Motor OACI	UID del motor	OACI	Aeronave IATA en el grupo
Airbus A300	PW4158	1PW048	A30B	AB3
			A306	AB4
				AB6
				ABF
				ABX
				ABY
Airbus A310	CF6-80C2A2	1GE016	A310	310
				312
				313
				31F
				31X
				31Y
A318	CFM56-5B9/3	8CM060	A318	318
Airbus A319	CFM56-5B5/P (60%) V2524-A5 (40%)	3CM027 3IA007	A319	319

Figura 12 – Aeronaves e motores representativos (ICAO, 2020)

2.3.1 Principais Poluentes oriundos das atividades da aviação

A combustão incompleta de combustíveis fósseis, como o querosene, provoca a emissão de subprodutos ricos em carbono, substâncias aromáticas e condensados, conhecidos como fuligem. A Figura 13 mostra como um motor Turbofan se alimenta de combustível e ar, através dos diferentes estágios no seu interior, são liberados compostos orgânicos voláteis (COVs), tais como CO₂, NO_x, CO, SO_x, H₂O e MP diretamente à atmosfera (VINHAS, 2023).

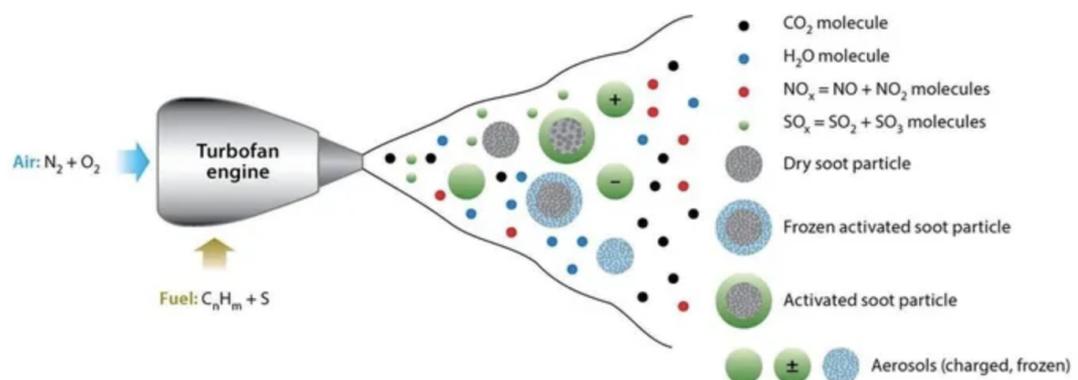


Figura 13 – Emissões de um motor turbofan (VINHAS, 2023)

Em cada etapa de voo, a proporção de poluentes emitidos pode variar. Os principais gases emitidos em todas as etapas são o CO₂, seguido do H₂O. Em menor proporção, encontram-se os demais poluentes (HC, NO_x, SO₂ e MP), cuja quantidade varia conforme a etapa LTO. As proporções de cada poluente em cada etapa são abordadas em detalhes no Capítulo 4. A seguir, são definidos os poluentes emitidos pela operação das aeronaves.

2.3.1.1 Emissões acidificantes

- SO_x.

Na composição do querosene, é comum a presença de enxofre, o qual, durante a reação química na câmara de combustão, sofre oxidação e é emitido na forma de óxidos de enxofre. O dióxido de enxofre (SO₂) é um gás prejudicial regulamentado por rigorosas normas devido ao seu potencial impacto adverso na saúde humana e no ecossistema (MITECO, 2022).

- NO_x.

As novas tecnologias trazem ciclos de motores mais eficientes em combustível, muitas vezes viabilizados pelo uso de novos materiais, têm levado a pressões e temperaturas crescentes dentro do combustor. Como isso tende a aumentar as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), pois este poluente é emitido em maior quantidade ao aumentar a pressão e temperatura da câmara de combustão, o controle dessas emissões por meio do desenho do combustor é um desafio significativo. Os óxidos de nitrogênio com a luz e a humidade atmosférica, formam um ciclo em contínua transformação, provocando acidificação das chuvas. Os óxidos de nitrogênio contribuem na formação de ozônio (O₃). O O₃ está presente na estratosfera, formando parte da camada de ozônio, atua como escudo protetor da radiação ultravioleta. Por outro lado, o ozônio atmosférico pode causar problemas respiratórios severos (EASA, 2019).

2.3.1.2 Emissões de efeito estufa

- CO₂.

Em uma combustão ideal do carburante, o carbono presente na mistura passa por uma oxidação completa, transformando-se imediatamente em CO₂. No entanto, os processos reais estão sujeitos a imperfeições, resultando na formação de pequenas quantidades de carbono parcialmente oxidado e não oxidado. A fração residual de carbono não oxidado no processo tende a se ligar a outras moléculas e é liberada na forma de gases diversos, como metano (CH₄), monóxido de carbono (CO) e compostos orgânicos voláteis. O carbono não queimado restante é armazenado no motor na forma sólida, como fuligem e cinza (UNFCCC, 2020).

O dióxido de carbono é o principal gás emitido durante as operações de aeronaves, representando 80% das emissões geradas pelos motores aeronáuticos. No entanto, os impactos desse gás na saúde humana e no meio ambiente não são tão prejudiciais quanto os óxidos de nitrogênio e enxofre, por exemplo. Quando se compara a mesma concentração de diferentes poluentes, a principal preocupação relacionada ao dióxido de carbono está relacionada à enorme quantidade produzida e à dificuldade que o planeta enfrenta para sua remoção (ICAO, 2016).

- H₂O.

A segunda molécula que é expelida em maior quantidade após o CO₂ é o vapor de água. O H₂O é gerado durante a reação de combustão do combustível fóssil e em condições de ar quente e úmido, o vapor de água é produzido na forma gasosa. De acordo com o IPCC (2008), quando o vapor de água é liberado na troposfera, ele é eliminado devido às precipitações, enquanto que, quando é liberado na estratosfera, pode levar de meses até anos para ser removido. Outro efeito causado pelo vapor de água é a alteração do ciclo natural da água, também atua como um meio de transporte para diversos tipos de partículas em suspensão e é capaz de gerar um efeito de aquecimento até três vezes maior do que o impacto do CO₂ (IPCC, 2008).

- CH.

Os hidrocarbonetos (HC) representam a fração do combustível que não foi completamente consumida devido à combustão incompleta, causada pela falta de oxigênio ou temperaturas mais baixas, sendo liberados pelo motor na atmosfera. Nesse ambiente, eles podem interagir com outros componentes, desencadeando diversas reações químicas. Durante o processo de partida dos motores, as emissões consistem principalmente de CO e HC, com predominância destes últimos. Entretanto, nas etapas subsequentes, é comum que as emissões de HC sejam mais significativas do que as de CO após a partida (ICAO, 2020).

2.3.1.3 Material Particulado

As partículas em suspensão, também conhecidas como material particulado (MP), são partículas de matéria sólida ou líquida presentes no ar, são classificadas com base em seu tamanho, as mais comuns e as que estão sujeitas a regulamentação são as MP₁₀ e MP_{2,5}, que correspondem a diâmetros de 10 micrometros e 2,5 micrometros, respectivamente. Essas partículas são emitidas pelos motores de aviação devido à combustão incompleta do combustível, principalmente partículas ultrafinas (PM₁, PM_{0.1}) e MP₁₀ e MP_{2.5}.

O MP representa um significativo risco para a saúde humana. As partículas sólidas ultrafinas podem aderir a substâncias tóxicas, penetrar nos pulmões e superar as barreiras naturais do corpo humano, ou entrar na corrente sanguínea e afetar

as células e sua informação genética. Como consequência desses riscos, existem diretrizes regulatórias, como a mencionada Diretiva de Qualidade do Ar, responsável por estabelecer limites para a emissão de partículas, incluindo PM10 e PM2.5 (EASA, 2022).

2.4 MAPEAMENTO DAS EMISSÕES DAS AERONAVES

As fases de decolagem e pouso representam os momentos de maior geração de emissões no local, sendo os aeroportos os principais pontos de concentração dessas emissões. As emissões em solo e seu contínuo aumento são motivo de preocupação, especialmente devido ao impacto direto na qualidade do ar local. Áreas com foco em emissões, como os aeroportos e suas proximidades, necessitam de monitoramento constante da qualidade do ar para avaliar se a concentração de poluentes ultrapassa os níveis considerados saudáveis (BEIER, 2021).

As novas tecnologias possibilitam a identificação e localização de emissões sem depender de dispositivos físicos de monitoramento in loco, um exemplo é o software americano AEDT (Aviation Environmental Design Tool), desenvolvido pela FAA. O AEDT modela, ao longo do tempo e espaço, o desempenho das aeronaves, fornecendo informações abrangentes sobre consumo de combustível, emissões, níveis de ruído e qualidade do ar resultante. A quantidade abundante de dados necessários contribui para a profundidade dos resultados, porém, é um fator limitante quando não se tem todos os dados requeridos. Outra limitação significativa é que o software não é de código aberto. (AEDT, 2023).

As referências que abordam o mapeamento das emissões da aviação são escassas, o que se torna um fator limitante ao desenvolver trabalhos similares. Um dos escasos exemplos é o estudo realizado por P. Bajgai e K.L. Shrestha, que tem como objetivo avaliar as emissões de aeronaves no Aeroporto Internacional Tribhuvane, no Nepal, buscando mensurar o impacto que as operações têm na qualidade do ar local (BAJGAI, 2023).

A metodologia do trabalho se fundamenta nos fatores de emissão da base de dados AEED da ICAO; nos modelos WRF (Weather Research and Forecasting) e AERMOD (American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model) para analisar a concentração de poluentes do ar e simular sua dispersão; no programa MMIF (Mesoscale Model Interface Program), para converter os dados meteorológicos para o formato adequado; e no QGIS para a delimitação da área de estudo. Os resultados revelam que as emissões das aeronaves estão aumentando e contribuem significativamente para a poluição do ar local (BAJGAI, 2023).

Como alternativa aos softwares citados para modelar as emissões dos ciclos LTO, pode-se optar por uma metodologia mais simples que envolve o uso da base de dados AEED em conjunto com um Sistema de Informação Geográfica (SIG). O

SIG é uma ferramenta computacional que tem a capacidade de integrar dados georreferenciados e documentos cartográficos, transformando informações relevantes em resultados visuais na forma de mapas. Essa técnica é conhecida como geoprocessamento (QGIS, 2023).

Com esta ferramenta a qualidade dos resultados é limitada, uma vez que não analisa os processos físicos e reações químicas atmosféricas de acordo com as condições meteorológicas. Contudo, ela pode ser útil na aviação para integrar diversas informações, espacializar resultados e representá-los em formato de mapa. Isso possibilita a identificação de áreas com potencial de concentração de emissões, como é o caso dos aeroportos (BRAVO, 2022).

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada no decorrer do presente trabalho para contabilizar e quantificar as emissões de contaminantes provenientes do tráfego aéreo do Aeroporto de Guarulhos está baseada na ferramenta recomendada pelo livro *Air pollutant emission inventory* de 2013, desenvolvido pela Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA European Environment Agency), EUROCONTROL, ICAO e EASA.

Este guia propõe métodos para estimar as emissões dependendo das informações disponíveis. A Figura 14 resume as principais metodologias propostas pelo guia para estimar as emissões das operações das aeronaves. Cabe destacar que além dos métodos descritos na tabela, existem diversos softwares que estimam as emissões de poluentes dos diferentes modelos de aeronave, mas as organizações de aviação recomenda seguir as metodologias do guia.

A metodologia do presente trabalho é a AEED Aircraft Engine Emission Databank, ressaltada em vermelho na Figura 14. De acordo com o guia, o AEED é o método mais confiável quando são conhecidos os modelos das aeronaves que operam num aeroporto e o número de operações LTO que cada modelo realiza.

A base de dados AEED é extensa, mas não reúne todos os modelos de motores disponíveis no mercado, para as aeronaves cujos motores não se encontram na base de dados AEED é necessário aplicar outra metodologia. A seguinte metodologia que, seguindo o guia, leva a resultados mais precisos com base nas informações de partida, é a metodologia nível 2, ressaltada em vermelho na Figura 14. A metodologia nível 2 não utiliza o banco de dados AEED, nem tem em conta o modelo de motor, apenas o modelo da aeronave em questão. O nível 2 consiste em uma tabela que relaciona cada aeronave com fatores de emissão simplificados. A tabela desta metodologia não é tão extensa como a da AEED.

Com o intuito de determinar a divergência nos diferentes métodos, os resultados obtidos ao aplicar o AEED e a metodologia nível 2 se contrastam com o inventário nacional de emissões de Guarulhos disponibilizado pela ANAC.

Método	Dados necessários	Premissas	Incertezas
Nível 1	Consumo de combustível destinado à aviação em atividades de LTO divididos para voos nacionais e internacionais.	Toma como base para os cálculos as emissões de frotas antigas e atuais para voos nacionais e internacionais.	Entre 20%-30% para os fatores relacionados à decolagem e pouso e entre 20%-45% para os fatores de cruzeiro.
Nível 2	Informações referentes à quantidade de ciclos LTO para cada modelo de aeronave. Utiliza FE para LTO específicos de cada aeronave.	Vendas de combustível, para voos nacionais e internacionais. Número de LTO para cada modelo de aeronave.	O alto grau de incerteza associado aos fatores de emissão nas atividades de cruzeiro, depende das condições únicas de cada voo.
Nível 3	Modelo de aeronave e distância de voo percorrida e trajetória.	Dados dos modelos de aeronave específicos na guia proposta pela EEA.	A OACI estima que as incertezas para os fatores de emissões LTO estejam entre 5%-10%, e entre 15%-40%. para cruzeiro.
AEED	Número de operaciones LTO por tipo de aeronave y por periodo, aeropuerto de origen y destino.	Os dados são providenciados pelos fabricantes de motores após testes dos motores nos túneis de vento	As incertezas residem nas condições reais de voo
LTO EC	Aeropuerto de origen, modelo de aeronave y modelo de motor.	Baseado em modelagens e não em dados reais	As incertezas residem nas condições reais de voo. ICAO recomenda usar este método apenas como estimacão e não como comparativa com outros métodos
BADA	Condições atmosféricas e dados de voo coletados pela EUROCONTROL.	Baseado no consumo de combustível e FE adaptados a altitude e condições atmosféricas usando um método desenvolvido pela Boeing BFFM2 (The Boeing Fuel Flow Method 2)	Número extenso de aeronaves no banco de dados mas não completo. Acesso restrito, não disponível para o público. Aplicado para o cruzeiro.

Figura 14 – Metodologias para o cálculo de emissões

Fonte: Air Pollutant Emission Guidebook 2023

Cabe destacar que seguindo as metodologias descritas, geralmente as emissões de dióxido de carbono e o consumo de combustível são determinados com maior precisão do que os outros poluentes.

Com base na metodologia apresentada, o procedimento para este trabalho é delineado por meio de um fluxograma dividido em diversas fases, destacadas por cores distintas, e etapas, delimitadas por um quadro.

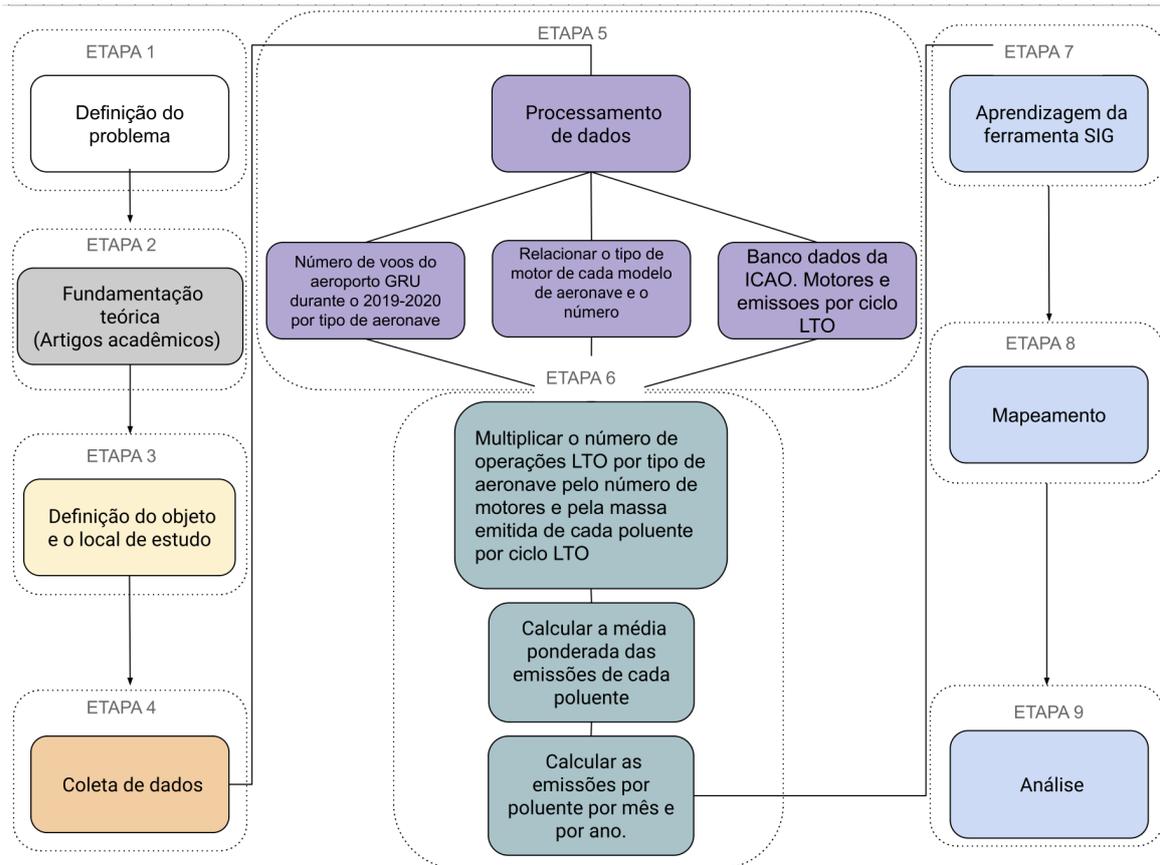


Figura 15 – Fluxograma da metodologia a seguir
Fonte: Autora

3.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A primeira etapa envolve a definição do problema a ser abordado no trabalho. Esse problema pode ser uma extensão de pesquisa acadêmica anterior, uma análise complementar para validar estudos anteriores com uma metodologia diferente, ou ainda, uma questão proposta pelo próprio autor. No presente trabalho, a problemática é escolhida com base no interesse específico do autor e também se fundamenta em outros trabalhos acadêmicos com objetivos semelhantes.

3.2 ETAPA 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A etapa 2 inicia-se pelo entendimento dos requisitos técnicos e literários do trabalho, seguindo as normativas recomendadas para trabalhos acadêmicos, obtidas no ambiente virtual da Universidade. Uma vez compreendida a estrutura do texto e as informações necessárias para o trabalho, bem como as citações apropriadas, procede-se à pesquisa de informações.

O embasamento teórico é desenvolvido integralmente online, com a busca de artigos e trabalhos disponíveis na internet. É crucial concentrar-se em estudos

relacionados, especialmente aqueles mais recentes. Trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado e teses de doutorado são de particular interesse.

Artigos científicos e estudos elaborados por instituições e empresas de renome no setor também são considerados fontes relevantes de informação complementar para compreender a temática. Priorizar fontes recentes é fundamental para evitar informações desatualizadas e inconsistentes. O objetivo é adquirir conhecimento sobre diferentes metodologias para o controle de emissões e possíveis métodos de análise. Por esse motivo foram tomados como base informações publicadas pelo próprio aeroporto de Guarulhos, órgãos públicos como a INFRAERO (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária), a ANAC, a ICAO e a EASA entre outras instituições aeronáuticas.

3.3 ETAPA 3: DEFINIÇÃO DO OBJETO E LOCAL DE ESTUDO

A etapa 3 consta da seleção do local de estudo, esta escolha é influenciada pelo interesse específico do autor ou pela disponibilidade de dados. Muitas vezes, a complexidade na obtenção das informações necessárias acaba direcionando o foco do projeto. No caso deste trabalho, a preferência pelo local de estudo baseia-se na relevância do mesmo para a região e também a nível nacional por número de operações

Outro fator relevante é a complexidade no processamento e na quantidade de dados. No estudo em questão, as informações necessárias consistem em: fator de emissão por tipo de modelo de motor; relação de modelo de aeronave com modelo de motor compatível; especificações dos modelos da frota; número de operações efetuadas por cada modelo.

3.4 ETAPA 4: COLETA DE DADOS

Após a seleção do local de estudo e a construção do embasamento teórico relevante, a etapa 4 envolve a coleta dos dados para sua posterior análise.

Após uma pesquisa detalhada sobre o assunto, identificaram-se as principais fontes disponíveis de informações. Uma limitação no momento da pesquisa é que cada companhia aérea mantém os dados detalhados dos voos de maneira confidencial, apenas disponibiliza informações selecionadas. Entidades públicas como a INFRAERO ou o Departamento de Controle de Tráfego Aéreo (DECEA) utiliza certas informações de voo para análises e avaliações internas, raramente são divulgadas.

Portanto, sendo que o acesso aos dados reais dos voos são restritos aos gerentes de tráfego, optou-se pelos dados publicados pelo Aeroporto de Guarulhos, estes não contam com informações em voo se não com outros elementos de interesse como a origem e o destino, o modelo de aeronave e a data e hora do voo. Os anos

de 2019 e 2020 foram selecionados como cenário de estudo para comparar um ano anterior à pandemia com a pandemia, uma vez que as operações aéreas durante 2021 e 2022 não conseguiram atingir os níveis de 2019.

Outras informações relevantes são as relações estabelecidas entre o modelo da aeronave e o tipo e modelo de motor que é compatível, bem como os fatores de emissão destes motores.

3.5 ETAPA 5: PROCESSAMENTO DE DADOS

Seguindo o fluxograma da Figura 15, o processamento de dados é fundamentado em 3 fontes de informação: Metadatos do conjunto de dados de movimentação aeroportuária publicados pela Agencia Nacional de Aviação Civil; Relação do modelo de aeronave com o tipo e modelo de motor habitual presente na guia Air Pollutant Emission Guidebook da European Environment Agency; Banco de dados das emissões de cada poluente por modelo de motor para ciclos LTO da ICAO, abreviado como AEED.

Os passos a seguir estão numerados a continuação:

1. A partir dos metadados publicados pela ANAC, que contêm todas as operações aéreas com origem ou destino nos aeroportos brasileiros, se procede à tabulação do número de decolagens e aterrissagens por tipo de aeronave ocorridas no aeroporto em estudo para cada um dos meses do 2019 e 2020.
2. Identificação dos tipos de motores compatíveis com cada modelo de aeronave obtido no passo anterior. Para isso, se consultam as páginas dos fabricantes de motores e aeronaves, onde é especificado o modelo de motor compatível com cada modelo de aeronave.
3. Com a equivalência de motor-aeronave estabelecida, se procede à consulta do fator de emissão de cada modelo de motor no banco de dados AEED. O valor de entrada é o código do motor, e os dados de saída incluem os fatores de emissão de HC (g), CO (g), NOx (g), Combustível queimado (Kg) e MP (mg) para os ciclos LTO.
4. Para as aeronaves que são compatíveis com mais de um modelo de motor, opta-se pela escolha da média de todas as versões de motores que fazem parte do mesmo modelo compatível com aquela aeronave. Para os cálculos devem ser consideradas unicamente as versões em uso, excluindo do estudo aquelas fora de uso ou com dados em revisão. Dessa forma, obtém-se a média dos fatores de emissão de todos os motores compatíveis.
5. Quantificação do número de motores empregados em cada aeronave. O banco de dados AEED expressa as emissões por cada unidade de motor, portanto, para contabilizar as emissões de uma aeronave é preciso multiplicar o número

de motores da mesma pelos fatores de emissão do banco de dados. O resultado são os fatores de emissão totais da aeronave.

