



ANÁLISE DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E GASES DE  
EFEITO ESTUFA DOS CICLOS LTO: CASO DO RIO DE JANEIRO

Jonathan Gabriel de Oliveira Pinheiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientadores: Elton Fernandes, D. Sc; Marcelino Aurélio Vieira da Silva, D. Sc.

Rio de Janeiro

ABRIL/2024

ANÁLISE DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E GASES DE  
EFEITO ESTUFA DOS CICLOS LTO: CASO DO RIO DE JANEIRO

Jonathan Gabriel de Oliveira Pinheiro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)  
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientadores: Prof. Elton Fernandes

Prof. Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Aprovada por: Prof. Elton Fernandes

Prof. Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Prof. Ilton Curty Leal Junior

Prof. Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2024

## CIP - Catalogação na Publicação

076a Oliveira Pinheiro, Jonathan Gabriel de  
ANÁLISE DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E  
GASES DE EFEITO ESTUFA DOS CICLOS LTO: CASO DO RIO  
DE JANEIRO / Jonathan Gabriel de Oliveira Pinheiro.  
-- Rio de Janeiro, 2024.  
92 f.

Orientador: Elton Fernandes.  
Coorientador: Marcelino Aurélio Vieira da Silva.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do  
Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de  
Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, 2024.

1. Ciclos LTO. 2. Aviação. 3. Qualidade do Ar. 4.  
Poluição. 5. Rio de Janeiro. I. Fernandes, Elton,  
orient. II. Vieira da Silva, Marcelino Aurélio,  
coorient. III. Título.

## **DEDICATÓRIA**

Para minha Lis

## AGRADECIMENTOS

As vezes devemos nos deixar levar pelas oportunidades. Foi isso que fiz, me apeguei a uma, sem saber o que viria pela frente. Mesmo nervoso, cansado e inseguro, procurei manter a confiança. No entanto, o trajeto se mostrou bem diferente do que eu imaginava, os retornos obtidos, também. No final, acumulei conhecimento, mas também experimentei a exaustão, a desilusão e um olhar diferente sobre a vida, uma nova forma de pensar.

Ao longo desse processo, parecia que tudo conspirava contra mim, a vontade foi e voltou várias vezes. Foi somente graças ao amor de um pai por sua filha que encontrei a força para seguir em frente. Assim, meu primeiro e mais profundo agradecimento é dedicado à minha filha, Lis. Mesmo que hoje ela não compreenda completamente, sua inocência, seus sorrisos, as brincadeiras e sua demonstração de amor genuíno, me proporcionaram esperança e força em cada dia difícil. Espero que, quando for capaz de entender, ela compreenda o quanto foi vital para que eu completasse essa jornada e que, sem ela, nada do que realizei teria importância.

Nada disso teria sido possível sem o apoio e suporte que recebi. Agradeço à minha esposa, Carla, que, apesar de todos os desafios da maternidade, foi meu porto seguro. Me ajudou a superar as piores dúvidas, enfrentou os dias difíceis no nosso trabalho, que foram muitos, e seguiu me dando carinho e compreensão.

Aos meus pais, agradeço por todo suporte e acolhimento, pelas tentativas de sempre criar um ambiente em que eu pudesse encontrar refúgio do cotidiano e por sempre entenderem minhas reclamações e preocupações, apontando os melhores caminhos e oferecendo todo o amor do mundo.

Aos meus irmãos, Débora e Rafael, agradeço por serem fontes de energia, ensinamentos e apoio. Débora que sempre me deu orientações com alegria e vitalidade, demonstrando que eu era capaz de alcançar meus objetivos. E Rafael, com sua parceria infindável, compreendeu minhas dificuldades e me aconselhou de maneira precisa.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Elton Fernandes e Prof. Dr. Marcelino Aurélio Vieira da Silva, dedico minha gratidão pelos ensinamentos e pela orientação exemplar. Eles proporcionaram um ambiente em que me senti à vontade para desenvolver meu trabalho, compreendendo minhas dificuldades e fornecendo os estímulos necessários para a conclusão do estudo.