3.6 ETAPA 6: CÁLCULOS DE EMISSÕES

Esta etapa inicia-se com os fatores de emissão de cada aeronave e com o número de operações efetuadas por cada aeronave. Os passos a seguir são detalhados no seguinte fluxograma da Figura 16.

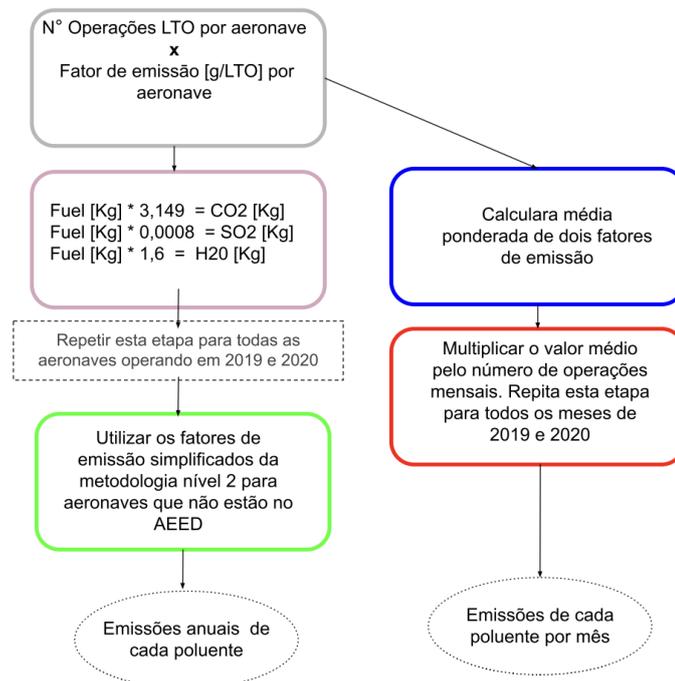


Figura 16 – Fluxograma da metodologia de cálculo
Fonte: Elaboração própria

- O número total de operações LTO realizado por cada aeronave é multiplicado pelo fator de emissão de 1 ciclo LTO de cada aeronave. Desta forma obtem-se as quantidades emitidas de cada poluente por cada aeronave para o número total de operações LTO realizadas. O resultado é a quantidade de poluentes emitidos por cada aeronave durante o período do 2019 e 2020.
- As emissões de CO₂, SO₂ e H₂O não aparecem no banco de dados da ICAO. Seguindo o guia da EEA, as emissões destes poluentes dependem da massa de combustível queimada. O guia oferece varias alternativas para estimar as emissões de estes poluentes. No presente trabalho foi utilizado um método proposto pelo guia, que consiste na multiplicação da massa de combustível empregada nas etapas LTO pelo fator 3,149 para o CO₂, 0,0008 para o SO₂, e 1,6 para o H₂O.
- Tem aeronaves cujos motores não estão na base de dados da ICAO, em estos casos se aplicou a metodologia nível 2. Esta propõe aplicar fatores de emissão

simplificados de cada modelo de aeronave. Estes fatores encontram-se definidos numa tabela no guia. É ressaltado que este método não considera o tipo de motor da aeronave, portanto os resultados podem ser menos confiáveis aos do banco de dados AEED.

- Cálculo da média ponderada dos fatores de emissão de todas as aeronaves que operaram durante o 2019 e o 2020.
- Cálculo das emissões de poluentes por mês. Isto é feito multiplicando a média ponderada do fator de emissão obtida no passo anterior pelo número de operações totais por mês.

3.7 ETAPA 7: APRENDIZAGEM DA FERRAMENTA QGIS

Esta etapa compreende o estudo teórico e prático da ferramenta SIG. Para este trabalho, é requerido aprender a importar mapas, os dois mapas base utilizados são o mapa satélite do Google maps, e os mapas dos municípios de Guarulhos e do aeroporto encontrados no software GUARUGEO.

3.8 ETAPA 8: MAPEAMENTO

Na presente etapa busca-se espacializar os resultados obtidos na Etapa 7, para definir onde os poluentes são emitidos e determinar possíveis zonas de concentração de poluentes.

Para realizar o mapeamento dos poluentes sobre o Aeroporto de Guarulhos, seria necessário combinar os resultados da etapa 7 com informações meteorológicas, a fim de determinar o impacto real das emissões de poluentes na qualidade do ar local. Devido à falta desses dados e dos softwares necessários para realizar a dispersão de poluentes, opta-se por uma abordagem mais simplificada, que consiste em representar o potencial de concentração de emissões sobre as pistas do aeroporto por meio da ferramenta QGIS.

Os cálculos realizados na etapa 7 não podem ser utilizados para serem representados em um mapa, uma vez que seriam baseados em um cenário irreal. Os poluentes sofrem dispersão ao longo do tempo, eles não permanecem acumulados no mesmo ponto em que foram emitidos. Por esse motivo, optou-se por representar as emissões acumuladas durante o período de 1 hora de operação. Considera-se que esse é um tempo relativamente aceitável para consideração, embora isso seja uma premissa.

Para determinar quantas operações são realizadas por hora e quais aeronaves estão em operação, optou-se por realizar um acompanhamento ao vivo das operações do aeroporto. As medições ocorreram em 24 de novembro de 2023, entre 13h e 14h.

O acompanhamento foi realizado por meio da ferramenta Flight Radar, este software combina dados de várias fontes, incluindo ADS-B, MLAT e dados de radar. Os dados ADS-B, MLAT e de radar contêm informações sobre a identidade da aeronave e sua posição, sendo agregados junto com dados de horários e status de voos de companhias aéreas e aeroportos para um rastreamento mais detalhado.

Ao mesmo tempo em que são contabilizadas as operações por modelo da aeronave, é realizado o acompanhamento do percurso que cada aeronave segue ao chegar ou sair do aeroporto. No caso de um pouso, o trajeto compreende o percurso da aeronave desde o momento em que pousa até chegar ao pátio de aeronaves. No caso da decolagem, o trajeto abrange o percurso desde que a aeronave deixa o pátio de aeronaves até ocorrer a decolagem.

Uma vez que as rotas em solo seguidas pelas aeronaves são determinadas, são realizados os cálculos das emissões para cada segmento. Para isso, foram obtidas as emissões das aeronaves que operaram durante esse período em um software disponibilizado pelo guia, que fornece os fatores de emissão por unidade de tempo.

Os passos subsequentes estão numerados a seguir:

1. Determinar as velocidades médias utilizadas pelas aeronaves nas pistas de decolagem, pouso e taxiamento.
2. Determinar as distâncias de cada trajeto.
3. Determinar o tempo utilizado para percorrer cada trajeto.
4. Multiplicar o tempo necessário para percorrer cada trajeto pelas emissões por segundo. Este passo deve ser repetido para todos os trajetos identificados e para todas as aeronaves que percorrem esses trajetos.
5. Somar as emissões que cada aeronave emite ao passar por cada trajeto, para obter as emissões totais de cada trajeto.
6. Representar as emissões por trajeto no QGIS.

Para realizar o passo 6, e com os mapas-base já incorporados, é projetada uma camada com elementos polilinha de acordo com o trajeto seguido pelas aeronaves em solo. Cada segmento terá um valor geográfico e um valor de emissão atribuído, que será o resultado do passo 5. Dessa forma, na tabela de atributos, deve constar a identificação ID do segmento e a quantidade de poluentes correspondente.

Uma vez que as informações do trajeto e as emissões correspondentes foram incorporadas, é possível obter um mapa de potencial de concentração de poluentes para o cenário definido de 1h de operação.

3.9 ETAPA 9: ANÁLISE DE RESULTADOS

É possível analisar os resultados de emissões por ciclo LTO para determinar se alguma etapa é mais prejudicial que outra em relação a quantidade de poluentes e

se todos os poluentes são emitidos em igual medida para todas as etapas do ciclo LTO.

Com os resultados obtidos é possível determinar quais aeronaves são potencialmente mais poluentes do que outras e, portanto, cujo uso deveria ser limitado. Nessa análise, é importante diferenciar as emissões totais da aeronave e as emissões por passageiro.

4 ESTUDO DE CASO: AEROPORTO DE GUARULHOS

A estrutura desta seção manterá coerência com o capítulo anterior, apresentando a seguir os resultados de forma mais detalhada

4.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A problemática abordada no presente trabalho reside na determinação da quantidade de poluentes emitidos pelas aeronaves durante as operações LTO, bem como na sua geolocalização.

Adicionalmente, não há registros da qualidade do ar nas imediações dos aeroportos brasileiros, por esse motivo é importante determinar a quantidade de poluentes emitidos no local e espacializá-los, a fim de identificar zonas de concentração de poluentes.

Analogamente aos mapas de ruído, nos quais as curvas são delineadas no mapa, proporcionando a identificação das áreas afetadas e da população impactada, a criação de um mapa contendo as curvas de poluição é necessário para identificação de áreas de risco.

4.2 ETAPA 2: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica deste estudo é baseada na análise de normativas da ICAO, dados públicos fornecidos pela ANAC e revisão de trabalhos similares. Contudo, não foram identificadas investigações que realizem o cálculo das emissões em Guarulhos e que também apresentem a espacialização dos resultados. Foram encontrados estudos que realizam o cálculo de emissões para os ciclos LTO em outros aeroportos, em poucos casos incluindo a espacialização dos poluentes.

4.3 ETAPA 3: DEFINIÇÃO DO OBJETO E LOCAL DE ESTUDO

Na seleção de um local para a realização deste estudo, optou-se por escolher uma cidade onde as emissões de gases apresentam relevância significativa. Nesse contexto, São Paulo, a metrópole mais populosa do Brasil, surge como uma escolha natural. A capital paulista enfrenta desafios relacionados à qualidade do ar, visto que a crescente concentração de poluentes torna-se cada vez mais prejudicial tanto para a saúde da população quanto para a degradação ambiental na região (PREFEITURA DE SP, 2020).

Como muitas cidades do mundo, São Paulo tem empreendido iniciativas de descarbonização com o propósito de mitigar as emissões de gases de efeito estufa

e enfrentar os desafios das mudanças climáticas. Essas ações incluem a promoção do transporte público, o estímulo ao uso de energias renováveis e a implementação de programas voltados para a arborização urbana, entre outras estratégias (PREFEITURA DE SP, 2020).

O estado de São Paulo dispõe de 11 estações de monitoramento da qualidade do ar, duas delas, localizadas nos distritos de Paços e Pimentas, no município de Guarulhos. Seguindo informações aportadas pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), as duas estações apontaram que o material particulado e o dióxido de nitrogênio foram superiores ao recomendado durante o 2019 e também durante a pandemia (RGH, 2022).

Estas estações de Guarulhos encontram-se distantes das imediações aeroportuárias, dessa forma, não há registros da qualidade do ar nas proximidades do Aeroporto. Em virtude dessa lacuna, torna-se relevante conduzir estudos que calculem a quantidade de poluentes emitidos, a fim de identificar as áreas mais impactadas e avaliar os potenciais riscos à saúde da população nessas regiões (CETESB, 2023).

Esses fundamentos justificaram a seleção do Aeroporto de Guarulhos como objeto de estudo. A Figura 17 representa a área de pesquisa no mapa do Brasil, destacando inicialmente o município de Guarulhos em preto, seguido pela identificação do aeroporto em amarelo dentro do contexto municipal.

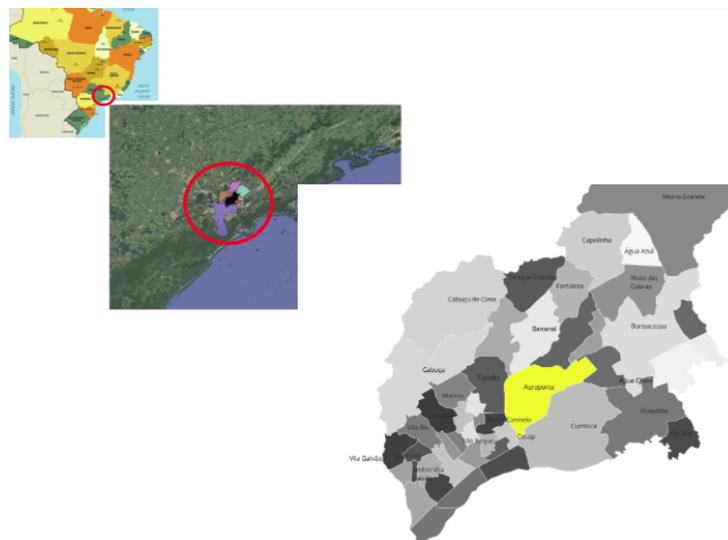


Figura 17 – Localização do GRU Airport
Autora

O hub GRU Airport movimentou 43 milhões de passageiros em 2019, enfrentou um declínio para 24 milhões durante a pandemia de COVID-19, atingiu 34 milhões em 2022 e durante os nove primeiros meses do 2024 o aeroporto movimentou 30 milhões, registrando um aumento de um 22% comparação com o 2022. A Figura 18 apresenta os 112 destinos que o Aeroporto de Guarulhos conecta, dos quais 52 são

internacionais e 60 nacionais. Os 52 destinos nacionais representam 68% do total de operações (GRU AIRPORT, 2023b).

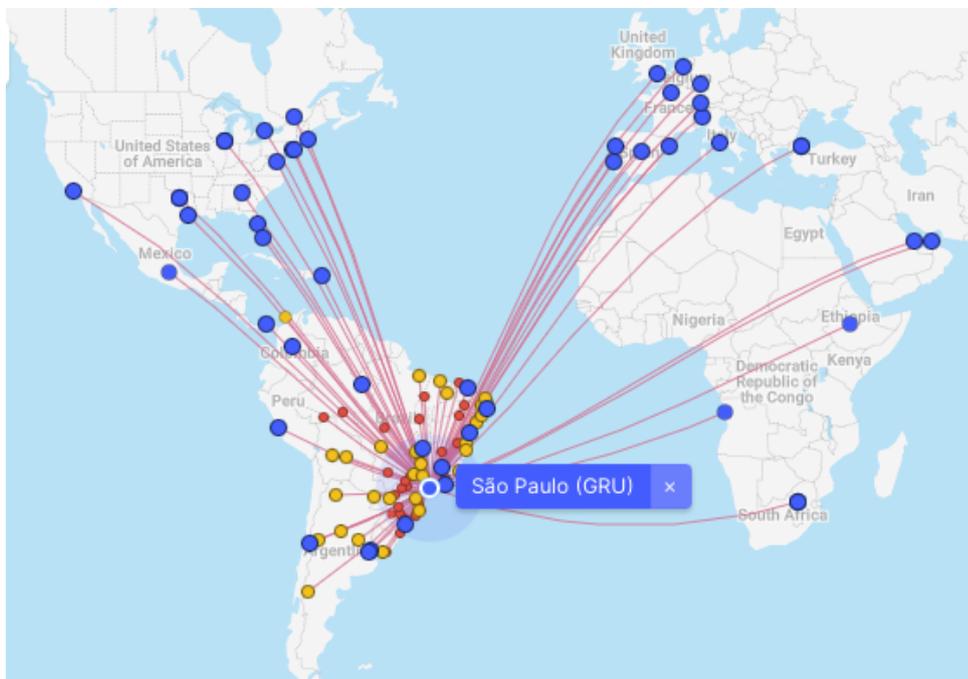


Figura 18 – Conexões do GRU Airport
(FLIGHT CONNECTIONS, 2023)

O GRU Airport tem duas pistas com extensão superior a 2.100 metros, sendo capazes de atender todas as aeronaves comerciais, incluindo as de maior porte, como o 747-800 e o A380 (GRU AIRPORT, 2023a). As duas pistas são as seguintes:

- Com 3.700 metros de comprimento, é a pista de maior extensão do aeroporto, homologada para pousos e decolagens das maiores aeronaves comerciais (A380, B747-800 e o Antonov). Esta pista está representada na Figura 19 e é identificada pelo número 1.
- Com 3.000 metros de comprimento, é utilizada para pousos e decolagens de aeronaves de diversos tamanhos, com exceção das aeronaves de grande porte. Esta pista está representada na Figura 19 e é identificada pelo número 2.

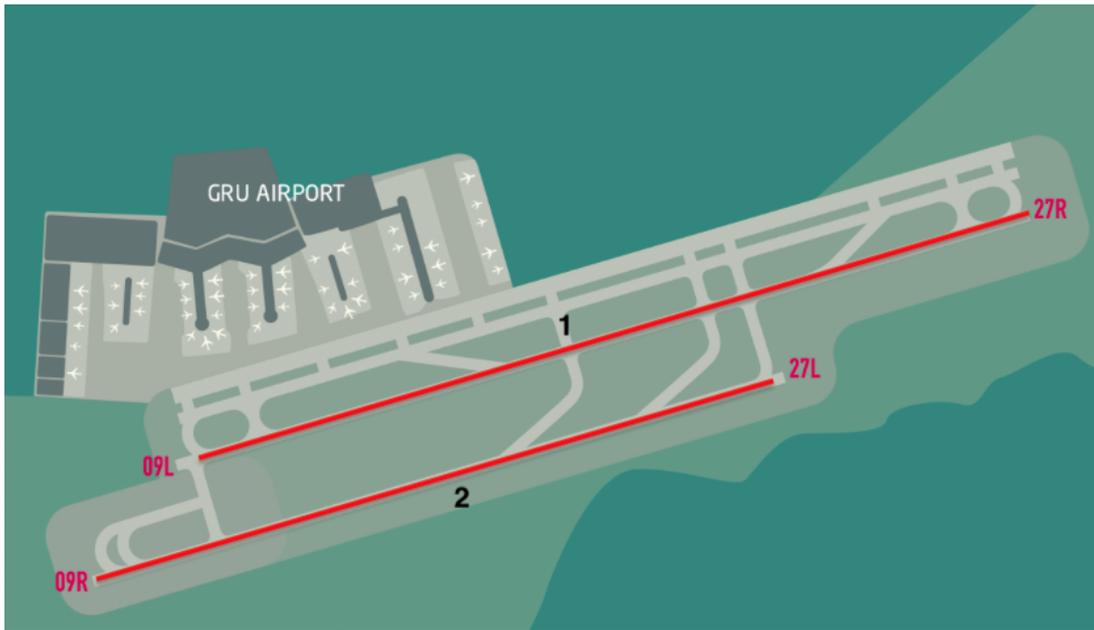
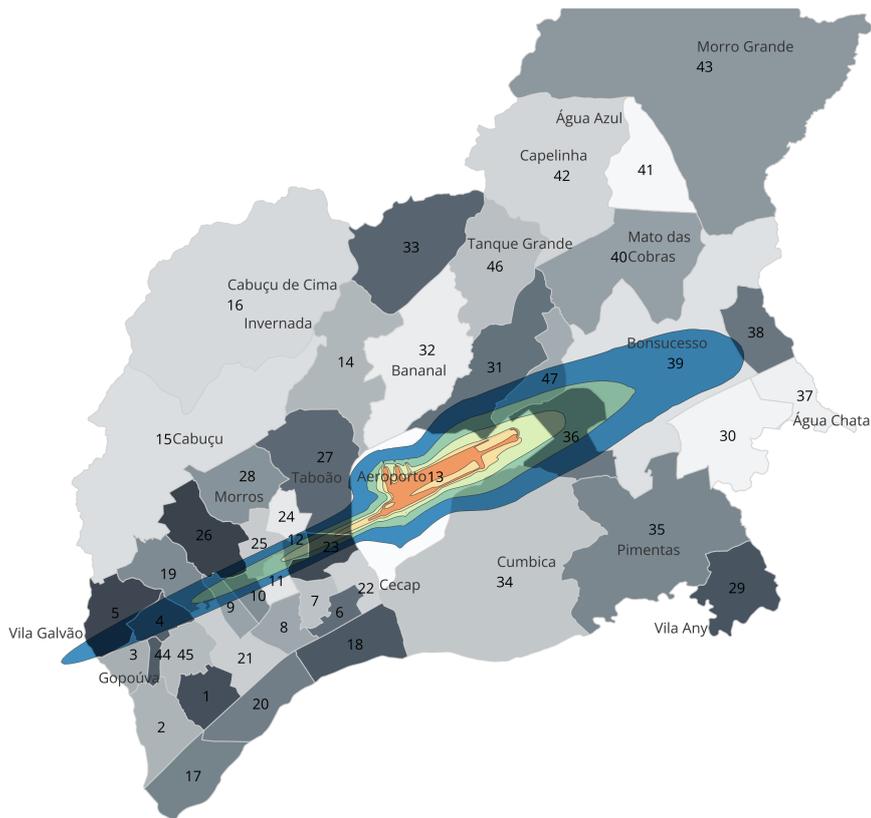


Figura 19 – Pistas 09L/27R, 09R/78L
Fonte: Autora com base nas informações do site GRU Airport

As áreas circunvizinhas ao GRU Airport são densamente habitadas, o que acentua a relevância do problema. As emissões diárias acabam impactando diretamente as comunidades vizinhas. O mapa 1 ilustra a densidade demográfica dos bairros afetados pelas curvas de ruído como resultado das decolagens e pousos das aeronaves (PREFEITURA DE SP, 2020).

É crucial que o município realize medições da qualidade do ar nos bairros próximos para evitar exceder os limites diários estabelecidos estabelecidos pela OMS.



Mapa 1 - Densidade demográfica dos bairros mais afetados pelas operações LTO do aeroporto GRU Fonte: Autora

4.4 ETAPA 4: COLETA DE DADOS

Os dados base consistem em informações divulgadas por agências e organizações responsáveis da aviação, conforme delineado na metodologia. Os dados de interesse são abordados em detalhe no decorrer da presente etapa, concretamente são: Metadados de movimentação aeroportuária, banco de dados AEED da ICAO; Tabelas de equivalência de fatores de emissão simplificados.

4.4.1 Metadados de movimentação aeroportuária

A Agência Nacional de Aviação Civil disponibiliza informações abrangentes sobre diversos aeroportos do Brasil, incluindo dados relacionados ao número de operações, origem e destino de cada voo, bem como o tipo de aeronave envolvida. No contexto deste estudo, foram selecionadas informações de particular interesse referentes às operações no Aeroporto de Guarulhos nos anos de 2019 e 2020. A Figura 20 apresenta um trecho de uma das tabelas publicadas, em amarelo estão ressaltadas as informações de interesse: Ano; mês; Aeroporto de referência; Tipo de aeronave (ANAC, 2023).

Atualizado em: 2021-10-05										
ANO	MES	AEROPORTO REF	MARCA_AERONA	TIPO_AERONA	NR_AERONA	OUTRO AEROP	NR_VOO	DT_PREVISTO	HH_PREVISTO	DT_CALCO
2019	1	SBGR	ZPCRJ	CRJ2	AZP	SGAS	836	2019-01-16	15:35:00	2019-01-16
2019	1	SBGR	ZPCRJ	CRJ2	AZP	SGAS	837	2019-01-16	16:35:00	2019-01-16
2019	1	SBGR	ZPCRR	CRJ2	AZP	SGAS	836	2019-01-14	15:35:00	2019-01-14
2019	1	SBGR	ZPCRR	CRJ2	AZP	SGAS	837	2019-01-14	16:35:00	2019-01-14
2019	1	SBGR	ZPCRR	CRJ2	AZP	SGAS	836	2019-01-13	12:35:00	2019-01-13
2019	1	SBGR	ZPCRR	CRJ2	AZP	SGAS	837	2019-01-13	13:35:00	2019-01-13
2019	1	SBGR	ZPCRS	CRJ2	AZP	SGAS	836	2019-01-09	15:35:00	2019-01-09

Figura 20 – Fragmento das movimentações durante janeiro 2019 (ANAC, 2023)

4.4.2 Banco de dados AEED para ciclos LTO da ICAO

O banco de dados de emissões dos motores de aviação, disponibilizado pela ICAO, teve sua última atualização em junho de 2023. Conforme explicado na metodologia, os dados publicados baseiam-se em ciclos idealizados de pouso e decolagem, utilizando as condições da Atmosfera Padrão Internacional (ISA).

A Figura 8 ilustra as etapas padrão LTO da ICAO. As fases de voo acima dos 915 metros devem ser analisadas com uma metodologia distinta.

Dentre as informações extraídas desse abrangente banco de dados, destacam-se:

- HC LTO Total mass (g)
- CO LTO Total mass (g)
- NOX LTO Total mass (g)
- Fuel (Kg). Massa de combustível utilizada.
- nvPM LTO Total Mass (mg). Material particulado não volátil.

A Tabela da Figura 21 apresenta parte dos dados disponíveis na base de dados AEED.

Manufacturer	Engine Identification	HC LTO Total mass (g)	CO EI T/O (g/kg)	CO EI App (g/kg)	CO LTO Total Mass (g)
Aviadvigatel	PS-90A	470	0.41	1.2	4216
Aviadvigatel	PS-90A1	241	0.38	1.07	3739
Aviadvigatel	PS-90A2	820	0.44	1.91	4825
Rolls-Royce Deutschland	BR700-710A1-10	279	0.52	4.24	3913
Rolls-Royce Deutschland	BR700-710A1-10	156	1.04	4.78	4212
Rolls-Royce Deutschland	BR700-710A2-20	160	1.04	4.81	4239
Rolls-Royce Deutschland	BR700-710C4-11	301	1.04	4.92	4449
Rolls-Royce Deutschland	BR700-715A1-30	34	0.78	3.76	2753
Rolls-Royce Deutschland	BR700-715A1-30	25	0.66	4.05	3390
Rolls-Royce Deutschland	BR700-715B1-30	27	0.78	3.38	2693
Rolls-Royce Deutschland	BR700-715B1-30	20	0.72	3.59	3300
Rolls-Royce Deutschland	BR700-715C1-30	22	0.75	3.06	2655
Rolls-Royce Deutschland	BR700-715C1-30	18	0.8	3.23	3236
Rolls-Royce Deutschland	BR700-725A1-12	398	0.4	5.93	5899
Rolls-Royce Deutschland	BR700-710D5-21	265	0.32	2.84	4533

Figura 21 – Fragmento da tabela com as emissões por poluente por modelo de motor (EASA, 2023)

4.4.3 Emissões de poluentes por tipo de Aeronave

A base de dados representada na Figura 21 é extensa, no entanto, há aeronaves cujos motores não aparecem. Nestes casos, opta-se por seguir as orientações do guia e aplicar a metodologia nível 2. Nesse contexto, sugere-se a utilização de fatores de emissão simplificados disponibilizados no anexo do guia.

A lista publicada inclui as aeronaves e as configurações de sistema propulsivo mais comuns, fornecendo informações sobre o fator de emissão para cada poluentes. Isso viabiliza a obtenção das emissões de poluentes para as aeronaves cujos motores não constam na base de dados. Um fragmento dos índices simplificados do anexo é ilustrado na Figura 22.

A figura 22 relaciona as aeronaves diretamente com os fatores de emissão sem a necessidade de conhecer o modelo e número de motores utilizados. Com esta metodologia se obtém os fatores de emissão do CO₂, HC, NO_x, SO₂, MP e o consumo de combustível em unidades Kg/LTO/aeronave. Contudo, é importante ressaltar que o guia adverte que esses índices são simplificados e não devem ser empregados quando há informações mais detalhadas disponíveis, sendo preferível a utilização da base de dados AEED. A tabela completa pode se consultar no Apêndice-B.

Aeronave ¹		Factores de emisión LTO/avión (kg/LTO/aeronave y #LTO/aeronave) ²							Consumo de combustible (kg/LTO/aeronave)
		CO ₂ ³	HC	NO _x	CO	SO ₂ ⁴	tPM _{mass}	nvPM _{number}	
	767-200	4 622	3,32	23,76	14,80	0,73	0,18	1,04E+18	1 463
	767-300	5 608	1,19	28,19	14,47	0,89	0,17	1,68E+18	1 775
	767-400	5 522	0,98	24,80	12,37	0,87	0,13	3,74E+17	1 748
	777-200/300	7 197	1,35	37,47	16,60	1,14	0,18	1,14E+18	2 277
	787-8	5 468	0,24	28,75	10,34	0,87	0,12	1,15E+18	1 730
	CS 100/A220-100	1 890	0,06	8,25	3,44	0,30	0,05	5,34E+17	598
	CS 300/A220-300	1 890	0,06	8,25	3,44	0,30	0,05	5,34E+17	598
	EMB170	1 589	0,04	4,84	4,05	0,25	0,03	1,01E+17	503
	EMB190	2 059	1,14	6,43	12,13	0,33	0,06	1,87E+17	652
	DC-10	7 287	2,37	35,65	20,59	1,15	0,24	1,26E+18	2 306
	DC-8-50/60/70	5 357	1,51	15,62	26,31	0,85	0,14	1,46E+18	1 695
	DC-9	2 646	4,63	6,16	16,29	0,42	0,29	6,18E+18	837
Grandes aeronaves comerciales ⁵ Fuente: OACI (2018) ⁶ ICCAIA (2014) ICCAIA (2018)	MD-11	7 287	2,37	35,65	20,59	1,15	0,24	1,26E+18	2 306
	MD-80	3 184	1,87	11,97	6,46	0,50	0,27	5,76E+18	1 008
	MD-90	2 759	0,06	10,76	5,53	0,44	0,26	5,93E+18	873
	TU-134	2 931	17,98	8,68	27,98	0,46	0,66	1,24E+19	928
	TU-154-M	5 959	13,17	12,00	82,88	0,94	1,11	2,96E+19	1 886
	TU-154-B	7 030	119,03	14,33	143,05	1,11	1,58	1,96E+19	2 225

Figura 22 – Índices simplificados de emissão das aeronaves (IPCC, 2023)

A tabela apresentada anteriormente não engloba todos os modelos de aeronaves. Nos casos em que o modelo específico do motor não está disponível na AEED

nem na tabela de índices simplificados, recorre-se à metodologia nível 1, conforme recomendado pelo guia. Esta abordagem é mais genérica do que as anteriores e é aplicada quando informações essenciais, como a origem e o destino do voo, e o modelo da aeronave, não estão disponíveis. A incerteza nos resultados é significativa devido à utilização de frotas genéricas simplificadas, por esse motivo só é recomendado utilizar os fatores de emissão da Figura 23 quando não há outra alternativa com base nas informações disponíveis.

As categorias de frotas consideradas por essa metodologia podem ser identificadas na tabela apresentada na Figura 23.

DEFAULT FUEL USE AND EMISSION FACTORS FOR AVERAGE AIRCRAFT FOR LTO CYCLE AND CRUISE								
Domestic	Fuel	SO₂	CO	CO₂	NO_x	NMVOCS	CH₄	N₂O
LTO (kg/LTO) - Average fleet	850	0.8	8.1	2680	10.2	2.6	0.3	0.1
LTO (kg/LTO) - Old fleet	1000	1.0	17	3150	9.0	3.7	0.4	0.1
Cruise (kg/ton)		1.0	7	3150	11	0.7	0	0.1
International	Fuel	SO₂	CO	CO₂	NO_x	NMVOCS	CH₄	N₂O
LTO (kg/LTO) - Average fleet	2500	2.5	50	7900	41	15	1.5	0.2
LTO (kg/LTO) - Old fleet	2400	2.4	101	7560	23.6	66	7	0.2
Cruise (kg/ton)		1.0	5	3150	17	2.7	0	0.1

Figura 23 – Fatores de emissão genéricos (IPCC, 2023)

4.5 ETAPA 5: PROCESSAMENTO DE DADOS

Nesta etapa, parte-se das três fontes principais de informações detalhadas na etapa 4 (Metadados de operações aeroportuárias; Banco de dados AEED; Índices simplificados) para realizar o seu tratamento. Serão selecionadas e filtradas as informações necessárias para o desenvolvimento do presente trabalho.

4.5.1 Filtragem do arquivo: metadados das movimentações aeroportuárias

Os metadados das movimentações aeroportuárias, publicados pela ANAC, passam por um processo de filtragem, em que a base de dados original é tratada até a criação de uma base refinada contendo apenas as informações de interesse. Para realizar esse procedimento, foi implementado um código em Python, conforme ilustrado nas imagens 'a' e 'b' da Figura 24.

O código carrega os dados de cada arquivo Excel, correspondente a cada mês, em um DataFrame. Posteriormente, esses DataFrames são unificados em um único DataFrame e, por fim, são salvos em um novo arquivo Excel contendo as operações totais de 2019 e 2020, conforme representado na imagem 'a' da Figura 24.

A seleção das linhas que contêm a palavra "SBGR" e a eliminação das que não a contêm são realizadas utilizando a função `pandas.DataFrame.loc` em conjunto com o método `str.contains()`, conforme mostrado na imagem 'b' da Figura 24. Em seguida, as linhas do arquivo que possuem o mesmo valor na coluna "Aeronave" e os valores da coluna "Operações" são agregados utilizando a função `pandas.DataFrame.groupby` com o método `agg`. Após o tratamento dos dados, é possível apresentar um resumo anual das operações em Guarulhos durante os anos de 2019 e 2020, agrupados por tipo de aeronave.

```
import pandas as pd
import os

# Directorio donde se encuentran los archivos
dir_path = "/downloads"

# Lista de los nombres de los archivos Excel que quieres cargar
file_names = ["Operacoes-Janeiro.xlsx", "Operacoes-Fevereiro.xlsx", "Operacoes-Março.xlsx"]

# Lista de los DataFrames de cada archivo
dfs = []

# Cargar cada archivo en un DataFrame y añadirlo a la lista de DataFrames
for file_name in file_names:
    file_path = os.path.join(dir_path, file_name)
    df = pd.read_excel(file_path)
    dfs.append(df)

# Concatenar los DataFrames en uno solo
df_merged = pd.concat(dfs)

# Guardar el DataFrame unido en un nuevo archivo Excel
output_file = "Operacoes-GRU-2019.xlsx"
df_merged.to_excel(output_file, index=False)
```

(a) Código Python para unificar as informações

```
import pandas as pd

# Ler o arquivo Excel com o pandas
df = pd.read_excel("Operacoes-GRU-2019.xlsx")

# Selecionar as linhas que contêm a palavra "SBGR"
df_sbgr = df.loc[df["Aeroporto Origem/Destino"].str.contains("SBGR")]

# Excluir as linhas que não contêm a palavra "SBGR"
df_not_sbgr = df.loc[~df["Aeroporto Origem/Destino"].str.contains("SBGR")]

# Imprimir o número de linhas selecionadas
print(f"Linhas com SBGR: {len(df_sbgr)}")
print(f"Linhas sem SBGR: {len(df_not_sbgr)}")

# Ler o arquivo Excel com o pandas
df = pd.read_excel("Operacoes-GRU-2019.xlsx")

# Agrupar as linhas pelo valor da coluna "Aeronave" e somar os valores da coluna "Operações"
df_grouped = df.groupby("Aeronave").agg({"Operações": "sum"})

# Imprimir o DataFrame resultante
print(df_grouped)
```

(b) Código Python para filtrar dados do aeroporto GRU e para agrupar os dados filtrados por tipo de aeronave

Figura 24 – Código Python para tratamento de dados

Fonte: Autora

Como resultado se consegue chegar às movimentações totais por cada aeronave durante os períodos do 2019 e 2020 sendo o aeroporto de referência SBGR, GRU Airport. Um fragmento dos resultados é ilustrado na Figura 25, onde constam as 30 aeronaves mais utilizadas em ambos períodos.

2019		2020	
AERONAVE	OPERAÇÕES	AERONAVE	OPERAÇÕES
A320	81277	B738	42635
B738	65672	A320	35455
A321	43913	A321	16021
B737	16347	B737	10222
E195	14415	A319	9212
A319	8306	B763	6165
B77W	6673	E195	5462
B763	6340	B77W	3586
E190	4621	B734	3262
B734	4525	A20N	2649
B772	3427	E190	2141
AT72	2985	B789	1689
B76W	2192	B722	1511
A332	2108	B733	1484
B733	2073	AT72	1449
A20N	2068	A359	1095
B788	1917	B788	891
A359	1907	B772	863
B789	1689	B77L	734
B722	1580	B38M	712
A109	1274	BE20	683
AS50	890	C208	589
PAT4	793	A339	580
B77L	695	PAT4	541
E55P	615	A333	482
A318	582	A332	359
BE30	522	B748	348
B748	504	E110	300

Figura 25 – Movimentações por aeronave durante o 2019 e 2020 em SBGR
Fonte: Autora

Agrupando o número de operações por tipo de aeronave se determina aquelas que causam o maior impacto em termos de emissões de poluentes. Durante o 2019 foram identificadas 180 modelos diferentes de aeronaves em operação e 140 durante o 2020. A figura 26 confronta os resultados do 2019 e 2020. Em azul estão representadas as aeronaves mais utilizadas no 2019, a primeira é o A320, com um pouco mais de 81.000 operações, seguido pelo B738, com cerca de 65.000 operações. As 10 aeronaves ilustradas no gráfico abrangem 86,33% do total de operações no ano de 2019, os 13,67% restantes estão distribuídos em 170 aeronaves diferentes.

As colunas em amarelo representam as aeronaves com maior número de operações durante o 2020. Estas 10 aeronaves compõem o 86,37% das operações aéreas durante o 2020, o 13,63% restante é composto por outros 131 modelos. Pode se perceber que os modelos de aeronave mais utilizadas coincidem para ambos períodos, são os modelos B738, A320, A321, B737, A319, E195, B763, B77W e o B734.

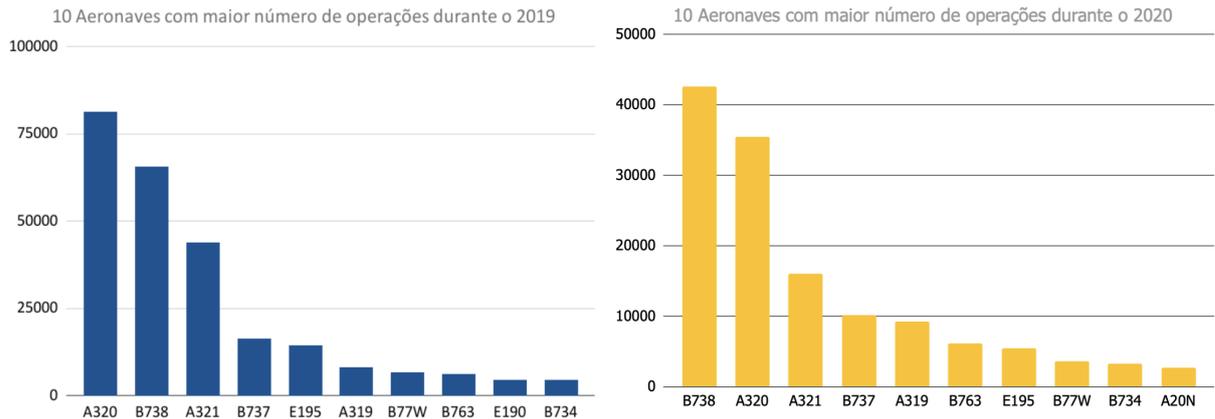


Figura 26 – 10 aeronaves mais utilizadas durante o 2019 e 2020

Fonte: Autora

Direcionando o foco para o número total de operações, durante a pandemia houve uma redução excepcional no número de operações de 47% , o que significa que Guarulhos atendeu 155.910 voos, aproximadamente metade do volume de voos em comparação com o período anterior à pandemia.

A linha vermelha da figura 27, representa as operações do 2020, é visível a queda acentuada no número de voos durante o mês de março respeito ao 2019, representado em azul, este descenso abrupto coincide com a declaração do estado de emergência no Brasil e a implementação de medidas para conter a propagação da COVID-19. Em março, houve uma redução de 86% no número de voos em comparação com 2019. Ao longo do ano, o número de operações começou a aumentar gradualmente, mas não se alcançaram as mesmas cifras.

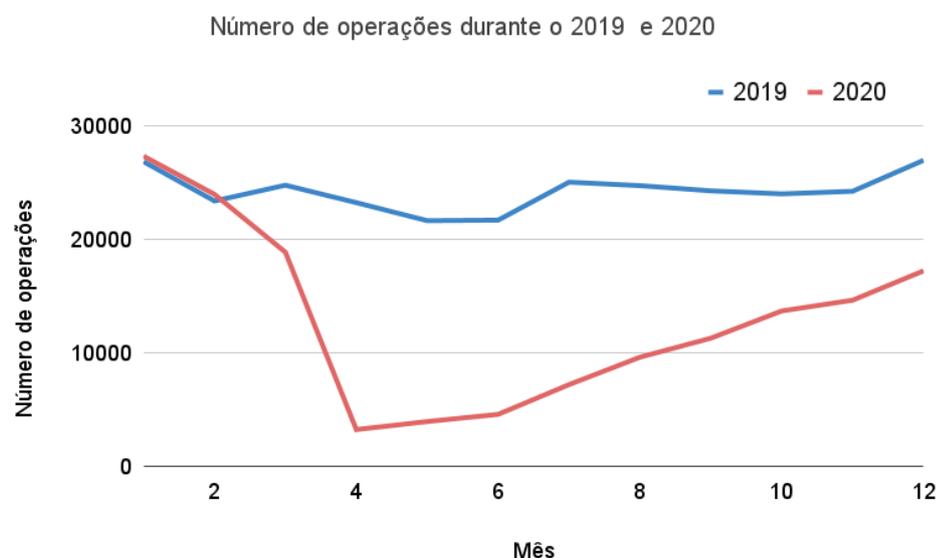


Figura 27 – Número de operações durante o 2019 e 2020

Fonte: Autora

4.5.2 Relação do modelo de aeronave com o motor compatível

Partindo da lista de aeronaves que operam em Guairlhos nos períodos de 2019 e 2020, se deve confrontar cada modelo de aeronave com o/s modelo/s de motor compatíveis, para tal fim são consultadas as páginas web de cada fabricante. O resultado deste levantamento possibilitou a construção da tabela ressaltada em vermelho na Figura 27, que estabelece a relação entre o modelo da aeronave, o número de motores associados e os motores utilizados. Em alguns casos, um mesmo modelo de aeronave é compatível com mais de um tipo de motor, como o A320, que pode utilizar tanto o modelo V2500-A5 como o CFM56-5B. Este passo é feito para os 180 modelos do 2019 e os 140 do 2020.

AERONAVE			
2019	2020		
A320	B738		
B738	A320		
A321	A321		
B737	B737		
E195	A319		
A319	B763		
B77W	E195		
B763	B77W		
E190	B734		
B734	A20N		
B772	E190		
AT72	B789		
B76W	B722		
A332	B733		
B733	AT72		
A20N	A359		
B788	B788		
A359	B772		
B789	B77L		
B722	B38M		
A109	BE20		
AS50	C208		
PAT4	A339		
B77L	PAT4		
E55P	A333		
A318	A332		
BE30	B748		
B748	E110		

Aeronave	N Motores	Modelo do motor	Modelo do motor
A320	2	V2500-A5	CFM56-5B
B738	2	CFMI CFM56-	
A321	2	V2500-A5	
B737	2	CFM56-7B24	
E195	2	CF34-10E	
A319	2	V2500-A5	CFM56-5B
B77W	2	GE90-115B	
B763	2	CF6-800C2B7F	PW4062
E190	2	GE CF34-10E	
B734	2	CFM56-3B2	CFM56-3C
B772	2	PW JT8D	
AT72	2	PW100	
B76W	2	JT9D	
A332	2	PW4164/4168/416	RR Trent 700
B733	2	CFM56-3B1	
A20N	2	PW1000G	CFMLEAP-X
B788	2	GEEnx-1B64,67, 70	RR Trent1000
A359	2	Trent XWB	
B789	2	GEEnx-1B	R-R Trent 1000

Figura 28 – Relação de modelo de aeronave com modelo de motor compatível
Fonte: Autora

4.5.3 Relação Aeronave-Motor-Fator de Emissão

Uma vez conhecidos os modelos de aeronaves que operam no aeroporto e estabelecida a relação aeronave-motor compatível, seguindo as informações disponíveis nos sites dos fabricantes, procede-se à identificação da relação de cada modelo de motor com o correspondente fator de emissão. Esse procedimento envolve a pesquisa de cada código de motor no banco de dados da AEED. Nos casos em que uma mesma aeronave é compatível com mais de um modelo de motor, é calculada a média das emissões de todos os modelos compatíveis.

As Figuras 29 e 30 ilustram um fragmento dos fatores de emissão por ciclo LTO associados a cada modelo de aeronave para os anos de 2019 e 2020, respectivamente. Conforme mencionado, o banco de dados AEED não fornece informações sobre os fatores de emissão do CO₂, SO₂ e H₂O, o próprio guia sugere a multipli-

cação do combustível queimado pelos fatores 3,149, 0,0008 e 1,23, para obter como resultado os Kg/LTO do CO₂, SO₂ e H₂O respectivamente.