Aos amigos de mestrado, que me trouxeram alegria e exemplos inspiradores durante os períodos de estudo, mesmo quando a pandemia nos separou fisicamente, vocês permaneceram presentes.

Por fim, minha sincera gratidão à UFRJ, sem a qual essa conquista não teria sido possível.

“Tendo em conta as condições de que dispõe e na medida do possível, é a natureza que faz sempre as coisas mais belas e melhores.”

Aristóteles

Resumo da dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ANÁLISE DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E GASES DE EFEITO ESTUFA DOS CICLOS LTO: CASO DO RIO DE JANEIRO

Jonathan Gabriel de Oliveira Pinheiro

Orientadores: Elton Fernandes e Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Programa: Engenharia de Transportes

O setor de Transporte Aéreo Comercial é responsável por lidar com a crescente demanda, enquanto busca se manter dentro das metas internacionais para reduzir seus impactos ambientais. A sustentabilidade ambiental tornou-se um dos elementos fundamentais da aviação comercial, que é exigida a reduzir seus impactos com relação às mudanças climáticas. Neste contexto, cidades com grandes aeroportos, como o Rio de Janeiro, já enfrentam a tendência à grande concentração de poluentes, e a atividade aeroportuária no centro urbano contribui para tal. Os ciclos de pouso e decolagem (LTO) dos aeroportos são apontados pela literatura como a etapa mais crítica da geração de poluentes e gases de efeito estufa nas vizinhanças dos aeroportos. No sentido de subsidiar a formulação de políticas mitigadoras em cidades com aeroportos encravados na malha urbana, esta pesquisa tem como objetivo analisar a quantidade de cinco poluentes (CO, NO<sub>x</sub>, HC, SO<sub>2</sub> e PM) e gases do efeito estufa (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e CH<sub>4</sub>) produzidos pelos ciclos de LTO dos aeroportos Santos Dumont e Galeão da cidade do Rio de Janeiro. Os dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) sobre as atividades dos aeroportos de 2009 a 2019 foram utilizados. A metodologia da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO) e seu banco de dados de emissão por motor foram utilizados para estimar as emissões. A análise indicou que os aeroportos emitiram 52.732 toneladas de poluentes e mais de 6,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>. O Galeão teve custo anual de 42 milhões de euros em emissões de carbono e 14,4 milhões de euros em poluição local, enquanto o Santos Dumont custou 26,3 milhões de euros em emissões de carbono e 8 milhões de euros em poluição local. Uma abordagem interdisciplinar na elaboração de políticas públicas relacionadas à aviação e a necessidade de uma articulação entre os diferentes níveis de governo se mostra essencial. Além disso, as análises dessa dissertação indicam a necessidade de realizar mais estudos sobre o comportamento das emissões dos aeroportos, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Em síntese, a pesquisa fornece informações valiosas para a formulação de políticas públicas para reduzir os impactos ambientais das atividades do lado ar dos aeroportos. Eficiência energética das aeronaves, melhorias operacionais e uso de biocombustíveis serão pontos indispensáveis para mitigação dos impactos.



Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANALYSIS OF ATMOSPHERIC POLLUTANT EMISSIONS AND GREENHOUSE GASES DURING LTO CYCLES: A CASE STUDY OF RIO DE JANEIRO

Jonathan Gabriel de Oliveira Pinheiro

Advisors: Elton Fernandes and Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Department: Transportation Engineering

The Commercial Aviation sector is responsible for managing the increasing demand while adhering to international goals for reducing its environmental footprint. Environmental sustainability has become a cornerstone of commercial aviation, as it is required to curb its effects on climate change. In this context, cities with major airports, such as Rio de Janeiro, are already grappling with a concerning rise in pollutants, partly attributed to urban airports. Among the distinct phases of airport operations, the landing and takeoff (LTO) cycles are highlighted in the literature as the most critical in terms of pollutant and greenhouse gas generation in airport proximity. In support of crafting mitigation policies in cities with urban-embedded airports, this research aims to analyze the emissions of five pollutants (CO, NO<sub>x</sub>, HC, SO<sub>2</sub> and PM) and greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub>) produced during the LTO cycles at the Santos Dumont and Galeão airports in Rio de Janeiro. Data from the National Civil Aviation Agency (ANAC) covering airport activities from 2009 to 2019 were used. The methodology from the International Civil Aviation Organization (ICAO) and its engine emission database were used to estimate emissions. The analysis indicated that airports combined emitted 52.732 tons of pollutants and over 6.5 million tons of CO<sub>2</sub>. Galeão incurred an annual cost of 42 million euros in carbon emissions and 14.4 million euros in local pollution, while Santos Dumont incurred 26.3 million euros in carbon emissions and 8 million euros in local pollution. An interdisciplinary approach to crafting aviation-related public policies and coordination between distinct levels of government are seen as crucial. Furthermore, this research indicates the need for more studies regarding airport emissions behavior, particularly in densely populated urban areas. In summary, this study offers valuable insights for shaping public policies aimed at reducing the environmental impacts of airport-side activities. Aircraft energy efficiency, operational improvements, and the use of biofuels are indispensable factors in mitigating these impacts.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Formulação do problema .....	3
1.2	Objetivos da pesquisa .....	7
1.3	Justificativa .....	8
1.4	Estrutura da dissertação .....	9
<b>2</b>	<b>REVISÃO SOBRE O IMPACTO DAS ATIVIDADES AÉREAS NA QUALIDADE DO AR URBANO.....</b>	<b>11</b>
2.1	O impacto do ciclo LTO e sua importância para o ambiente .....	11
2.2	Métricas de avaliação e suas limitações .....	15
2.2.1	Avaliação do ciclo LTO.....	15
2.2.2	Limitações nas avaliações de emissões .....	18
2.3	Poluição Atmosférica e a Qualidade do Ar.....	19
2.4	Impactos da atividade aérea na saúde pública .....	23
2.5	Medidas regulatórias sobre a qualidade do ar e a poluição .....	25
2.6	Estratégias de mitigação para atividade aérea e suas emissões .....	28
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>29</b>
3.1	Método de Cálculo .....	30
3.2	Avaliação de material particulado (PM).....	32
3.3	Combinações de aeronave/motor .....	33
3.4	Avaliação de custo social e ambiental das emissões .....	34
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS ÁREAS PESQUISADAS .....</b>	<b>36</b>
4.1	Caracterização da Região Metropolitana do Rio de Janeiro .....	37
4.2	Zona de Influência dos Aeroportos SBGL e SBRJ .....	39
4.3	Caracterização dos procedimentos de pouso e decolagem .....	41
4.3.1	Procedimentos do SBGL .....	42
4.3.2	Procedimentos do SBRJ .....	44
<b>5</b>	<b>ESTUDO DOS AEROPORTOS DO GALEÃO E SANTOS DUMONT .....</b>	<b>47</b>
5.1	Estudo sobre os movimentos e distribuição de aeronaves .....	47
5.2	Avaliação das emissões de poluentes no ciclo LTO.....	53
5.3	Evolução das emissões entre 2009 e 2019.....	58
5.4	Análise comparativa de emissões por passageiros, CO <sub>2</sub> eq. e de custos ambientais.....	64