Aeronave	HC (Ton)	CO (Ton)	NOx (Ton)	Fuel (Ton)	MP (Ton)	CO ₂ (Ton)	H ₂ O (Ton)	SO ₂ (Ton)
A320	4,877	448,65	767,25	66159	13,465	104168	81376	52,93
B738	44,050	739,59	601,32	55042	1,112	86663	67701	44,03
A321	2,635	242,40	414,53	35745	7,275	56280	43966	28,60
B737	12,326	191,39	130,64	13012	0,210	20488	16005	10,41
E195	16,376	174,91	92,66	9399	0,177	14798	11560	7,52
A319	0,498	45,85	78,40	6761	1,376	10645	8316	5,41
B77W	30,296	182,05	428,78	19456	0,156	30634	23931	15,57
B763	45,575	183,55	184,56	11336	0,127	17849	13943	9,07
E190	6,135	59,41	28,56	2930	0,057	4614	3604	2,34
B734	3,050	54,19	38,13	3810	0,077	5999	4686	3,05
B772	6,732	87,66	171,75	4571	0,077	7197	5623	3,66
AT72	0,350	22,34	21,85	1930	0,029	3038	2373	1,54
B76W	15,755	63,45	63,80	3919	0,044	6170	4820	3,14
A332	4,314	42,81	70,00	4498	0,196	7083	5533	3,60
B733	1,397	24,83	17,47	1746	0,035	2748	2147	1,40
A20N	0,255	15,40	15,63	1348	0,024	2122	1658	1,08
B788	0,633	20,37	48,46	3285	0,007	5172	4040	2,63
A359	2,037	40,39	64,91	3852	0,131	6065	4738	3,08
B789	0,557	17,94	42,69	2893	0,006	4556	3559	2,31
B722	7,036	26,68	16,25	2052	0,028	2154	2524	1,64
A109	2,446	3,21	0,33	84	0,012	132	103	0,07
AS50	0,237	0,30	0,13	23	0,004	71	28	0,02
PAT4	0,965	3,86	1,17	140	0,002	221	173	0,11
B77L	3,154	18,95	44,64	2026	0,016	3189	2491	1,62
E55P	0,747	2,99	0,91	109	0,001	171	134	0,09
A318	0,420	6,48	5,25	466	0,010	733	573	0,37
BE30	0,001	4,96	3,86	433	0,001	682	533	0,35
B748	0,310	10,48	25,20	1740	0,004	1370	2141	1,39
E110	0,595	2,38	0,72	87	0,001	136	106	0,07
A388	2,861	23,86	33,82	1780	0,138	1401	2189	1,42
A333	2,057	10,36	14,88	890	0,010	1402	1095	0,71
GLF5	0,224	4,07	2,69	267	0,052	421	329	0,21
E50P	0,556	2,23	0,67	81	0,001	127	100	0,06

Figura 29 – Fatores de emissão por aeronave (2019)
Fonte: Autora

Aeronave	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Fuel (kg)	MP (mg)	CO2 (Kg)	H2O (Kg)	SO2 (Kg)
B738	28597256	480147177	390379720	35733246	722062053	56261996	43951893	28587
A320	2127272	195709030	334690805	28859991	5873700106	45440056	35497789	23088
A321	961240	88434116	151235154	13040828	2654121143	20532784	16040218	10433
B737	7707369	119678874	81694018	8136691	131004822	12811221	10008131	6509
A319	552713	50849616	86960214	7498476	1526119657	11806351	9223126	5999
B763	44319277	178490456	179474452	11023714	126800895	17356838	13559168	8819
E195	6204579	66273210	35108307	3561079	67081938	5606919	4380127	2849
B77W	16281818	97836573	230439747	10456426	83627317	16463643	12861404	8365
B734	2198346	39061416	27482589	2746302	55239156	4324052	3377951	2197
A20N	327345	19737514	20026155	1727235	31382652	2719532	2124500	1382
E190	2843112	27530268	13233845	1357821	26299311	2137890	1670120	1086
B789	557483	17946035	42704418	2894304	6392246	4557081	3559994	2315
B722	6728050	25514018	15540913	1962442	27193198	2059910	2413804	1570
B733	1240349	19338172	10667597	1163198	25127457	1831456	1430734	931
AT72	169818	10843536	10605628	936774	14052035	1474950	1152232	749
A359	1169815	23201877	37286756	2212571	75326694	3483694	2721463	1770
B788	294035	9465329	22523716	1526551	3371481	2403555	1877658	1221
B772	1694626	22066481	43235156	1150708	19275650	1811790	1415371	921
B77L	3332536	20025030	47166030	2140204	16404138	3369751	2632451	1712
B38M	126630	3195496	8672650	511685	329183	805649	629373	409
BE20	242440	312753	58150	13051	2049943	41099	16053	10
C208	358279	1433703	434590	52151	3030000	164223	64145	42
A339	1363115	12765506	19181017	1224542	53797356	1928042	1506187	980
PAT4	1081	5136965	3999081	448667	3030000	706426	551860	359
A333	2111785	10637784	15276306	914134	9990749	1439304	1124385	731
A332	733636	7281258	11905268	765071	33270243	1204604	941037	612
B748	214628	7248583	17433672	1204148	2690424	947966	1481103	963
E110	365271	1461686	443072	53169	3030000	83714	65397	43
A109	558675	734272	75755	19084	2327851	30048	23473	15
E55P	351286	1405721	426107	51133	3030000	80509	62893	41
AS50	62815	79955	35245	5933	1106563	18683	9499	5
B773	145125	2814721	11647503	565062	18638417	889689	695026	452
E50P	259968	1040299	315339	37841	3030000	59580	46544	30

Figura 30 – Fatores de emissão por aeronave (2020)

Fonte: Autora

As linhas destacadas em azul nas Figuras 27 e 28 correspondem aos helicópteros, cujo banco de dados também é disponibilizado pela ICAO mas é diferente ao utilizado para as aeronaves comerciais.

Pode se perceber nas Figuras 29 e 30 que alguns motores não contam com o fator de emissão do MP, figurando no lugar 'NO DATA'. A ICAO explica que a falta de dados de MP é devido a que os fabricantes não reportaram estas informações e alerta da possível deviação nos resultados. Além disso a organização admite a falta de dados para os motores que saíram de produção antes do 2020.

Para os motores cujo fator de emissão não é especificado é assumido um

fator de emissão de outro modelo similar, utilizado em aeronaves de tamanho e capacidade parecido, ou então desconsiderados caso não se encontrasse um modelo similar, contribuindo desta forma a incertezas.

Com base nos fatores de emissão apresentados nas Figuras 29 e 30, torna-se possível identificar as aeronaves que se destacam como as mais poluentes em termos de emissões por passageiro. Esses modelos específicos podem ser considerados como alvos prioritários ao se tomar medidas mitigadoras. A Figura 31 oferece uma representação dos resultados relacionados às 30 aeronaves mais utilizadas, exibindo suas emissões de CO₂ durante os ciclos LTO e comparando-as com as emissões de CO₂ por passageiro.

A análise da Figura 31 revela que as emissões totais durante os ciclos LTO são mais elevadas em aeronaves de maior capacidade, como o A380, B747 e B777, destacadas em vermelho. Entretanto, ao avaliar as emissões por número de passageiros, observa-se uma inversão nos resultados. Isso significa que voos operados por aeronaves de menor porte, como os jatos LJ23 e G600, destacados em laranja, podem emitir uma maior quantidade poluentes por passageiro quando comparados às grandes aeronaves. Esses dados podem ser interpretados como elementos relevantes na formulação de estratégias para limitar determinados tipos de aeronaves ou na aplicação de uma taxa de poluição por passageiro, configurando-se como medidas mitigadoras potenciais.

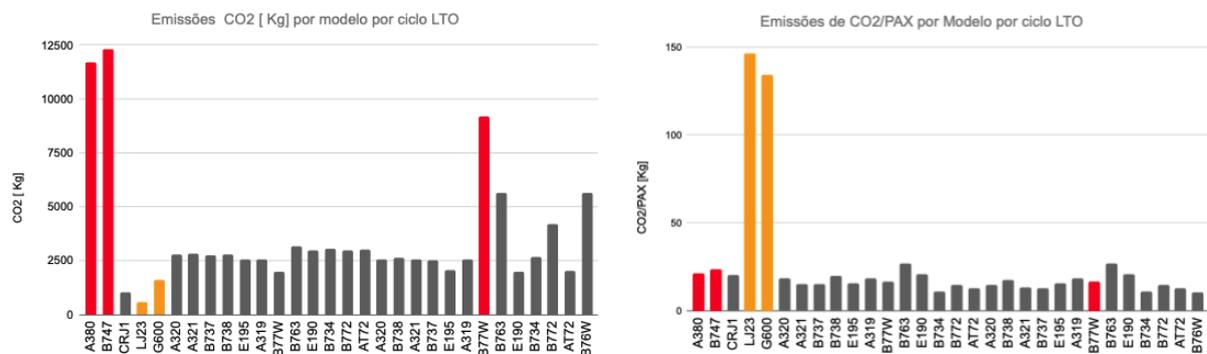


Figura 31 – Comparação de emissões totais e por passageiro
Fonte: Autora

Com as informações do banco de dados AEED, torna-se possível avaliar a evolução tecnológica de uma aeronave e seu impacto nas emissões. A título de exemplo é analisado o modelo mais amplamente utilizado em 2019, o A320, cujos motores compatíveis incluem diversos V2500-A1, V2527E-A5 e membros da família CFM56-5B4, composto por CFM56-5B4/2; CFM56-5B4/2P; CFM56-5B4/P; e CFM56-5B4/3.

Os modelos foram pesquisados na base de dados AEED, os resultados são apresentados na Figura 32. Os motores representados são dispostos cronologicamente da esquerda para a direita, o primeiro modelo foi homologado em 1988, enquanto o mais recente, o A320 Neo (última versão do A320), recebeu homologação

em 2010. Nota-se claramente como o consumo de combustível e as emissões de CO₂, diminuem gradualmente, refletindo as otimizações decorrentes das novas tecnologias ao longo do tempo.

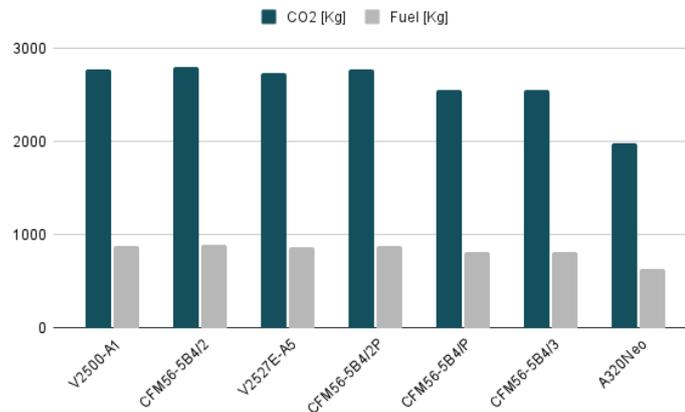


Figura 32 – Evolução no tempo das emissões de CO₂ para os motores compatíveis com o A320 e para o A320 neo

Fonte: Autora

Para responder a questão acerca da etapa mais prejudicial em termos de emissões e identificar os poluentes emitidos em maior medida, é utilizada a base de dados AEED. Para realizar tal análise, é necessário utilizar as emissões específicas em cada etapa (taxiamento, Decolagem, Subida, Aproximação e pouso) e não as totais do ciclo LTO. Com base nessas considerações, os resultados obtidos são representados nas seguintes figuras.

Em todas as etapas, destaca-se que o poluente emitido em maior quantidade é o CO₂, correspondendo a uma parcela entre 98% e 99% das emissões totais.

Durante a fase de taxiamento, Figura 33.a, os motores operam aproximadamente com 7% do empuxo máximo. Após o CO₂, os poluentes que predominam em termos de quantidade são o CO e o HC. Nesse estágio, a pressão e a temperatura dentro do cilindro são baixas, resultando em emissões mais elevadas de HC e CO devido à queima incompleta e ineficiente (CAMILLERI1, 2020).

No momento da decolagem, Figura 33.b, observa-se uma alteração drástica na proporção dos poluentes. O segundo poluente em termos de quantidade é o NO_x. Isso ocorre porque a câmara de combustão opera em temperaturas elevadas nessa fase, favorecendo uma queima mais eficiente do combustível, e a maioria do CO é oxidada, convertendo-se em CO₂. Isso resulta na redução das emissões de HC e CO, enquanto as emissões de NO_x aumentam consideravelmente durante as etapas de decolagem e subida (CAMILLERI1, 2020).

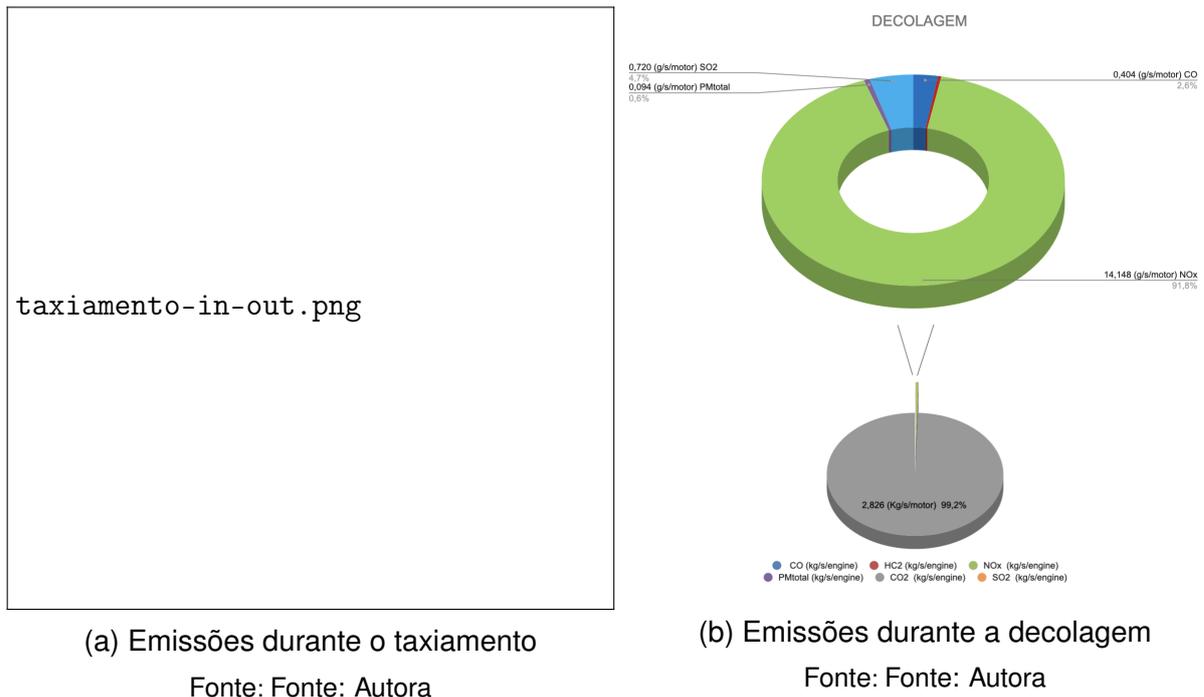


Figura 33 – Emissões por etapa

A fase de subida, Figura 34.a, assemelha-se à fase de decolagem, com a única distinção sendo a redução de 15% no empuxo e o funcionamento do motor com parâmetros ligeiramente menos robustos. Contudo, a proporção dos poluentes emitidos mantém-se constante. Entre todas as emissões, o CO₂ permanece preponderante em termos de quantidade (99% do total), e 90% da parcela remanescente é representada pelo NO_x (CAMILLERI1, 2020).

Nas etapas de aproximação e pouso, Figura 34.b, os motores operam com aproximadamente 30% do empuxo máximo. A temperatura de queima na câmara de combustão é inferior à observada nas fases de decolagem e subida, mas superior àquela presente na fase de taxiamento. Todavia, essa temperatura não é suficiente para assegurar a queima completa dos HC e CO, resultando em emissões mais elevadas do que nas fases de decolagem e subida. A temperatura mais baixa também contribui para que as emissões de NO_x sejam inferiores em relação às fases anteriores (CAMILLERI1, 2020).

Estes dados são interessantes na hora de determinar medidas mitigadoras sobre as operações LTO e entender o impacto que estas causarão em termos de tipo e quantidade de poluentes, um exemplo são os métodos de taxiamento em desenvolvimento para reduzir os tempos das aeronaves nas pistas de taxiamento (NOWAK, 2018).

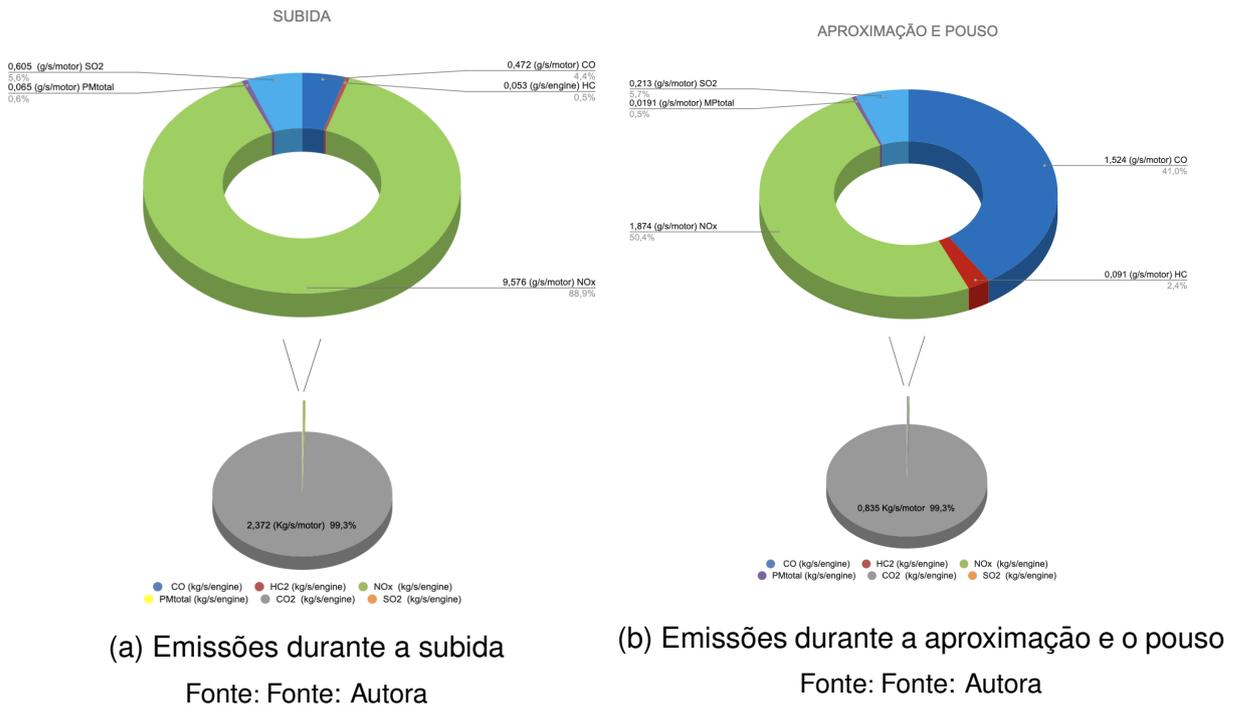


Figura 34 – Emissões por etapa

4.6 ETAPA 6: CÁLCULOS

4.6.1 Multiplicar o número de Operações pelo Fatores de Emissã0

Combinando os resultados obtidos nas Figuras 29 e 30 com os números de operações da Figura 25, é possível quantificar os poluentes emitidos por cada aeronave. As Tabelas das Figuras 35 e 36 apresentam o resultado do produto (Fator Emissão)*(Número de motores)*(Número de operações), onde cada fila corresponde a massa total emitida ao longo do ano de cada poluente. A planilha completa encontra-se disponível no Apêndice-A.

LTO Total Mass durante o 2019							
Aeronave	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	MP (mg)	CO2 (Kg)	H2O (Kg)	SO2 (Kg)
A320	4876605	448647670	767252537	13464998879	104167780	81375909	52927
B738	44049654	739592548	601319649	1112225042	86662913	67701101	44033
A321	2634754	242397392	414534670	7274930471	56280239	43966144	28596
B737	12325509	191388676	130643858	209500962	20487514	16004853	10410
E195	16375611	174913438	92660588	177047898	14798219	11560374	7519
A319	498332	45846512	78404180	1375964431	10644721	8315660	5409
B77W	30295912	182046513	428783951	155607060	30634237	23931478	15565
B763	45574778	183546831	184558702	126800895	17848532	13943280	9069
E190	6135403	59410008	28558489	56753617	4613542	3604101	2344
B734	3049821	54190883	38127286	76634669	5998867	4686317	3048
B772	6731867	87658654	171750795	76572136	7197298	5622532	3657
AT72	349807	22336551	21846485	28945723	3038243	2373477	1544
B76W	15755285	63452479	63802285	43835304	6170271	4820218	3135
A332	4313559	42811621	69999414	195619077	7082709	5533015	3599
B733	1397273	24827505	17467982	35110105	2748375	2147032	1396
A20N	255463	15403317	15628575	24491278	2122345	1657977	1078
B788	632673	20366493	48464146	7254396	5171714	4040145	2628
A359	2036508	40391694	64911783	131134767	6064694	4737741	3081
B789	557317	17940689	42691698	6390342	4555724	3558933	2315
B722	7035804	26681078	16251784	28437067	2154135	2524216	1642
A109	2445683	3214385	331627	12480575	131539	102758	67
AS50	237439	301694	133226	4360764	70902	27694	18
PAT4	964735	3860528	1170218	1745409	221101	172724	112
B77L	3153932	18951808	44638213	15524975	3189153	2491368	1620
E55P	747460	2991070	906664	1352313	171305	133824	87
A318	419896	6480147	5253674	9836988	733364	572904	373
BE30	1044	4962876	3863554	1148935	682486	533158	347
B748	310228	10477231	25198939	3888787	1370207	2140812	1392
E110	594780	2380100	721465	1076083	136314	106488	69
A388	2860584	23864298	33824783	138446156	1401108	2189092	1424
A333	2056630	10359954	14877330	9729818	1401713	1095019	712
GLF5	223716	4074034	2685824	52204899	421136	328992	214
E50P	556191	2225679	674656	1006267	127469	99579	65
FA7X	257019	3343617	1516329	27422370	193541	226792	148
B767	814396	7263884	25966250	8209634	1556299	1215781	791
A346	73527	5999137	25520839	73357154	1049377	1639548	1066
B429	79752	5630429	12341	385646	8865	6925	5
B72Y	1652953	6268306	3818105	7135146	507249	594395	387
GLEX	220945	3265734	2092008	50217866	339788	265443	173
B773	224702	4358136	18034254	28858541	1377539	1076134	700
B777	714309	8861259	17014722	7705846	1214550	948807	617
C525	401833	1607994	487421	727001	92093	71943	47
A339	731486	6850330	10293074	28869177	1034642	808262	526

Figura 35 – Emissões totais por aeronave durante o 2019

Fonte: Autora

LTO Total Mass durante o 2019							
Aeronave	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	MP (mg)	CO2 (Kg)	H2O (Kg)	SO2 (Kg)
B738	28597256	480147177	390379720	722062053	56261996	43951893	28587
A320	2127272	195709030	334690805	5873700106	45440056	35497789	23088
A321	961240	88434116	151235154	2654121143	20532784	16040218	10433
B737	7707369	119678874	81694018	131004822	12811221	10008131	6509
A319	552713	50849616	86960214	1526119657	11806351	9223126	5999
B763	44319277	178490456	179474452	126800895	17356838	13559168	8819
E195	6204579	66273210	35108307	67081938	5606919	4380127	2849
B77W	16281818	97836573	230439747	83627317	16463643	12861404	8365
B734	2198346	39061416	27482589	55239156	4324052	3377951	2197
A20N	327345	19737514	20026155	31382652	2719532	2124500	1382
E190	2843112	27530268	13233845	26299311	2137890	1670120	1086
B789	557483	17946035	42704418	6392246	4557081	3559994	2315
B722	6728050	25514018	15540913	27193198,27	2059910	2413804	1570
B733	1240349	19338172	10667597	25127457	1831456	1430734	931
AT72	169818	10843536	10605628	14052035	1474950	1152232	749
A359	1169815	23201877	37286756	75326694	3483694	2721463	1770
B788	294035	9465329	22523716	3371481	2403555	1877658	1221
B772	1694626	22066481	43235156	19275650	1811790	1415371	921
B77L	3332536	20025030	47166030	16404138	3369751	2632451	1712
B38M	126630	3195496	8672650	329183	805649	629373	409
BE20	242440	312753	58150	2049943	41099	16053	10
C208	358279	1433703	434590	3030000	164223	64145	42
A339	1363115	12765506	19181017	53797356	1928042	1506187	980
PAT4	1081	5136965	3999081	3030000	706426	551860	359
A333	2111785	10637784	15276306	9990749	1439304	1124385	731
A332	733636	7281258	11905268	33270243	1204604	941037	612
B748	214628	7248583	17433672	2690424	947966	1481103	963
E110	365271	1461686	443072	3030000	83714	65397	43
A109	558675	734272	75755	2327851	30048	23473	15
E55P	351286	1405721	426107	3030000	80509	62893	41
AS50	62815	79955	35245	1106563	18683	9499	5
B773	145125	2814721	11647503	18638417	889689	695026	452
E50P	259968	1040299	315339	3030000	59580	46544	30
B429	35537	2508913	5499	171843	3950	3086	2
FA7X	97503	1268434	575234	10402943	73422	86036	56
GLF5	69092	1258214	829483	16122826	130063	101605	66
GLEX	85529	1264185	809829	19439638	131534	102754	67
E135	82721	693147	355378	1015318	64127	50096	33
A346	24161	1971322	8386173	24105232,81	344826	538757	350
A388	745914	6222754	8820008	36100638,4	365347	570818	371
C525	139033	556363	168647	251540,805	31864	24892	16
B764	111375	3351375	3591000		735210		239625
E145	109725	3301725	3537800	353780000	135128		236075

Figura 36 – Emissões totais por aeronave durante o 2020

Fonte: Autora

O banco de dados da AEED não abrange todos os motores disponíveis no mercado, para determinar a quantidade de poluentes associados um motor não disponível, realiza-se uma busca do modelo de aeronave em questão na tabela de índices simplificados do guia, um fragmento encontra-se na Figura 22. Essa tabela estabelece uma relação direta entre o modelo de aeronave e os respectivos fatores de emissão. Esse procedimento é adotado sempre que não há dados disponíveis para o motor em questão.