<b>6</b>	<b>DISCUSSÕES SOBRE A GESTÃO DA QUALIDADE DO AR E DOS POSSÍVEIS IMPACTOS.....</b>	<b>68</b>
<b>6.1</b>	<b>Análise das estratégias e políticas mitigadoras.....</b>	<b>68</b>
<b>6.2</b>	<b>Limitações e desafios da medição e monitoramento dos aeroportos e áreas próximas .....</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>74</b>
<b>7.1</b>	<b>Considerações finais.....</b>	<b>75</b>
<b>7.2</b>	<b>Sugestões de trabalhos futuros.....</b>	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do transporte de passageiros no Brasil entre 2000 e 2020	2
Figura 2 – Previsão do transporte de passageiros para América Latina e Caribe	2
Figura 3 - Ciclo LTO padrão	5
Figura 4 - Localização da Baía de Guanabara e dos Municípios da RMRJ em relação aos Aeroportos SBGL e SBRJ	22
Figura 5 - Bacias aéreas da RMRJ	23
Figura 6 - Zonas de Influência dos Aeroportos SBGL e SBRJ e outras fontes emissoras	24
Figura 7 - Gráficos de Vento Predominante para os aeroportos SBGL e SBRJ	25
Figura 8 – Trajetórias de Aproximação por Instrumento SBGL	27
Figura 9 - Trajetórias de saídas por instrumentos SBGL	28
Figura 10 - Trajetórias das aproximações por instrumentos SBRJ	29
Figura 11 - Trajetórias de saída por instrumentos SBRJ	30
Figura 12 - Evolução de movimentos em SBGL de 2009 a 2019	31
Figura 13– Evolução de movimentos em SBRJ de 2009 a 2019	32
Figura 14- Comparativo do mix de aeronaves entre SBGL e SBRJ	33
Figura 15- Distribuição de categorias de aeronave por atividade de voo	34
Figura 16- Distribuição de tipos de aeronaves por ciclos LTO no SBGL	35
Figura 17- Distribuição de tipos de aeronaves por ciclos LTO no SBRJ	35
Figura 18- Distribuição de poluentes por fases do ciclo LTO no período 2009-2019	37
Figura 19 – Comparação das emissões médias de NO <sub>x</sub> entre SBGL e SBRJ	42
Figura 20 – Comparação das emissões médias de CO entre SBGL e SBRJ	42
Figura 21 – Comparação das emissões médias de HC entre SBGL e SBRJ	43
Figura 22 – Evolução de SO <sub>2</sub> e PM no SBGL	43
Figura 23 – Evolução de SO <sub>2</sub> e PM no SBRJ	44
Figura 24 – Comparativo das Tendências nas Emissões de GEE	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Impactos potenciais principais dos compostos químicos emitidos por aeronaves na atmosfera	20
Tabela 2 - Efeitos dos Poluentes à Saúde	22
Tabela 3- Limites de qualidade do ar em diferentes países	24
Tabela 4 - Valores de $\delta$	31
Tabela 5 - Valores de AFR	32
Tabela 6 - Combinações típicas de aeronave /motor usadas para cálculo.	32
Tabela 7 - Valores equivalentes de dióxido de carbono	34
Tabela 8 - Valores de emissão de poluentes por bacia aérea	38
Tabela 9- Combustível gasto e Emissões Totais de Poluente por Ciclo LTO (kg)	52
Tabela 10 - Evolução do Consumo de Combustível e Emissões de Poluentes do Ciclo LTO 2009 – 2019 no SBGL	54
Tabela 11- Evolução do Consumo de Combustível e Emissões de Poluentes do Ciclo LTO 2009 – 2019 no SBRJ	55
Tabela 12 – Evolução das emissões de Gases do Efeito Estufa no SBGL (kg)	58
Tabela 13– Evolução das emissões de Gases do Efeito Estufa no SBRJ (kg)	59
Tabela 14 – Evolução das emissões de poluentes e GEE por passageiro no SBGL (kg/passageiro)	61
Tabela 15 – Evolução das emissões de poluentes e GEE por passageiro no SBRJ (kg/passageiro)	61
Tabela 16 – Comparativo de aproveitamento do RPK	62