Nos casos em que o modelo de aeronave também não é encontrado na tabela de índices simplificados, aplicam-se os fatores de emissão genéricos apresentados na Figura 23, conforme orientações fornecidas pelo guia.

4.6.2 Média ponderada

A ponderação de dados é empregada para atribuir diferentes pesos a itens dentro de um conjunto. No contexto deste estudo, a ponderação será aplicada com o propósito de identificar as aeronaves mais utilizadas, e consequentemente aquelas que exercem um maior impacto no resultado global. A Figura 37 mostra as ponderações correspondentes às 40 aeronaves mais utilizadas em ambos períodos, 2019 e 2020, a tabela completa encontra-se no Apêndice-A.

2019			2020		
AERONAVE	OPERAÇÕES	PONDERAÇÃO	AERONAVE	OPERAÇÕES	PONDERAÇÃO
A320	81277	0,278342	B738	42635	0,273454
B738	65672	0,224903	A320	35455	0,227401
A321	43913	0,150384	A321	16021	0,102755
B737	16347	0,055982	B737	10222	0,065562
E195	14415	0,049366	A319	9212	0,059084
A319	8306	0,028443	B763	6165	0,039544
B77W	6673	0,022853	E195	5462	0,035031
B763	6340	0,021712	B77W	3586	0,023003
E190	4621	0,015825	B734	3262	0,020920
B734	4525	0,015496	A20N	2649	0,016993
B772	3427	0,011735	E190	2141	0,013734
AT72	2985	0,010223	B789	1689	0,010835
B76W	2192	0,007506	B722	1511	0,009690
A332	2108	0,007220	B733	1484	0,009516
B733	2073	0,007100	AT72	1449	0,009295
A20N	2068	0,007081	A359	1095	0,007025
B788	1917	0,006566	B788	891	0,005715
A359	1907	0,006530	B772	863	0,005533
B789	1689	0,005784	B77L	734	0,004708
B722	1580	0,005410	B38M	712	0,004569
A109	1274	0,004361	BE20	683	0,004383
A550	890	0,003048	C208	589	0,003780
PAT4	793	0,002717	A339	580	0,003719
B77L	695	0,002379	PAT4	541	0,003467
E55P	615	0,002105	A333	482	0,003090
A318	582	0,001992	A332	359	0,002300
BE30	522	0,001788	B748	348	0,002235
B748	504	0,001725	E110	300	0,001927
E110	489	0,001675	A109	291	0,001866
A388	477	0,001635	E55P	289	0,001853
A333	469	0,001607	A35K	235	0,001510
GLF5	462	0,001583	A550	221	0,001415
E50P	457	0,001566	B773	214	0,001371
FA7X	430	0,001472	E50P	172	0,001102
B767	410	0,001406	B429	163	0,001046
A346	395	0,001354	FA7X	143	0,000916
B429	386	0,001321	GLF5	142	0,000911
B72Y	371	0,001271	GLEX	137	0,000881
GLEX	367	0,001257	E135	130	0,000833
B773	341	0,001169	A346	124	0,000798

Figura 37 – Ponderação das aeronaves mais utilizadas do 2019 e 2020

Fonte: Autora

4.6.3 Cálculo das emissões por mês

Para calcular as emissões mensais, seria possível repetir os passos anteriores, utilizando os mesmos fatores de emissão das aeronaves e alterando o número de operações, que, neste caso, seriam mensais e não anuais. Dessa forma, seriam obtidas 24 tabelas para os dois anos de estudo. Visando simplificar os cálculos, optou-se por calcular a média ponderada do fator de emissão de cada poluente para cada período e multiplicá-lo pelo número de operações por mês. Ambos os procedimentos são igualmente válidos.

Ao realizar a média ponderada do fator de emissão de cada poluente para cada ano, obtêm-se os resultados apresentados na tabela da Figura 38.

Média Ponderada	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Fuel (kg)	MP (mg)	CO2 (Kg)	H2O (Kg)	SO2 (Kg)
2019	779	9995	12433	939	87586	2941	1136	0,742
2020	877	10431	12432	953	76429	2994	1148	0,759

Figura 38 – Média Ponderada para o 2019 e 2020

Fonte: Autora

Com isso, é possível multiplicar cada fator de emissão médio pelo número de operações em cada mês. Como resultado, obtêm-se a quantidade de cada poluente emitida por mês, os resultados são ilustrados nas gráficas das Figuras 39, 40, 41 e 42, a tabela com as operações encontra-se no Apêndice-A.

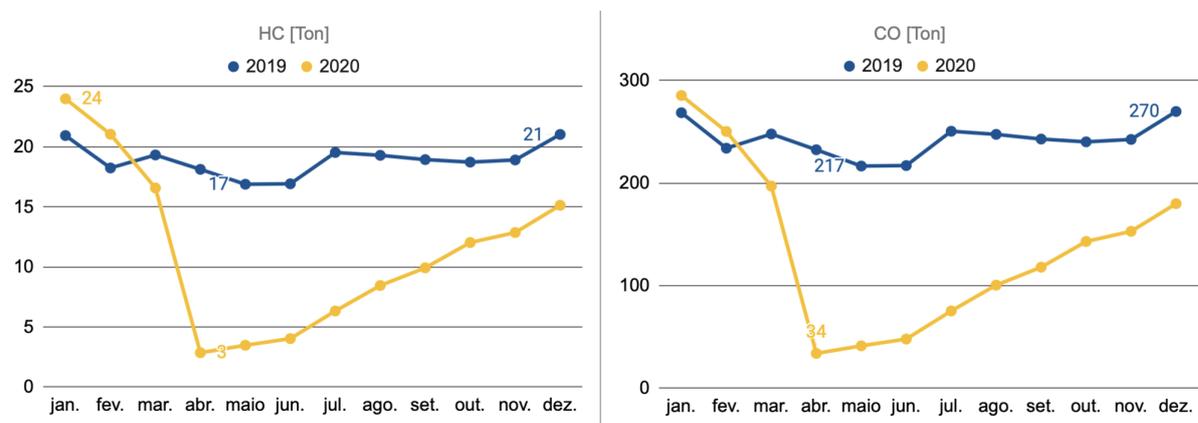


Figura 39 – Comparação de emissões de HC e CO em toneladas

Fonte: Autora

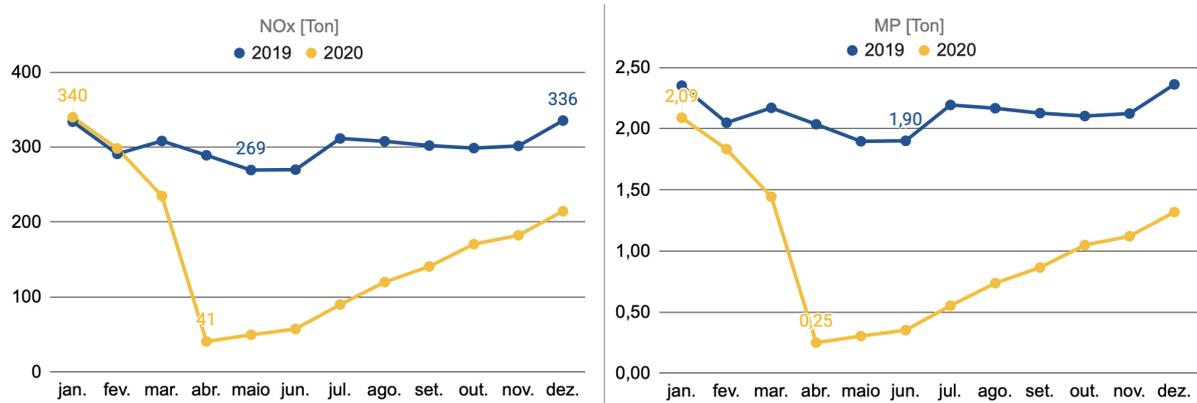


Figura 40 – Comparação de emissões de NOx e MP em toneladas
Fonte: Autora

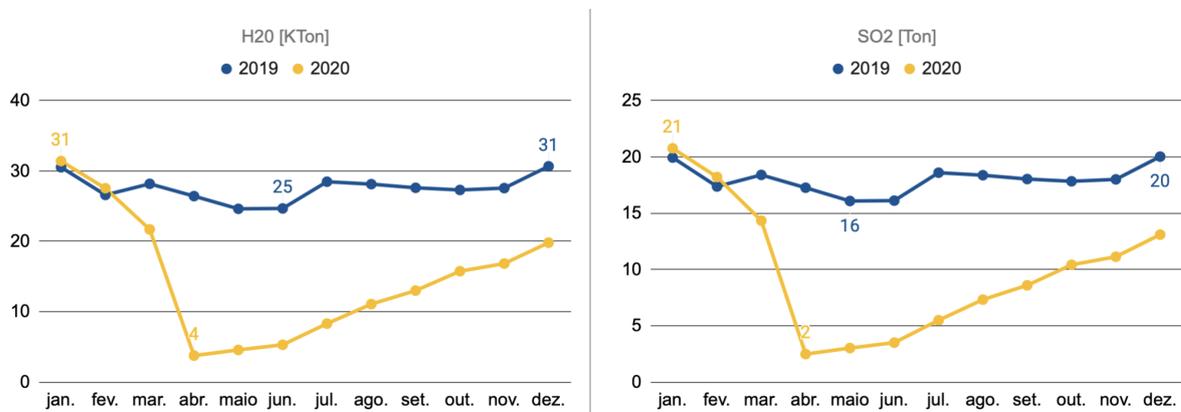


Figura 41 – Comparação de emissões de H2O e SO2 em toneladas
Fonte: Autora

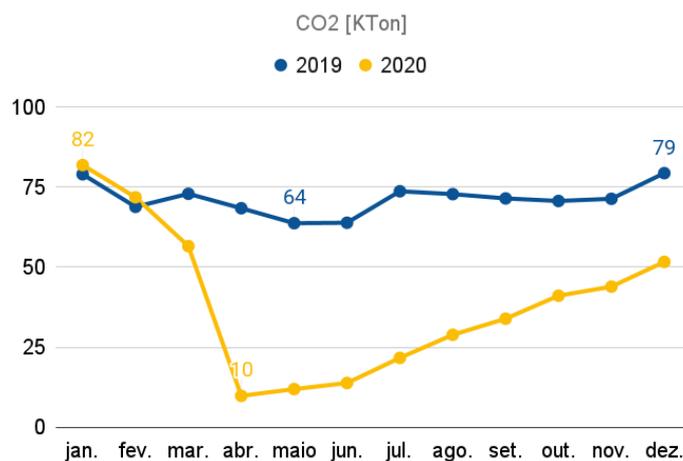


Figura 42 – Comparação de emissões de CO2 durante o 2019 e 2020 em Kilo toneladas
Fonte: Autora

Ao analisar as Figuras 39, 40, 41 e 42 é possível identificar um padrão semelhante ao apresentado na Figura 27. Para todos os poluentes calculados, observou-se

uma acentuada diminuição entre os meses de março e abril, conforme era esperado em decorrência das repercussões da COVID-19. As emissões atingem o pico durante os períodos de maior movimentação, como o período de férias de Natal e Ano Novo.

4.6.4 Total de Emissões por ano

Somando todas as emissões por mês das Figuras 39 a 42 obtém-se as emissões anuais, de igual forma é possível somar todas as filas das Figuras 35 e 36, obtendo o total de cada poluente por coluna. No presente trabalho foram calculadas as emissões das duas formas, os resultados obtidos foram os mesmos, são detalhados na tabela da Figura 43.

	Tons	Tons	Tons	Ktons	Kg	Ktons	Ktons	Tons
2019	227	2910	3619	273	25497	856	331	216
	113,3877345	1454,827223	1809,691532	136,6766145	12748,62402	428,0787255	165,351048	108,002181
2020	137	1626	1938	149	11914	467	179	118
	68,3564495	813,0286485	968,993592	74,2801555	5957,143762	233,362839	89,479138	59

Figura 43 – Total de emissões para o 2019 e 2020
Fonte: Autora

Os resultados são representados na gráfica da Figura 31 evidencia a mudança abrupta em quanto a quantidade de poluentes emitidos, este resultado é o esperado depois de analisar a diminuição da quantidade de voos durante a pandemia, como ilustra a Figura 27.

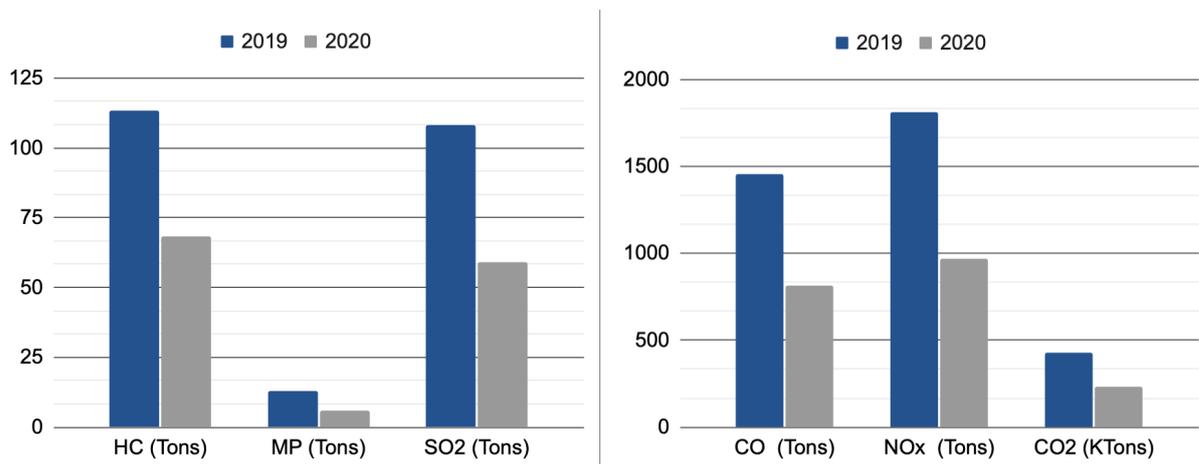


Figura 44 – Comparação das emissões totais por poluente durante o 2019 e 2020
Fonte: Autora

A quantidade de emissões de HC, CO, e NOx é reduzida em um 40%, 44% e 46% respectivamente durante o 2020 em relação ao 2019, conforme a figura 31.

Os poluentes emitidos em maior quantidade são o CO2 e o H2O, ambos função da quantidade de combustível queimado, durante o 2020 foram consumidos 148 KTon de combustível, um 46% menos que durante o 2019, isto faz com que as

emissões de CO₂ e H₂O diminuíam proporcionalmente, passando de 428 Kton a 233 Kton de CO₂ emitido e acumulado sobre Guarulhos..

A variação da quantidade emitida de MP por modelo é muito elevada, por exemplo para as aeronaves mais utilizadas o A320 e o B738 tem capacidades de carga similares, mas o MP emitido é de 82.834 mg e 8.468 mg respectivamente, deixando ao modelo Airbus 9.8 vezes mais poluente de MP. Os fatores de emissão do MP tem menor confiabilidade que o restante de poluentes, além disso á falta de reporte de dados por parte dos fabricantes contribui para uma maior incerteza.

4.7 INCERTEZAS E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS APLICANDO METODOLOGIAS DIFERENTES

Há incerteza relacionada tanto aos dados de atividade quanto aos fatores de emissão. A incerteza dos dados de atividade depende da metodologia de coleta de dados seguida pela ANAC. A qualidade dos dados reside na quantidade e qualidade da informação não confidencial disponibilizada por parte das companhias aéreas.

Para determinar as emissões provenientes das operações LTO, existem várias metodologias a serem aplicadas, dependendo dos dados disponíveis. As Figuras 45 e 46 ilustram as emissões por poluente para os ciclos LTO sobre Guarulhos usando três metodologias diferentes.

Em azul, está representada a metodologia AEED, as colunas em amarelo ilustram os resultados da metodologia de Nível 2 e as colunas em cinza representam as emissões do inventário da ANAC, baseados no combustível vendido e utilizado no aeroporto (ANAC, 2019).

A Figura 45 ilustra as diferenças de emissões para HC, MP e SO₂. Neste caso, a metodologia AEED é a mais fiel aos resultados da ANAC.

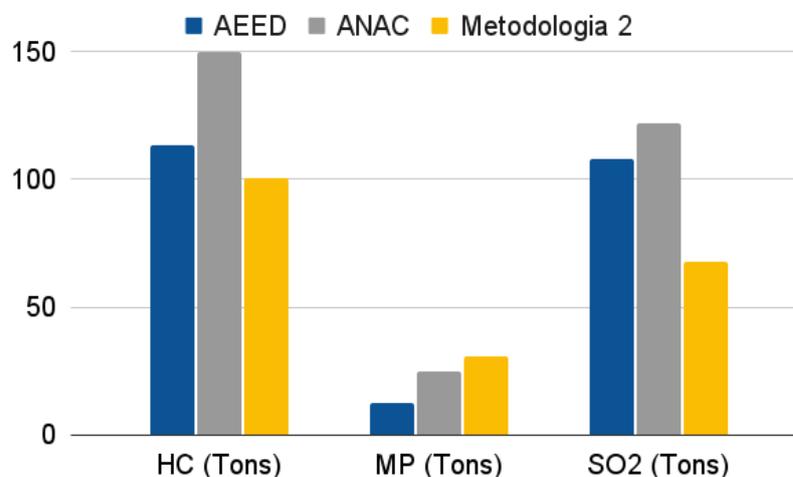


Figura 45 – Comparativa das metodologias para as emissões anuais de HC, MP e SO₂ durante o 2019

Fonte: Autora

As emissões de HC são dependentes da tecnologia e ano de registro do modelo analisado. A incerteza do fator de emissão dos hidrocarbonetos pode ser de até um fator de 2 (IPCC, 2018). Conforme os resultados da Figura 38, as emissões de HC podem ser estimadas entre 100 e 150 toneladas.

As emissões de MP podem variar em ordens de grandeza de um motor para outro, dado que é conhecido apenas o modelo de aeronave, os resultados são considerados pouco confiáveis, variando entre 13 e 30 toneladas de MP por ano.

Para as emissões de SO₂ a metodologia AEED está mais alinhada com os resultados da ANAC.

A Figura 46 compara os resultados anuais para o CO, NO_x e CO₂.

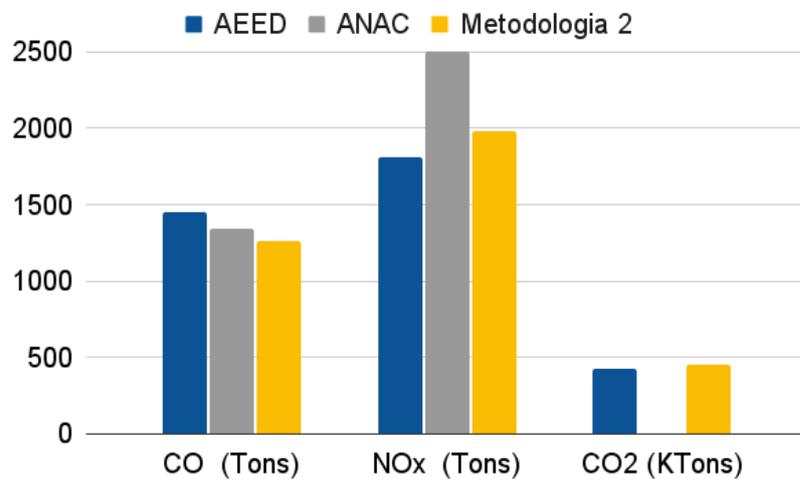


Figura 46 – Comparação das metodologias para as emissões anuais de CO, NO_x e CO₂ durante o 2019

Fonte: Autora

As emissões de CO aplicando a AEED são 8% superiores em relação às da ANAC, enquanto a metodologia nível 2 é 6% menor. Combinando esses resultados, as emissões totais podem ser estimadas em aproximadamente 1350 toneladas de CO por ano.

Quanto ao poluente NO_x, há uma maior diferença nos resultados em relação aos da ANAC. É importante lembrar que as emissões desse poluente são consideradas incertas e podem variar em ordens de grandeza, uma vez que dependem mais das condições de voo e da tecnologia do modelo utilizado (IPCC, 2023).

A ANAC não publica as emissões de CO₂, portanto, os resultados da AEED foram confrontados com a metodologia 2. Os fatores de emissão de CO₂ são bem determinados e dependem do consumo de combustível. Os resultados são semelhantes, com 428 KTon aplicando a AEED e 450 KTon aplicando a metodologia 2.

Pode se concluir que os resultados obtidos com as três metodologias divergem ligeiramente, mas servem para estimar quantidades já que não há medidores

de qualidade do ar em Guarulhos, no entanto, é importante destacar que as as três metodologias aportam estimativas de emissões, não resultados empíricos.

4.8 ETAPAS 7, 8 E 9: MAPEAMENTO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A elaboração de mapas temáticos tem como propósito espacializar os resultados obtidos na Etapa 7, buscando identificar os pontos de emissão de poluentes e delinear possíveis áreas de concentração.

O capítulo Metodologia esclarece que os cálculos da Etapa 7 não podem ser georreferenciados, pois isso poderia levar a interpretações equivocadas. Isso se deve ao fato de que as emissões ao longo de todo o ano ou do mês completo não permanecem no local de origem por um período prolongado. Por essa razão, optou-se por representar as emissões acumuladas durante um intervalo de 1 hora de operação.

Para determinar a quantidade de operações realizadas por hora e identificar as aeronaves em operação, optou-se por conduzir um monitoramento em tempo real das operações do aeroporto. Essas medições foram realizadas em 24 de novembro, entre 13h e 14h, por meio da ferramenta Flight Radar (FLIGHT RADAR, 2023). Dessa maneira, identificaram-se 7 aeronaves distintas, as quais realizaram 14 decolagens e 19 pousos, totalizando 33 operações, conforme apresentado na tabela da Figura 47.

MODELO	CÓDIGO	DECOLAGEM	POUSO
A320	C	3	4
A321	B	5	5
B738	D	2	5
B737 Max	E	1	3
Pilatus PC-12-NGX	F	2	1
E195	G		1
B789	H	1	
Total		14	19

Figura 47 – Modelos de aeronaves para operação de 1h
Fonte: Autora

Simultaneamente ao registro das operações por modelo de aeronave, acompanhou-se o percurso de cada aeronave ao chegar ou partir do aeroporto. No caso de aterrisagens, o trajeto compreende o percurso desde o momento do pouso até chegar ao pátio de aeronaves, enquanto, no caso de decolagens, o trajeto abrange o percurso desde a saída do pátio de aeronaves até a decolagem. As flechas amarelas da Figura 48 aponta o trajeto do pouso, e as vermelhas o da decolagem.

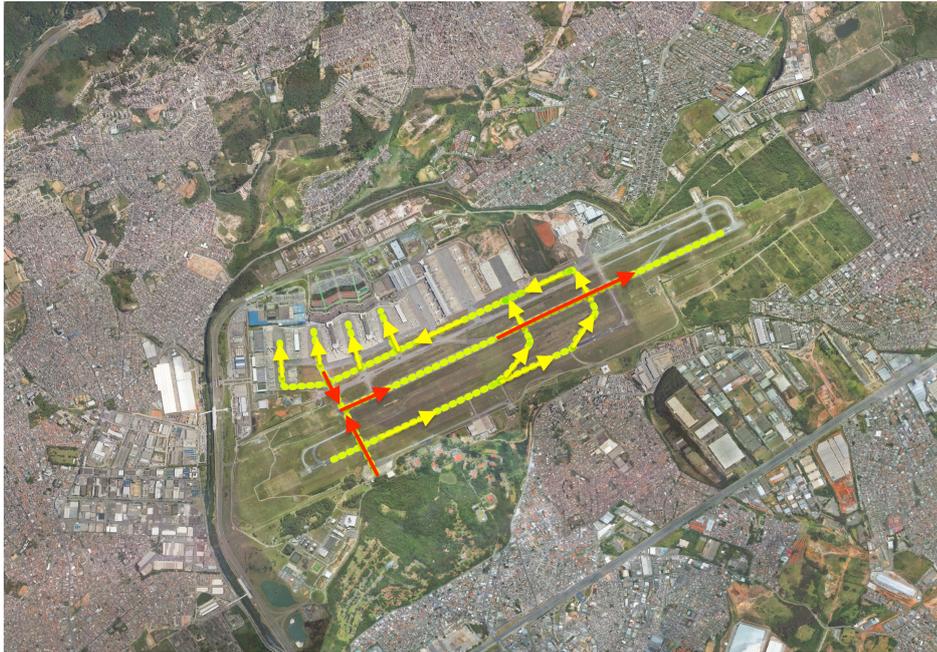


Figura 48 – Percurso das aeronaves
Fonte: Autora

O percurso da Figura 48 e as aeronaves e número de operações da Figura 47 constituem o cenário do mapa QGIS, portanto os resultados só aplicam ao cenário definido.

O passo subsequente compreende a subdivisão do percurso apresentado na Figura 48, de acordo com as etapas de taxiamento, Pouso e Decolagem, originando 15 trajetos distintos, como evidenciado na Figura 49. Essa segmentação tem como propósito a determinação das emissões específicas para cada trajeto. Para alcançar tal objetivo, é necessário inicialmente calcular o tempo que as aeronaves demandam para percorrê-lo. Esse cálculo se utiliza da tabela exposta na Figura 49.a, a qual estabelece a relação entre a etapa, a velocidade média das aeronaves nessa etapa, conforme normativas da ICAO, e a distância do trajeto, mensurada através da ferramenta do Google. O resultado desse procedimento é expresso em segundos.

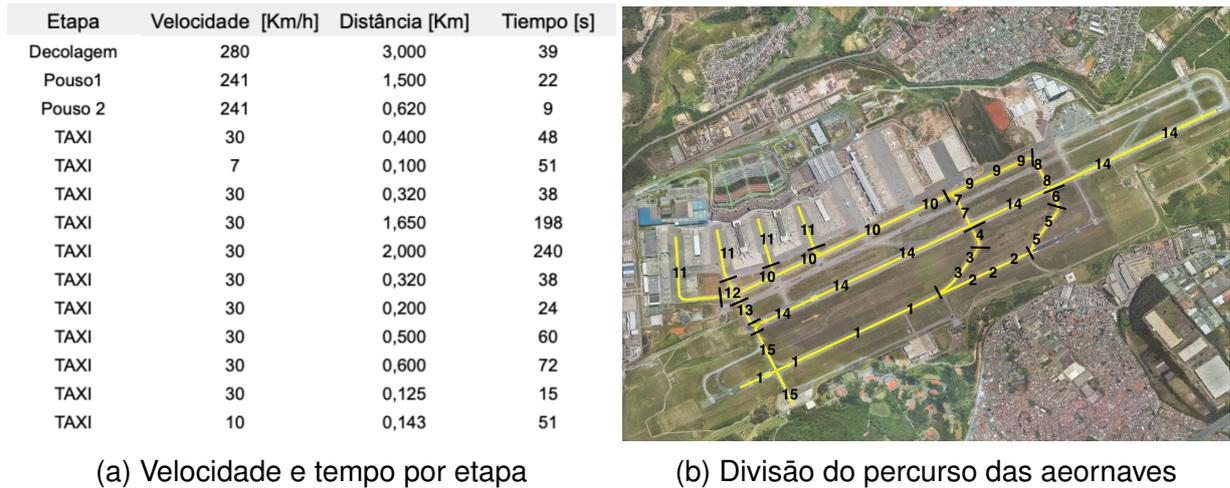


Figura 49 – Emissões por etapa

Fonte: Autora

Após a definição dos trajetos em solo das aeronaves e a determinação do tempo necessário, procede-se aos cálculos das emissões para cada segmento, utilizando um software fornecido pelo Guia Air Pollutant Emission Guidebook, o qual disponibiliza os fatores de emissão por unidade de tempo (EEA, 2020). Foram investigadas as emissões associadas aos sete modelos de aeronaves que estiveram em operação durante uma hora, e os resultados estão detalhados na Figura 50.

TAXI							
[Kg/s/engine]	A321	A320	B738	B737 Max	Pilatus PC	E195	B789
Fuel	0,117000		0,100000	0,100000	0,024000	0,085000	0,199000
CO	0,003323		0,002590	0,002590	0,001406	0,003919	0,004302
HC	0,000376		0,000310	0,000310	0,000481	0,000420	0,000161
NOx	0,000538		0,000430	0,000430	0,000068	0,000302	0,000844
MP	0,000008		0,000007	0,000007	0,000089	0,000007	0,000011
CO2	0,369720	0,000000	0,316000	0,316000	0,075840	0,268600	0,628840
SO2	0,000094	0,000000	0,000080	0,000080	0,000019	0,000068	0,000159
Kg/s/motor	0,491058		0,419417	0,419417	0,101904	0,358315	0,833317
Por aeronave Kg/s/aeronave	0,982116	0,643779	0,838834	0,838834	0,203807	0,716630	1,666635

POUSO							
[Kg/s/engine]	A321	A320	B738	B737 Max	Pilatus PC	E195	B789
Fuel	0,364000		0,274000	0,274000	0,067000	0,223000	0,604000
CO	0,000571		0,000877	0,000877	0,001499	0,001079	0,001806
HC	0,000044		0,000027	0,000027	0,000285	0,000029	0,000036
NOx	0,003931		0,002603	0,002603	0,000395	0,001693	0,005454
MP	0,000020		0,000015	0,000015	0,000206	0,000013	0,000054
CO2	1,150240	0,000000	0,865840	0,865840	0,211720	0,704680	1,908640
SO2	0,000291	0,000000	0,000219	0,000219	0,000054	0,000178	0,000483
Kg/s/motor	1,519098		1,143581	1,143581	0,281160	0,930672	2,520474
Por aeronave Kg/s/aeronave	3,038196	1,845987	2,287163	2,287163	0,562320	1,861344	5,040948

DECOLAGEM							
[Kg/s/engine]	A321	A320	B738	B737 Max	Pilatus PC	E195	B789
Fuel	1,359000		0,913000	0,913000	0,205000	0,792000	2,265000
CO	0,000680		0,000548	0,000548	0,000286	0,000642	0,000408
HC	0,000136		0,000091	0,000091	0,000023	0,000055	0,000045
NOx	0,047701		0,018717	0,018717	0,003126	0,014082	0,056217
MP	0,000130		0,000101	0,000101	0,000326	0,000076	0,000116
CO2	4,294440	0,000000	2,885080	2,885080	0,647800	2,502720	7,157400
SO2	0,001087	0,000000	0,000730	0,000730	0,000164	0,000634	0,001812
Kg/s/motor	5,703174		3,818267	3,818267	0,856726	3,310209	9,480998
Kg/s/aeronave	11,406348	6,698402	7,636534	7,636534	1,713452	6,620417	18,961997

Figura 50 – Emissões das aeronaves

Fonte: Autora

O passo subsequente envolve a multiplicação do tempo necessário para cada trajeto pelas emissões por segundo. Esse procedimento é repetido para os 15 trajetos identificados e para todas as aeronaves que percorrem esses trajetos. Posteriormente, realiza-se a soma das emissões que cada aeronave emite ao percorrer cada trajeto, resultando nas emissões totais de cada trajeto.

A tabela de atributos, ilustrada na figura 51, agrupa informações sobre as emissões por quilograma e por trajeto, relacionadas ao ID do trajeto. As regiões mais críticas em termos de quantidade total de poluentes por trajeto e por quilômetro foram destacadas em vermelho. Para criar o mapa temático, será necessário atribuir a esse ID um valor georreferenciado. Dessa forma, as emissões estarão associadas a informações geográficas, possibilitando sua visualização no mapa.

Aeronaves	ID	Tempo [s]	Emissões [Kg]/Aeronave	Total Emissões [Kg/trajeto]	Emissões [Kg/Km]
3B 1C 1D 1F 1G	1	22	43,74	980	653
2B 2C 5D 3E	2	9	28,07	260	419
3B 1C 1D 1F 1G	3	48	5,35	257	642
3B 1C 1D 1F 1G	4	51	5,35	275	2751
2B 2C 5D 3E	5	48	9,96	478	1195
2B 2C 5D 3E	6	51	9,96	512	5124
3B 1C 1D 1F 1G	7	38	5,35	205	642
2B 2C 5D 3E	8	38	9,96	383	1195
2B 2C 5D 3E	9	72	9,96	717	1195
3B 1C 1D 1F 1G	10	198	15,31	3032	1837
7C 10B 7D 4E 3F	11	38	25,94	996	778
3C 5B 2D 1E 1H	13'1	60	11,00	568	3339
3C 5B 2D 1E 1H	13'2	60	11,00	165	1378
3C 5B 2D 1E 1H	14	39	122,43	4722	1574
2F	15	72	0,41	29	49

Figura 51 – Tabela de atributos QGIS

Fonte: FONTE

Fonte: Autora Fonte: Autora

A seguir, é projetada no QGIS uma camada contendo elementos polilinha que representam o trajeto seguido pelas aeronaves em solo. A cada elemento ID da Figura 51 é atribuído um valor geográfico.

Uma vez que as informações do trajeto e as emissões correspondentes foram integradas no QGIS, torna-se possível obter um mapa do potencial de concentração de poluentes para o cenário definido de 1 hora de operação. As setas amarelas indicam os trajetos mais críticos em termos de quantidade total de poluentes, sendo a pista de decolagem a mais crítica, com 4722 kg de poluentes, seguida pela pista de taxiamento principal, com 1837 kg.

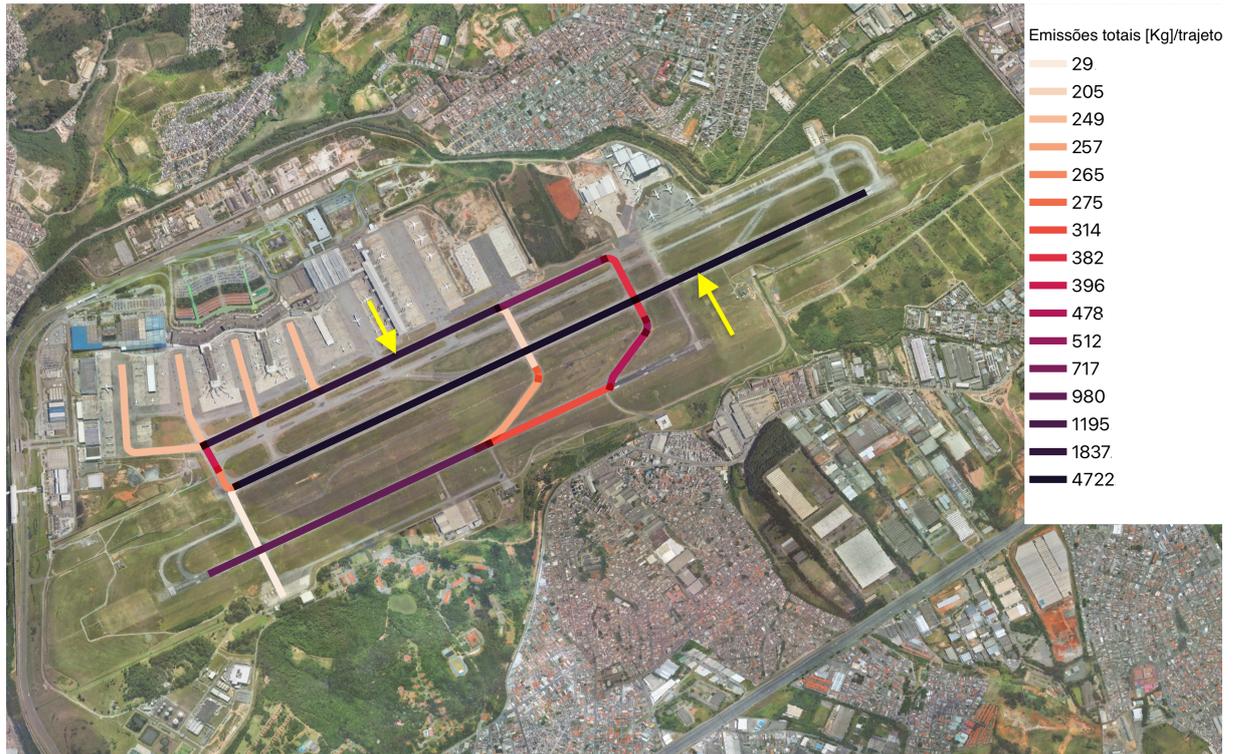


Figura 52 – Emissões totais por trajeto

Fonte: Autora

A emissão por trajeto refere-se à quantidade total de poluentes que as aeronaves liberam nesse percurso. Esse dado é útil para identificar os trajetos que acumulam mais emissões no total. No entanto, não significa que sejam os lugares com a pior qualidade do ar e tenham a concentração de substâncias nocivas mais elevada. Para determiná-los, é necessário realizar uma abordagem de emissões por unidade de distância e determinar sua dispersão.

Para representar as emissões por quilômetro, recorre-se à última coluna da tabela de atributos da Figura 51, juntamente com a coluna ID. Os resultados obtidos nesse cenário diferem dos apresentados no mapa anterior.

A Figura 53 permite a visualização dos pontos críticos de emissão, estão destacados em amarelo os pontos que concentram maior quantidade de poluentes por quilômetro, os quais coincidem com os pontos de espera das pista de taxiamento. Embora esses pontos não se destaquem pelas emissões totais na Figura 52, configuram áreas de concentração de poluentes.

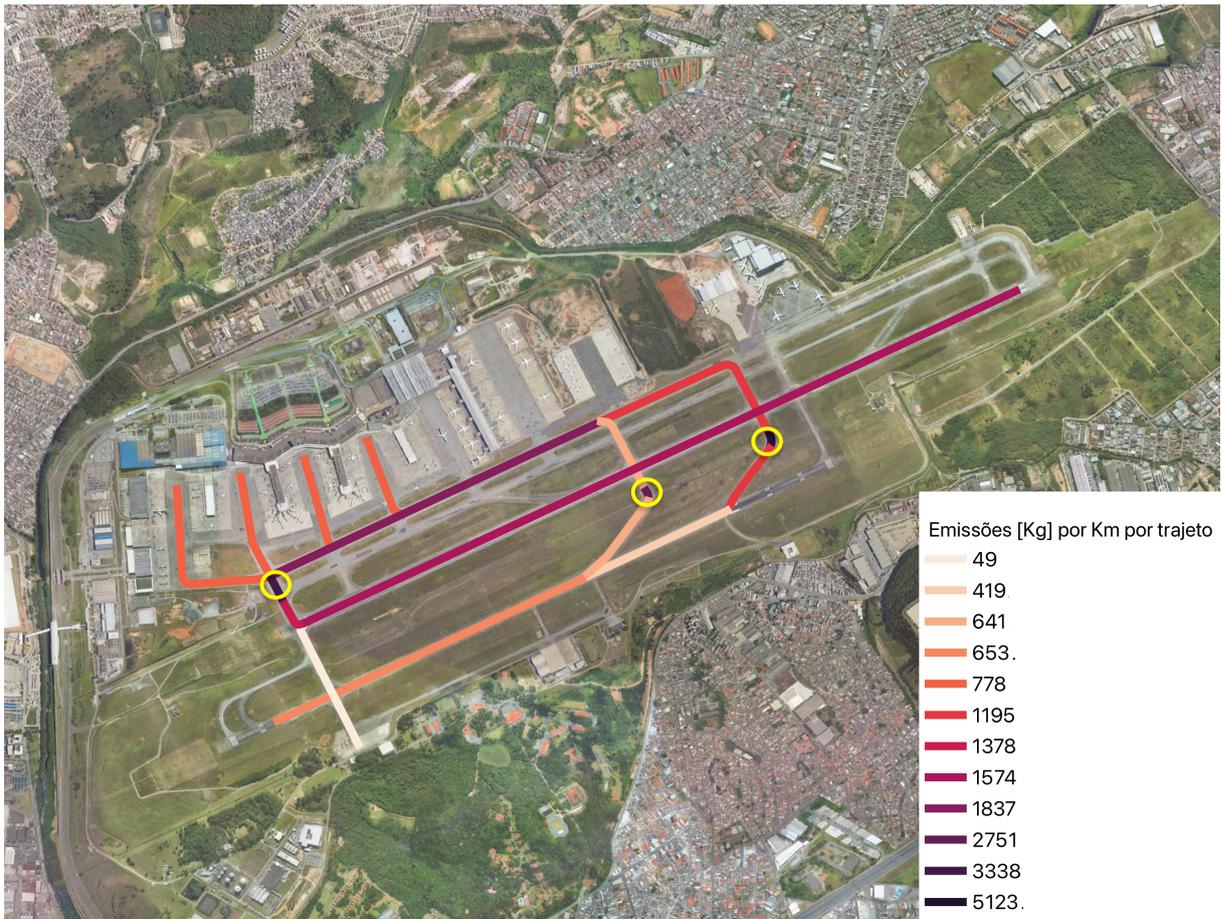


Figura 53 – Emissões totais por Km
Fonte: Autora

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que durante 1h de operação do dia 24 de novembro de 2023 no aeroporto de Guarulhos, as pistas de taxiamento acumulam um total de 7.618 kg de poluentes (CO₂, SO₂, NO_x, MP, SO₂, HC, CO), sendo 4.722 kg na pista de decolagem e 1.240 kg na de pouso. Portanto, medidas que visem reduzir os tempos de taxiamento estarão direcionadas à principal fonte de emissões em solo do aeroporto.

5 CONCLUSÃO E LINHAS FUTURAS

O CO₂ é o poluente emitido em maior medida em todas as etapas LTO, totalizando entre 98-99% do total de emissões.

A etapa de decolagem é a mais poluente em termos de emissões/s no aeroporto de Guarulhos na hora de estudo, nesta etapa os motores operam com 100% do empuxo máximo e tem duração de 0.7 minutos seguindo os padrões estabelecidos pela ICAO.

A etapa de subida é a mais poluente em termos de emissões totais no cenário de estudo, embora os motores trabalhem com 85% do empuxo máximo, ao ser mais longa no tempo, 2.2 minutos acaba somando uma maior quantidade total de poluentes.

A etapa de taxiamento é a mais poluente dentre todas as operações em solo de GRU Airport durante a hora de estudo, com isto pode se concluir que reduzir os tempos de taxiamento implicará atingir o principal foco de emissões em solo.

A pista de decolagem do Aeroporto de Guarulhos tem o potencial de acumular a maior quantidade de poluentes, embora a etapa de subida seja a mais poluente em termos de emissões totais. No cenário de estudo, determinou-se que a soma das emissões em todas as pistas de taxiamento é maior do que a soma das emissões na pista de decolagem. Isso significa que, para o estudo em questão, os poluentes liberados nas pistas de taxiamento contribuem em maior medida do que as emissões da pista de decolagem.

Embora não sejam os locais com a maior quantidade total de emissões, os pontos de espera nas pistas de taxiamento acumulam a maior quantidade de poluentes por unidade de distância. Portanto, espera-se que sejam pontos nos quais a qualidade do ar seja pior.

O cálculo das emissões de aeronaves por meio de fatores de emissão se mostra como uma forma eficiente de quantificá-las e dimensioná-las. Esse método é bastante útil em locais que não possuem equipamentos de medição in loco, como é o caso do Aeroporto de Guarulhos.

As emissões de dióxido de enxofre (SO₂) estão vinculadas ao consumo de combustível. A metodologia AEED demonstra uma maior concordância com os resultados da ANAC, estimando 111 toneladas anuais de SO₂, enquanto a metodologia nível 2 sugere uma redução de 40%.

As emissões de material particulado (MP) estão intimamente ligadas ao modelo de aeronave e ao tipo de motor utilizado, sendo as incertezas também elevadas devido à falta de dados em muitos modelos. A metodologia nível 2 e a ANAC apresentam estimativas semelhantes, variando de 30 a 25 toneladas, respectivamente, enquanto utilizando o método AEED, estima-se 13 toneladas, divergindo quase 50%.

Para o CO₂, os fatores de emissão são bem determinados e dependem do consumo de combustível, com uma pequena incerteza de 5% entre a metodologia 2 e a AEED, podendo ser estimados em 439 quilotoneladas anuais. A ANAC não fornece estimativas de CO₂.

A ferramenta de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é empregada para representar o potencial de concentração de emissões em solo. Dentro de todos os segmentos em solo que as aeronaves percorrem, a pista de decolagem acumula a maior quantidade de poluentes, visto que as aeronaves aplicam 100% do empuxo máximo. No entanto, não é a região que mais poluentes acumula por unidade de distância; essa distinção pertence aos pontos de espera das pistas de taxiamento. Ao considerar a totalidade de poluentes emitidos por etapa, observa-se que a etapa de taxiamento é a mais poluente em termos de emissões totais, um resultado inesperado, dado que os motores operam com apenas 7% do empuxo máximo. Esse resultado é uma consequência do fato de que a etapa de taxiamento é a mais longa do ciclo LTO. Reduzir os tempos de taxiamento implicará em atingir o principal foco de emissões em solo.

Se deve assegurar a qualidade do ar nas proximidades do aeroporto, sendo importante investir em sistemas de medição in loco ou através de estimativas, além de implementar medidas para mitigar as emissões e seus efeitos. A classificação das aeronaves com base em suas emissões proporciona informações úteis para o desenvolvimento de futuras regulamentações a serem aplicadas às aeronaves que mais emitem substâncias nocivas à atmosfera. O investimento em novas aeronaves, sistemas de controle de tráfego e SAF, juntamente com subsídios e a implicação do governo, permitirá a descarbonização do aeroporto.

Visando quantificar o impacto da pandemia nas emissões totais, são estimadas as emissões dos gases de efeito estufa (CO₂, H₂O) e dos principais poluentes atmosféricos (HC, CO, NO_x, SO₂) e partículas em suspensão (MP) provenientes das atividades LTO no Aeroporto de Guarulhos durante o 2019 e 2020.

A pandemia provocada pela COVID-19 representou um fenômeno sem precedentes na história do aeroporto, exercendo um impacto excepcional no tráfego aéreo de Guarulhos. O mês mais afetado foi abril de 2020, período em que as operações registraram uma queda de 86%, resultando em uma redução de 47% no número total de voos ao longo do 2020.

As emissões totais durante a pandemia seguiram a tendência das operações, sendo os gases de efeito estufa, CO₂ e H₂O, os mais emitidos, ambos com uma redução de 46%. Especificamente, as emissões de CO₂ diminuíram de 428 Kton em 2019 para 233 Kton durante o 2020. As emissões de HC, CO, NO_x e SO₂ reduziram-se em 40%, 44%, 46% e 45%, respectivamente, durante esse ano. Partículas em suspensão (MP) são altamente prejudiciais quando inaladas, e suas emissões diminuíram em

53% em 2020, passando de 12.7 toneladas em 2019 para 5.9 toneladas em 2020.

Os resultados de 2019 são confrontados com as estimativas de emissões divulgadas pela ANAC, além da aplicação da metodologia nível 2, visando quantificar as discrepâncias inerentes a cada método. Pode-se concluir que as emissões de CO estão adequadamente estimadas, divergindo apenas 8%, totalizando aproximadamente 1350 toneladas de CO por ano. Já as emissões de NOx e HC, utilizando a metodologia 2 e os fatores de emissão do AEED, são semelhantes, porém ambas diferem das estimativas da ANAC em 25% e 30%, respectivamente. Ambos poluentes são dependentes das condições de voo e da tecnologia utilizada, a falta de conhecimento desses parâmetros no presente trabalho contribui para as incertezas. Estima-se a emissão de 1809 toneladas de NOx e 125 toneladas de HC.

O futuro de uma aviação limpa é possível, mas requer a colaboração e coordenação de todos os agentes do setor aeronáutico e grandes investidores que viabilizem os projetos. Os avanços alcançados em termos de redução de emissões com as novas tecnologias são significativos ao comparar as emissões das aeronaves da frota antiga com as atuais, porém, não são suficientes para atingir a meta de emissões totais zero até 2050.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a aplicação de outras metodologias disponíveis e a realização de medições in loco no Aeroporto de Guarulhos para confrontar resultados estimados com dados empíricos. Propõe-se estimar as emissões durante as etapas de cruzeiro para as operações provenientes do tráfego de Guarulhos.

REFERÊNCIAS

- 1.A.3.A Aviation - Annex 5 - LTO emissions calculator 2019 - 2020.xlsm. 2020. Disponível em: <<https://www.google.com/url?sa=trct=jq=esrc=ssource=webcd=ved=2ahUKEwiMuLadj-2CAxWEs5UCHcdwCX4QFnoECBAQAQurl=https>
- AEDT. **Aviation Environmental Design Tool**. 2023. Disponível em: <https://aedt.faa.gov>. Acesso em: 20 Nov. 2023.
- AGENCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Inventário nacional de emissões atmosféricas da aviação civil. *In*: . 2019. Disponível em: https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/inventario-nacional-de-emissoes_v6.pdf.
- AGENCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Metadados: Dados abertos: Operador aeroportuário. 2023. Disponível em: <https://sistemas.anac.gov.br/dadosabertos/Operador%20Aeroporto/Dados%20de%20Movimenta%20Aeroporto/2019/>. Acesso em: 5 Oct. 2023.
- AIR NET. Jet transport aircraft fuel systems. 2017. Disponível em: <https://ishajunk.wixsite.com/websiteairnet/single-post/2017/07/03/jet-transport-aircraft-fuel-systems>. Acesso em: 17 Sept. 2023.
- DIGITAL AVIONICS SYSTEMS CONFERENCE. **A dynamic continuous descent approach methodology for low noise and emission**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/224202131_A_dynamic_continuous_descent_approach_methodology_for_low_noise_and_emission. Acesso em: 15 Sept. 2023.
- ARA, B. Historia de la aviación comercial desde 1909 hasta nuestros días. cien años de innovación. *In*: . [S.l.: s.n.], 2014.
- DIKRA PRASAD BAJGAI, K. L. S. **Evaluation of aircraft emission at Tribhuvan international airport and its contribution to air quality in Kathmandu, Nepal**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590162123000047>. Acesso em: 15 Nov. 2023.
- BARDERAS, A. V. El motor de propulsión a chorro. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/El-motor-de-propulsion-a-chorro_fig66_339464649. Acesso em: 17 Sept. 2023.
- BEIER, R. Ground-level engine emissions are greatest source of ultrafine particle pollution at airports. less sulphur content in kerosene and electric aircraft towing tugs on the ground can drastically reduce emissions. 2021. Disponível em: <https://www.umweltbundesamt.de/en/press/pressinformation/ground-level-engine-emissions-are-greatest-source>. Acesso em: 15 Nov. 2023.
- BENDTSEN K.M., B. E. S. A. A review of health effects associated with exposure to jet engine emissions in and around airports. 2021. Disponível em: <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12940-020-00690-y>. Acesso em: 3 Sept. 2023.

BRAVO, V. Aplicação de sig à informação aeronáutica. 2022. Disponível em: https://idee.es/resources/presentaciones/JIIDE10/ID476_La_publicacion_de_Informacion_Aeronautica.pdf. Acesso em: 2 Sept. 2023.

BRENNAN, E. Aviation outlook 2050: air traffic forecast shows aviation pathway to net zero co emissions. 2022. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int/article/aviation-outlook-2050-air-traffic-forecast-shows-aviation-pathway-net-zero-co2-emissions>. Acesso em: 23 Nov. 2023.

CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL. La atmósfera. 2019. Disponível em: <https://cambioclimaticoglobal.com/atmosfe1>. Acesso em: 2 Sept. 2023.

ROBERT CAMILLERI, A. B. Assessing the environmental impact of aircraft taxiing technologies. 2020. Disponível em: https://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2020/data/papers/ICAS2020_1162_paper.pdf. Acesso em: 15 Nov. 2023.

CIVIL, A. N. D. A. **Proposta de edição do RBAC no 38, emenda no 6 ao RBAC no 34 e emendas aos RBAC n° 11 e 21**. 2018. Tese (Doutorado), 2018. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/participacao-social/consultas-publicas/audiencias/2018/aud19/ap-19-2018-justificativa.pdf>. Acesso em: 11 Oct. 2023.

COMISIÓN ECONÓMICA PARA EUROPA DE LAS NACIONES UNIDAS. Proteger el aire que respiramos. 2022. Disponível em: https://unece.org/sites/default/files/2022-05/40%20Years%20of%20Clean%20Air%20-%20SPANISH_small.pdf. Acesso em: 3 Sept. 2023.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. Communication from the commission to the council, the european parliament, the european economic and social committee and the committee of the regions. reducing the climate change impact of aviation. *In*: . [S.l.], 2008. p. SEC(2005, 1184).

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Boletim diário, qualidade do ar. 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/boletim-diario/>. Acesso em: 10 Oct. 2023.

DODD, H. **The non-profit working behind the scenes to get aviation net zero by 2050**. [S.l.], 2023.

DOMINELLI, M. El combustible de aviación: Avgas, jp y jet. Octubre 2012. Disponível em: <https://www.airline92.com/a-fondo/el-combustible-de-aviacion-avgas-jp-y-jet>. Acesso em: 18 Sept. 2023.

EUROCONTROL. Advanced emission model. 2022. Disponível em: <https://www.eurocontrol.int/model/advanced-emission-model>. Acesso em: 20 Sept. 2023.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **ow air pollution affects our health**. [S.l.], 2023. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution/eow-it-affects-our-health#:~:text=Both%20short%2D%20and%20long%2Dterm,asthma%20and%20lower%20respiratory%20infections>. Acesso em: 30 Oct. 2023.

EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY. European aviation environmental report 2019. 2019. Disponível em: https://www.easa.europa.eu/eco/sites/default/files/2021-09/219473_EASA_EAER_2019_WEB_HI-RES_190311.pdf. Acesso em: 25 Sept. 2023.

EUROPEAN UNION AVIATION SAFETY AGENCY. Aviation environmental impacts. 2022. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewith_HVituBAxWtFLkGHUMnCP8QFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.easa.europa.eu%2Fen%2Fnewsroom-and-events%2Fpress-releases%2F-european-aviation-environmental-report-2022-sustainability&usg=AOvVaw3eeqfWNF8GE2bLv6keeDR0&opi=89978449. Acesso em: 25 Sept. 2023.

FLIGHT CONNECTIONS. Directs flights from são paulo (gru). 2023. Disponível em: <https://www.flightconnections.com/flights-from-são-paulo-gru>. Acesso em: 1 Oct. 2023.

FUNDACIÓN ECOLOGÍA Y DESARROLLO. **Estudio de herramientas de medición de la contaminación de la atmósfera en los subsectores hogar y transporte.** Disponível em: https://ecodes.org/images/que-hacemos/01.Cambio_Climatico/Incidencia_politicas/Aviacion/ecodes_aviacion_2022.pdf. Acesso em: 10 Sept. 2023.

MENGPIN GE, S. W. e. **Transporte é a fonte de emissões que mais cresce. Veja o que dizem os números.** [S.l.], 21 Out 2019. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/transporte-e-fonte-de-emissoes-que-mais-cresce-veja-o-que-dizem-os-numeros>. Acesso em: 03 Nov. 2023.

GREAT BUSTARDS FLIGHT. Cuestión de eficiencia. 2017. Disponível em: <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2017/11/cuestion-de-eficiencia.html>. Acesso em: 17 Sept. 2023.

GRU AIRPORT. Historial gru. 2023. Disponível em: <https://www.gru.com.br/es/institucional/sobre-gru-airport/historial>. Acesso em: 1 Oct. 2023.

GRU AIRPORT. Resumo de movimentação aeroportuária. 2023. Disponível em: <https://www.gru.com.br/pt/institucional/informacoes-operacionais/movimentacao-aeroportuaria>. Acesso em: 1 Oct. 2023.

GUARULHOS, R. Guarulhense morre mais cedo por causa do aeroporto. **Guarulhos Hoje**, 2019. Disponível em: <https://www.guarulhoshoje.com.br/2019/06/12/guarulhense-morre-mais-cedo-por-causa-do-aeroporto/>. Acesso em: 10 Oct. 2023.

GUIDELINES on National Greenhouse Gas Inventories: AIRCRAFT EMISSIONS. 2023. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_5_Aircraft.pdf. Acesso em: 15 Oct. 2023.

GULF AIR. **Continuous Descent Approach (CDA)**. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/continuous-descent-approach-cda-jasim-husain/>. Acesso em: 15 Sept. 2023.

IATA. Air passenger numbers to recover in 2024. press release no 10. *In: .* Genova, 2022. Disponível em: <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/>. Acesso em: 14 sept. 2023.

ICAO. **AIR QUALITY MANAGEMENT AT AIRPORTS**. 2023. Disponível em: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ecoairports/AIR%20QUALITY%20MANAGEMENT%20AT%20AIRPORTS.pdf>. Acesso em: 27 Oct. 2023.

ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. 2023. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>. Acesso em: 18 Sept. 2023.

ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. 2023. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>. Acesso em: 20 Sept. 2023.

ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. 2023. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>. Acesso em: 07 Oct. 2023.

ICAO Standards and Recommended Practices: Annex 16, Volume II. 2023. Disponível em: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art17.pdf. Acesso em: 20 Sept. 2023.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. On board a sustainable future. 2016. Disponível em: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAOEnvironmental_Brochure-1UP_Final.pdf. Acesso em: 25 Sept. 2023.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Los países apoyan el objetivo mundial de “cero emisiones netas para 2050” a fin de lograr una aviación sostenible**. Disponível em: <https://www.icao.int/Newsroom/NewsDoc2022fix/COM.38.22.SP.pdf>. Acesso em: 10 Sept. 2023.

LIVE air traffic. 2023. Disponível em: <https://www.flightradar24.com/-23.43,-46.47/18>. Acesso em: 24 Nov. 2023.

MAY, B. H. **Climate change: Should you fly, drive or take the train?** 2019. article, 2019. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/science-environment-49349566>. Acesso em: 20 Oct. 2023.

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. Calidad del aire: Efectos en la salud y ecosistemas, dióxido de azufre. 2022. Disponível em: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/dioxido-azufre.html>. Acesso em: 25 Sept. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **PROGRAMA NACIONAL DE CONTROLE DE QUALIDADE DO AR - PRONAR**. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/pronar_163.pdf. Acesso em: 10 Sept. 2023.

MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR. 2022. Disponível em: http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/biblioteca_virtual/bv_informativos_tecnicos/monitoramento.pdf. Acesso em: 1 Oct. 2023.

NATIONAL GEOGRAPHIC. ¿qué es la lluvia ácida y qué produce? 2022. Disponível em: <https://www.nationalgeographicla.com/medio-ambiente/2022/12/que-es-la-lluvia-acida-y-que-produce#:~:text=¿QuÃ%20es%20lo%20que%20produce,y%20las%20corrientes%20de%20aire>. Acesso em: 2 Sept. 2023.

NOWAK, M. Implementation of the Ito cycle in flight conditions using fnpt ii mcc simulator. 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/421/4/042060/pdf>. Acesso em: 15 Nov. 2023.

OILTANKING. Combustibles de aviación (jet fuel, gasolina de aviación (avgas), jet b, bioqueroseno. 2023. Disponível em: [https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/combustibles-de-aviacion-jet-fuel-gasolina-de-aviacion-avgas-jet-b-bioqueroseno.html#:~:text=¿nicamente%20las%20aeronaves%20con%20motores,combustible%20\(vÃase%20jet%20fuel\)](https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/combustibles-de-aviacion-jet-fuel-gasolina-de-aviacion-avgas-jet-b-bioqueroseno.html#:~:text=¿nicamente%20las%20aeronaves%20con%20motores,combustible%20(vÃase%20jet%20fuel)). Acesso em: 18 Sept. 2023.

Doc 9889 Manual sobre la calidad del aire en los aeropuertos. 2020. Tese (Doutorado), 2020. Disponível em: https://www.icao.int/publications/Documents/9889_cons_es.pdf. Acesso em: 21 Sept. 2023.

OVERTON, J. Issue brief | the growth in greenhouse gas emissions from commercial aviation (2019, revised 2022). 2022. Disponível em: <https://www.eesi.org/papers/view/fact-sheet-the-growth-in-greenhouse-gas-emissions-from-commercial-aviation>. Acesso em: 3 Sept. 2023.

PLUS ULTRA. Clasificación por tipología de motor. 2023. Disponível em: <https://plusultra.com/blog/tipos-motor/>. Acesso em: 16 Sept. 2023.

PREFEITURA DE SP. Plano de ação climática de são paulo. 2020. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/meio_ambiente/arquivos/PlanClimaSP_BaixaResolucao.pdf. Acesso em: 1 Oct. 2023.

QGIS. Qgis 3.28 user guide. *In*: . 2023. Disponível em: https://docs.qgis.org/3.28/en/docs/user_manual/preamble/features.html#explore-data-and-compose-maps.

QUALIDADE do Ar. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/boletim-diario/>. Acesso em: 15 Nov. 2023.

REDAÇÃO GUARULHOS HOJE. Guarulhos não atinge meta da oms para qualidade do ar. 2022. Disponível em: <https://www.guarulhoshoje.com.br/2022/05/27/guarulhos-nao-atinge-meta-da-oms-para-qualidade-do-ar/>. Acesso em: 10 Oct. 2023.

REPSOL. Gama de carburantes para aviación: Rendimiento y potencia para el motor de los aviones. 2023. Disponível em: <https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/aviacion/index.cshhtml>. Acesso em: 18 Sept. 2023.

SUSTAINABILITY IN THE AIR. **Why transparency trumps accuracy while calculating carbon emissions.** 2023. Disponível em: <https://green.simpliflying.com/p/tom-kershaw-travelport#details>. Acesso em: 10 Oct. 2023.

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. El cambio climático y el agua. 2008. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-sp.pdf>. Acesso em: 25 Sept. 2023.

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **INFORME ESPECIAL DEL IPCC LA AVIACIÓN Y LA ATMÓSFERA GLOBAL**. 2018. 3 p. Disponível em: <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-sp.pdf>. Acesso em: 10 Nov. 2023.

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change**. 2022. 14 p. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SPM.pdf. Acesso em: 15 Oct. 2023.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION OF CLIMATE CHANGE. **Adendo do Manual Técnico para as Partes que são países em desenvolvimento sobre a preparação para a implementação da estrutura de transparência aprimorada no âmbito do Acordo de Paris Primeira edição**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://climat.be/doc/addendum-etf-pt-final.pdf>. Acesso em: 25 Sept. 2023.

UNIÃO EUROPEIA. **Iniciativa «ReFuelEU Aviation»: el Consejo adopta un nuevo Reglamento para descarbonizar el sector de la aviación**. 2023. Disponível em: <https://www.consilium.europa.eu/es/press/press-releases/2023/10/09/refueu-aviation-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-aviation-sector/>. Acesso em: 10 Nov. 2023.

VINHAS, J. M. Las emisiones de los aviones, sus estelas y sus impactos. 2023. Disponível em: <https://www.tiempo.com/noticias/ciencia/las-emisiones-de-los-aviones-y-estelas-de-condensacion-cambio-climatico.html>. Acesso em: 25 Sept. 2023.

.1 APÊNDICE-A

AERONAVE	2019	
	OPERAÇÕES	PONDERAÇÃO
A320	81277	0,278342
B738	65672	0,224903
A321	43913	0,150384
B737	16347	0,055982
E195	14415	0,049366
A319	8306	0,028443
B77W	6673	0,022853
B763	6340	0,021712
E190	4621	0,015825
B734	4525	0,015496
B772	3427	0,011735
AT72	2985	0,010223
B76W	2192	0,007506
A332	2108	0,007220
B733	2073	0,007100
A20N	2068	0,007081
B788	1917	0,006566
A359	1907	0,006530
B789	1689	0,005784
B722	1580	0,005410
A109	1274	0,004361
AS50	890	0,003048
PAT4	793	0,002717
B77L	695	0,002379
E55P	615	0,002105
A318	582	0,001992
BE30	522	0,001788
B748	504	0,001725
E110	489	0,001675
A388	477	0,001635
A333	469	0,001607
GLF5	462	0,001583
E50P	457	0,001566
FA7X	430	0,001472
B767	410	0,001406
A346	395	0,001354
B429	386	0,001321
B72Y	371	0,001271
GLEX	367	0,001257
B773	341	0,001169
B777	330	0,001132
C525	330	0,001132
A339	311	0,001066
B38M	299	0,001025
E135	297	0,001018
R44	218	0,000747

AERONAVE	2020	
	OPERAÇÕES	PONDERAÇÃO
B738	42635	0,273454
A320	35455	0,227401
A321	16021	0,102755
B737	10222	0,065562
A319	9212	0,059084
B763	6165	0,039544
E195	5462	0,035031
B77W	3586	0,023003
B734	3262	0,020920
A20N	2649	0,016993
E190	2141	0,013734
B789	1689	0,010835
B722	1511	0,009690
B733	1484	0,009516
AT72	1449	0,009295
A359	1095	0,007025
B788	891	0,005715
B772	863	0,005533
B77L	734	0,004708
B38M	712	0,004569
BE20	683	0,004383
C208	589	0,003780
A339	580	0,003719
PAT4	541	0,003467
A333	482	0,003090
A332	359	0,002300
B748	348	0,002235
E110	300	0,001927
A109	291	0,001866
E55P	289	0,001853
A35K	235	0,001510
AS50	221	0,001415
B773	214	0,001371
E50P	172	0,001102
B429	163	0,001046
FA7X	143	0,000916
GLF5	142	0,000911
GLEX	137	0,000881
E135	130	0,000833
A346	124	0,000798
A388	114	0,000733
C525	109	0,000699
GLF4	91	0,000586
LJ35	90	0,000577
B764	85	0,000547
BE9L	83	0,000534

BE9L	203	0,000695
B06	202	0,000692
RH44	190	0,000652
PRM1	183	0,000626
GLF4	177	0,000605
BH06	175	0,000600
C560	157	0,000539
C680	152	0,000520
A330	150	0,000515
B787	139	0,000477
PC12	139	0,000477
A350	135	0,000463
LJ45	117	0,000399
EC35	113	0,000387
GLF6	113	0,000387
C25A	110	0,000376
F2TH	109	0,000373
C208	108	0,000371
AS65	100	0,000343
F900	94	0,000321
EC45	88	0,000302
H25B	84	0,000288
EC20	78	0,000267
B407	77	0,000262
C25B	75	0,000255
B350	71	0,000243
LJ35	71	0,000243
A169	68	0,000232
BE40	67	0,000229
C650	63	0,000215
C56X	61	0,000210
C510	60	0,000206
EC55	59	0,000201
H25C	55	0,000187
A343	54	0,000184
FA50	48	0,000165
RH66	48	0,000165
R66	48	0,000163
LJ31	46	0,000156
LJ40	46	0,000156
CL30	44	0,000151
B744	43	0,000149
G150	43	0,000149
CL60	41	0,000142
C550	38	0,000130
E550	38	0,000130

LJ45	78	0,000503
PC12	74	0,000477
LJ31	69	0,000443
E145	65	0,000417
C560	64	0,000408
LJ60	57	0,000365
E120	51	0,000330
F900	51	0,000330
C550	49	0,000312
C680	49	0,000312
GLF6	45	0,000291
H25B	43	0,000278
PRM1	42	0,000269
MD1F	41	0,000265
EC35	39	0,000252
C650	38	0,000243
C56X	35	0,000226
F2TH	35	0,000221
C25A	33	0,000213
CL60	33	0,000213
C130	32	0,000208
CRJ2	32	0,000208
EC55	32	0,000208
B735	30	0,000195
R66	30	0,000195
AS65	30	0,000191
GL7T	30	0,000191
A169	28	0,000178
B744	27	0,000174
EC45	27	0,000174
MU2B	27	0,000174
LJ40	26	0,000169
R44	24	0,000156
BE40	24	0,000152
H25C	24	0,000152
MU2	24	0,000152
G150	23	0,000148
WW24	23	0,000148
RH44	20	0,000130
RH66	20	0,000130
GL5T	20	0,000126
B350	19	0,000122
BE58	19	0,000122
C25B	19	0,000122
E550	19	0,000122
AT76	17	0,000108

B430	36	0,000123
B735	33	0,000113
E145	33	0,000113
TBM7	32	0,000109
BH29	30	0,000104
E120	30	0,000102
GL5T	28	0,000097
G280	28	0,000095
C750	27	0,000092
BE50	23	0,000078
MU2	19	0,000064
G450	18	0,000061
MU2B	18	0,000061
LJ60	17	0,000059
BE9T	17	0,000057
E314	17	0,000057
TBM8	17	0,000057
BE58	16	0,000054
B300	15	0,000052
E500	15	0,000052
FA8X	15	0,000052
EC30	14	0,000050
A139	14	0,000047
MD1F	14	0,000047
PA31	14	0,000047
PAY2	14	0,000047
A119	13	0,000045
AC90	13	0,000045
PAY3	13	0,000045
WW24	13	0,000045
B764	12	0,000043
CRJ2	12	0,000043
HDJT	12	0,000043
B73H	12	0,000040
PA34	12	0,000040
A32A	11	0,000038
B200	11	0,000038
H125	11	0,000038
BE90	10	0,000035
E121	10	0,000035
SR22	10	0,000035
AC91	10	0,000033
C310	8	0,000028
MD11	8	0,000028
C130	8	0,000026
BE33	6	0,000019

EC20	16	0,000104
CL30	16	0,000100
E314	16	0,000100
HDJT	14	0,000091
BH06	14	0,000087
FA8X	14	0,000087
B06	13	0,000082
A343	12	0,000078
B407	12	0,000074
B739	12	0,000074
C750	9	0,000061
G280	9	0,000061
AT75	9	0,000056
BE9T	9	0,000056
E121	8	0,000052
PA31	8	0,000052
PA34	8	0,000052
SR22	8	0,000052
C295	7	0,000048
C510	7	0,000043
E500	7	0,000043
TBM8	7	0,000043
E295	6	0,000039
KC39	6	0,000039
FA50	5	0,000035
TBM7	5	0,000035
A119	5	0,000030
BE50	5	0,000030
MD11	5	0,000030
TUCA	5	0,000030
A139	4	0,000026
EC25	4	0,000026
EC30	4	0,000026
C900	3	0,000022
A300	3	0,000017
AS32	3	0,000017
B78X	3	0,000017
ZZZZ	3	0,000017
B767	2	0,000013
GALX	2	0,000013
PAY3	2	0,000013
A32B	1	0,000009
AC90	1	0,000009
B505	1	0,000009
B74Y	1	0,000009
B752	1	0,000009

P46T	6	0,000019
PAT2	6	0,000019
AT45	5	0,000017
TUCA	5	0,000017
B700	4	0,000014
BE36	4	0,000014
C900	4	0,000014
EXPL	4	0,000014
FA20	4	0,000014
PA46	4	0,000014
B739	3	0,000009
DA62	3	0,000009
E450	3	0,000009
F100	3	0,000009
FA10	3	0,000009
GL6T	3	0,000009
GL7T	3	0,000009
MD83	3	0,000009
PAT1	3	0,000009
PAY1	3	0,000009
AB33	1	0,000005
B747	1	0,000005
B762	1	0,000005
B771	1	0,000005
C150	1	0,000005
C206	1	0,000005
C500	1	0,000005
EC25	1	0,000005
G100	1	0,000005
G550	1	0,000005
GALX	1	0,000005
L60	2	0,000007
LJ75	2	0,000007
R22	2	0,000007
S76	2	0,000007
SF50	2	0,000007
B505	1	0,000003
B74H	1	0,000003
C182	1	0,000003
CL35	1	0,000003
E545	1	0,000003
ZZZZ	1	0,000003

B762	1	0,000009
PA46	1	0,000009
A350	1	0,000004

Figura 54 – Modelo de aeronave, número de operações e ponderação para o 2019 e 2020

Fonte: Autora

LTO Total Mass durante o 2019							
Aeronave	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	MP (mg)	CO2 (Kg)	H2O (Kg)	SO2 (Kg)
A320	4876605	448647670	767252537	13464998879	104167780	81375909	52927
B738	44049654	739592548	601319649	1112225042	86662913	67701101	44033
A321	2634754	242397392	414534670	7274930471	56280239	43966144	28596
B737	12325509	191388676	130643858	209500962	20487514	16004853	10410
E195	16375611	174913438	92660588	177047898	14798219	11560374	7519
A319	498332	45846512	78404180	1375964431	10644721	8315660	5409
B77W	30295912	182046513	428783951	155607060	30634237	23931478	15565
B763	45574778	183546831	184558702	126800895	17848532	13943280	9069
E190	6135403	59410008	28558489	56753617	4613542	3604101	2344
B734	3049821	54190883	38127286	76634669	5998867	4686317	3048
B772	6731867	87658654	171750795	76572136	7197298	5622532	3657
AT72	349807	22336551	21846485	28945723	3038243	2373477	1544
B76W	15755285	63452479	63802285	43835304	6170271	4820218	3135
A332	4313559	42811621	69999414	195619077	7082709	5533015	3599
B733	1397273	24827505	17467982	35110105	2748375	2147032	1396
A20N	255463	15403317	15628575	24491278	2122345	1657977	1078
B788	632673	20366493	48464146	7254396	5171714	4040145	2628
A359	2036508	40391694	64911783	131134767	6064694	4737741	3081
B789	557317	17940689	42691698	6390342	4555724	3558933	2315
B722	7035804	26681078	16251784	28437067	2154135	2524216	1642
A109	2445683	3214385	331627	12480575	131539	102758	67
AS50	237439	301694	133226	4360764	70902	27694	18
PAT4	964735	3860528	1170218	1745409	221101	172724	112
B77L	3153932	18951808	44638213	15524975	3189153	2491368	1620
E55P	747460	2991070	906664	1352313	171305	133824	87
A318	419896	6480147	5253674	9836988	733364	572904	373
BE30	1044	4962876	3863554	1148935	682486	533158	347
B748	310228	10477231	25198939	3888787	1370207	2140812	1392
E110	594780	2380100	721465	1076083	136314	106488	69
A388	2860584	23864298	33824783	138446156	1401108	2189092	1424
A333	2056630	10359954	14877330	9729818	1401713	1095019	712
GLF5	223716	4074034	2685824	52204899	421136	328992	214
E50P	556191	2225679	674656	1006267	127469	99579	65
FA7X	257019	3343617	1516329	27422370	193541	226792	148
B767	814396	7263884	25966250	8209634	1556299	1215781	791
A346	73527	5999137	25520839	73357154	1049377	1639548	1066
B429	79752	5630429	12341	385646	8865	6925	5
B72Y	1652953	6268306	3818105	7135146	507249	594395	387
GLEX	220945	3265734	2092008	50217866	339788	265443	173
B773	224702	4358136	18034254	28858541	1377539	1076134	700
B777	714309	8861259	17014722	7705846	1214550	948807	617
C525	401833	1607994	487421	727001	92093	71943	47
A339	731486	6850330	10293074	28869177	1034642	808262	526

b2.pdf

B3.pdf

C130	0	0	0	0		0	
BE33	0	0	0	0		0	
P46T	0	0	0	0		0	
PAT2	0	0	0	0		0	
TUCA	0	0	0	0		0	
BE36	0	0	0	0		0	
FA20	600	49800	48900	810000	5235	0	5
PA46	0	0	0	0		0	
DA62	0	0	0	0		0	
E450	600	49800	48900	810000	5235	0	5
F100	0	0	0	0		0	
FA10	600	49800	48900	810000	5235	0	5
GL6T	400	33200	32600	540000	3490	0	3
PAT1	0	0	0	0		0	
PAY1	0	0	0	0		0	
AB33	0	0	0	0		0	
C150	0	0	0	0		0	
C206	0	0	0	0		0	
G100	400	33200	32600	540000	3490	0	3
EC25	0	0	0	0		0	
G550	400	33200	32600	540000	3490	0	3
GALX	400	33200	32600	540000	3490	0	3
LJ75	200	16600	16300	270000	1745	0	2
L60	0	0	0	0		0	
SF50	200	16600	16300	270000	1745	0	2
R22	0	0	0	0		0	
S76	0	0	0	0		0	
CL35	200	16600	16300	270000	1745	0	2
B505	0	0	0	0		0	
E545	200	16600	16300	270000	1745	0	2
C500	200	16600	16300	270000	1745	0	2
C182	200	16600	16300	270000	1745	0	2

Figura 55 – Emissões totais de cada poluente por aeronave para o 2019
Fonte: Autora

LTO Total Mass durante o 2019							
Aeronave	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	MP (mg)	CO2 (Kg)	H2O (Kg)	SO2 (Kg)
B738	28597256	480147177	390379720	722062053	56261996	43951893	28587
A320	2127272	195709030	334690805	5873700106	45440056	35497789	23088
A321	961240	88434116	151235154	2654121143	20532784	16040218	10433
B737	7707369	119678874	81694018	131004822	12811221	10008131	6509
A319	552713	50849616	86960214	1526119657	11806351	9223126	5999
B763	44319277	178490456	179474452	126800895	17356838	13559168	8819
E195	6204579	66273210	35108307	67081938	5606919	4380127	2849
B77W	16281818	97836573	230439747	83627317	16463643	12861404	8365
B734	2198346	39061416	27482589	55239156	4324052	3377951	2197
A20N	327345	19737514	20026155	31382652	2719532	2124500	1382
E190	2843112	27530268	13233845	26299311	2137890	1670120	1086
B789	557483	17946035	42704418	6392246	4557081	3559994	2315
B722	6728050	25514018	15540913	27193198,27	2059910	2413804	1570
B733	1240349	19338172	10667597	25127457	1831456	1430734	931
AT72	169818	10843536	10605628	14052035	1474950	1152232	749
A359	1169815	23201877	37286756	75326694	3483694	2721463	1770
B788	294035	9465329	22523716	3371481	2403555	1877658	1221
B772	1694626	22066481	43235156	19275650	1811790	1415371	921
B77L	3332536	20025030	47166030	16404138	3369751	2632451	1712
B38M	126630	3195496	8672650	329183	805649	629373	409
BE20	242440	312753	58150	2049943	41099	16053	10
C208	358279	1433703	434590	3030000	164223	64145	42
A339	1363115	12765506	19181017	53797356	1928042	1506187	980
PAT4	1081	5136965	3999081	3030000	706426	551860	359
A333	2111785	10637784	15276306	9990749	1439304	1124385	731
A332	733636	7281258	11905268	33270243	1204604	941037	612
B748	214628	7248583	17433672	2690424	947966	1481103	963
E110	365271	1461686	443072	3030000	83714	65397	43
A109	558675	734272	75755	2327851	30048	23473	15
E55P	351286	1405721	426107	3030000	80509	62893	41
AS50	62815	79955	35245	1106563	18683	9499	5
B773	145125	2814721	11647503	18638417	889689	695026	452
E50P	259968	1040299	315339	3030000	59580	46544	30
B429	35537	2508913	5499	171843	3950	3086	2
FA7X	97503	1268434	575234	10402943	73422	86036	56
GLF5	69092	1258214	829483	16122826	130063	101605	66
GLEX	85529	1264185	809829	19439638	131534	102754	67
E135	82721	693147	355378	1015318	64127	50096	33
A346	24161	1971322	8386173	24105232,81	344826	538757	350
A388	745914	6222754	8820008	36100638,4	365347	570818	371
C525	139033	556363	168647	251540,805	31864	24892	16
B764	111375	3351375	3591000		735210		239625
E145	109725	3301725	3537800	353780000	135128		236075

MD1F	103950	3127950	3351600	3373650000	709774	277162	223650
CRJ2	101475	3053475	3271800	3214912500	129027	270563	218325
B735	95700	2879700	3085600	2859400000	285244	255165	205900
GL7T	90750	2730750	2926000	2571250000	206250	241967	195250
B744	84150	2532150	2713200	2210850000	1038768	224370	181050
AT76	79200	2383200	2553600	1958400000	540780	211171	170400
FA8X	77550	2333550	2500400	1877650000	529514	206772	166850
A343	69300	2085300	2234400	1499400000	473183	184775	149100
B407	62700	1886700	2021600	1227400000	428118	167177	134900
B739	62700	1886700	2021600	1227400000	428118	167177	134900
AT75	59400	1787400	1915200	1101600000	405585	158378	127800
E295	59400	1787400	1915200	1101600000	405585	158378	127800
MD11	55275	1663275	1782200	953912500	377419	147380	118925
C900	52800	1588800	1702400	870400000	360520	140781	113600
A300	51150	1539150	1649200	816850000	349254	136381	110050
B78X	50325	1514325	1622600	790712500	343621	134182	108275
B767	47850	1439850	1542800	714850000	326721	127583	102950
A32B	46200	1390200	1489600	666400000	315455	123183	99400
B74Y	42900	1290900	1383200	574600000	292923	114384	92300
B752	42075	1266075	1356600	552712500	287289	112185	90525
B762	40425	1216425	1303400	510212500	276023	107785	86975
PA46	40425	1216425	1303400	510212500	276023	107785	86975
A350	39600	1191600	1276800	489600000	270390	105586	85200
GLF4	4800	398400	391200	311040000	132000	51512	40800
LJ35	4800	398400	391200	311040000	132000	51512	40800
BE9L					0	0	0
LJ45	4500	373500	366750	273375000	123750	48293	38250
PC12	4400	365200	358600	261360000	121000	47220	37400
LJ31	4400	365200	358600	261360000	121000	47220	37400
C560	4100	340300	334150	226935000	112750	44000	34850
LJ60	4000	332000	326000	216000000	110000	42927	34000
E120					0	0	0
F900	4000	332000	326000	216000000	110000	42927	34000
C550	3900	323700	317850	205335000	107250	41854	33150
C680	3600	298800	293400	174960000	99000	38634	30600
GLF6	3500	290500	285250	165375000	96250	37561	29750
H25B	3500	290500	285250	165375000	96250	37561	29750
PRM1	3500	290500	285250	165375000	96250	37561	29750
EC35					0	0	0
C650	3400	282200	277100	156060000	93500	36488	28900
C56X	3000	249000	244500	121500000	82500	32195	25500
F2TH	0	0	0		0	0	0
C25A	2900	240700	236350	113535000	79750	31122	24650
CL60	2800	232400	228200	105840000	77000	30049	23800
C130					0	0	
EC55					0	0	
R66					0	0	

AS65					0	0	
A169					0	0	
EC45					0	0	
MU2B	2300	190900	187450	71415000	63250	24683	19550
LJ40	2100	174300	171150	59535000	57750	22537	17850
R44	2000	166000	163000	54000000	55000	21464	17000
BE40	2000	166000	163000	54000000	55000	21464	17000
H25C	1900	157700	154850	48735000	52250	20390	16150
MU2					0	0	
G150	1700	141100	138550	39015000	46750	18244	14450
WW24	1700	141100	138550	39015000	46750	18244	14450
RH44					0	0	
RH66					0	0	
GL5T	1300	107900	105950	22815000	35750	13951	11050
B350	1300	107900	105950	22815000	35750	13951	11050
BE58	1200	99600	97800	19440000	33000	12878	10200
C25B	1200	99600	97800	19440000	33000	12878	10200
E550	1200	99600	97800	19440000	33000	12878	10200
EC20					0	0	
CL30					0	0	
E314					0	0	
HDJT	1000	83000	81500	13500000	27500	10732	8500
BH06					0	0	
B06					0	0	
C750	900	74700	73350	10935000	24750	9659	7650
G280	800	66400	65200	8640000	22000	8585	6800
BE9T	800	66400	65200	8640000	22000	8585	6800
E121					0	0	
PA31					0	0	
PA34					0	0	
SR22					0	0	
C295					0	0	
C510	600	49800	48900	4860000	16500	6439	5100
E500	600	49800	48900	4860000	16500	6439	5100
TBM8	500	41500	40750	3375000	13750	5366	4250
KC39					0	0	
FA50					0	0	
TBM7					0	0	
A119					0	0	
BE50					0	0	
TUCA					0	0	
A139					0	0	
EC25					0	0	
EC30					0	0	
AS32					0	0	
ZZZZ					0	0	
GALX	200	16600	16300	540000	5500	2146	1700
PAY3					0	0	

Figura 56 – Emissões totais de cada poluente por aeronave para o 2020
Fonte: Autora

	2019								2020							
	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Fuel (kg)	MP (mg)	CO2 (Kg)	H2O (Kg)	SO2 (Kg)	HC (g)	CO (g)	NOx (g)	Fuel (kg)	MP (mg)	CO2 (Kg)	H2O (Kg)	SO2 (Kg)
Janeiro	20930172	268545660	334049844	25229052	2353260648	79018788	30522048	19936,056	23988581	285319143	340052496	26067409	2090562437	81894882	31401244	20760,927
Fevereiro	18234053	233952965	291019231	21979173	2050125502	68839987	26590352	17367,994	21040107	250250121	298256112	22863423	1833608139	71829054	27541668	18209,169
Março	19315305	247826025	308276235	23282505	2171694870	72922095	28167120	18397,89	16566530	197041590	234840480	18002170	1443743810	56556660	21685720	14337,51
Abril	18118761	232473705	289179147	21840201	2037162774	68404719	26422224	17258,178	2862528	34046784	40578048	3110592	249464256	9772416	3747072	2477,376
Maiο	16880151	216581655	269410677	20347191	1897901034	63728529	24615984	16078,398	3482567	41421501	49367472	3784363	303499559	11889174	4558708	3013,989
Junho	16916764	217051420	269995028	20391324	1902017576	63866756	24669376	16113,272	4037708	48024324	57236928	4387612	351879116	13784376	5285392	3494,436
Julho	19523298	250494690	311595846	23533218	2195080332	73707342	28470432	18596,004	6338079	75384837	89846064	6887331	552352383	21637638	8296596	5485,293
Agosto	19285703	247446215	307803781	23246823	2168366602	72810337	28123952	18369,694	8454280	100554840	119844480	9186920	736775560	28862160	11066720	7316,76
Setembro	18929700	242878500	302121900	22817700	2128339800	71466300	27604800	18030,6	9924132	118037196	140680512	10784148	864870564	33880104	12990768	8588,844
Outubro	18719370	240179850	298764990	22564170	2104691580	70672230	27298080	17830,26	12029809	143082027	170529744	13072301	1048376593	41068698	15747116	10411,203
Novembro	18899319	242488695	301637013	22781079	2124923946	71351601	27560496	18001,662	12860328	152960184	182302848	13974792	1120754856	43904016	16834272	11129,976
Dezembro	21022873	269735065	335529371	25340793	2363683382	79368767	30657232	20024,354	15128250	179934750	214452000	16439250	1318400250	51646500	19803000	13092,75

Figura 57 – Emissões totais de cada poluente por aeronave por mês
Fonte: Autora

.2 APÊNDICE-B

TABLE 1								
DEFAULT FUEL USE AND EMISSION FACTORS FOR SOME AIRCRAFT TYPES FOR LTO CYCLE. KG/LTO								
Aircraft type ^{a)}	CO ₂	CH ₄ ^{b)}	N ₂ O ^{c)}	NO _x	CO	NMVOCs	SO ₂ ^{d)}	Fuel
A300	5470	1.0	0.2	27.21	34.4	9.3	1.7	1730
A310	4900	0.4	0.2	22.7	19.6	3.4	1.5	1550
A320	2560	0.04	0.1	11.0	5.3	0.4	0.8	810
BAC1-11	2150	6.8	0.1	4.9	67.8	61.6	0.7	680
BAe 146	1800	0.16	0.1	4.2	11.2	1.2	0.6	570
B707*	5880	9.8	0.2	10.8	92.4	87.8	1.9	1860
B727	4455	0.3	0.1	12.6	9.1	3.0	1.4	1410
B727*	3980	0.7	0.1	9.2	24.5	6.3	1.3	1260
B737-300	2905	0.2	0.1	8.0	6.2	2.0	0.9	920
B737*	2750	0.5	0.1	6.7	16.0	4.0	0.9	870
B737-400	2625	0.08	0.1	8.2	12.2	0.6	0.8	830
B747-200	10680	3.6	0.3	53.2	91.0	32.0	3.4	3380
B747*	10145	4.8	0.3	49.2	115	43.6	3.2	3210
B747-400	10710	1.2	0.3	56.5	45.0	10.8	3.4	3390
B757	4110	0.1	0.1	21.6	10.6	0.8	1.3	1300
B767	5405	0.4	0.2	26.7	20.3	3.2	1.7	1710
Caravelle*	2655	0.5	0.1	3.2	16.3	4.1	0.8	840
DC8	5890	5.8	0.2	14.8	65.2	52.2	1.9	1860
DC9	2780	0.8	0.1	7.2	7.3	7.4	0.9	880
DC10	7460	2.1	0.2	41.0	59.3	19.2	2.4	2360
F28	2115	5.5	0.1	5.3	54.8	49.3	0.7	670
F100	2340	0.2	0.1	5.7	13.0	1.2	0.7	740
L1011*	8025	7.3	0.3	29.7	112	65.4	2.5	2540
SAAB 340	945	1.4(E)	0.03(E)	0.3(E)	22.1(E)	12.7(E)	0.3(E)	300 (E)
Tupolev 154	6920	8.3	0.2	14.0	116.81	75.9	2.2	2190
Concorde	20290	10.7	0.6	35.2	385	96	6.4	6420
GAjet	2150	0.1	0.1	5.6	8.5	1.2	0.7	680

Figura 58 – Índices simplificados de emissão de aeronaves (IPCC, 2023)