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**ACC** - Area Control Center  
**AD** - Aeródromo  
**ADC** - Aproximação Descendente Contínua  
**ANAC** - Agência Nacional de Aviação Civil  
**BADA** - Base of Aircraft Data  
**BEM** - Boeing Emissions Method  
**CAEP** - Committee on Aviation Environmental Protection  
**CGNA** - Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea  
**CINDACTA** - Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle do Espaço Aéreo  
**CH<sub>4</sub>** – Metano  
**CO** – Monóxido de carbono  
**CO<sub>2</sub>** – Dióxido de carbono ou gás carbônico  
**COV** – Compostos orgânicos voláteis  
**COMAER** - Comando da Aeronáutica  
**CONAMA** - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
**CORINAIR** - Core Inventory Air  
**COVNM** - Compostos Orgânicos Voláteis Não Metânicos  
**CQ** - Controle de Qualidade  
**DAR** – Doença do Aparelho Respiratório  
**DECEA** - Departamento de Controle do Espaço Aéreo  
**EPA** - Environmental Protection Agency  
**EUROCONTROL** - European Organization for the Safety of Air Navigation  
**FAA** - Federal Aviation Administration  
**FE** - Fatores de Emissão  
**FFA** - Fixo Final de Aproximação  
**FIA** - Fixo Inicial de Aproximação  
**FIR** - Flight Information Region  
**GHG** - Green House Gases  
**HOTRAN** - Horário de Transporte  
**IAC** - Instrument Approach Chart  
**ICAO** - International Civil Aviation Organization

**IE** - Índices de Emissões

**IFR** – Regras de Voo por Instrumento

**IPCC** - Intergovernmental Panel on Climate Change

**IQA** – Índice de Qualidade do Ar

**LTO** - Landing and Takeoff

**NMHC** - Non-Methane-Hydrocarbons

**NO<sub>x</sub>** – Óxidos de nitrogênio

**NO<sub>2</sub>** – Dióxido de nitrogênio

**N<sub>2</sub>O** – Óxido nitroso

**O<sub>3</sub>** – Ozônio

**OMS** – Organização Mundial de Saúde

**PIB** - Produto Interno Bruto

**PM 2,5** – Partículas inaláveis até 2,5 mm

**PM 10** – Partículas inaláveis até 10 mm

**ppm** – partículas por milhão

**PQAR** – Padrão de Qualidade do Ar

**RMRJ** – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

**RPL** - Repetitive Plan

**SAGE** - System for Assessing Aviation's Global Emissions

**SID** - Standard Instruments Departure

**SISCEAB** - Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro

**STAR** - Standard Arrival

**SO<sub>x</sub>** – Óxidos de enxofre

**SO<sub>2</sub>** – Dióxido de enxofre

**TIM** - Times in Mode

**UHC** - Unburned Hydrocarbons

**µg/m<sup>3</sup>** – Micrograma por metro cúbico

**VFR** – Regras de Voo Visuais

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os problemas gerados pela poluição, a comunidade científica e a opinião pública são mais engajados no debate focado na baixa qualidade do ar local, pois há uma relação conhecida entre a exposição à determinados poluentes e efeitos negativos de curto e longo prazo na saúde humana (MASIOL e HARRISON, 2014). Por esse motivo, a contribuição do setor de transporte, em especial o impacto do transporte aéreo, tem sido objeto central de diversos estudos nos últimos anos, tanto no contexto da sustentabilidade da atividade de forma geral quanto do impacto na saúde das pessoas que residem nas proximidades de aeroportos (CENTRACCHIO et al., 2018; HENKES e PÁDUA, 2017; MASIOL e HARRISON, 2014; SCHÜRMAN et al., 2007).

O ciclo de pouso e decolagem (LTO) na aviação é uma fase crítica que ocorre em cada voo de uma aeronave. O ciclo inicia-se quando o avião deixa sua altitude de cruzeiro e, ao iniciar a descida, atravessa os 3000 pés, seguindo todo o perfil de aproximação final, realizando o pouso e táxi até o estacionamento. O ciclo continua quando a mesma aeronave inicia os movimentos em solo para o acionamento, realiza o taxiamento para a decolagem, e ao passar, em ascensão, pelos 3000 pés, conclui o ciclo.

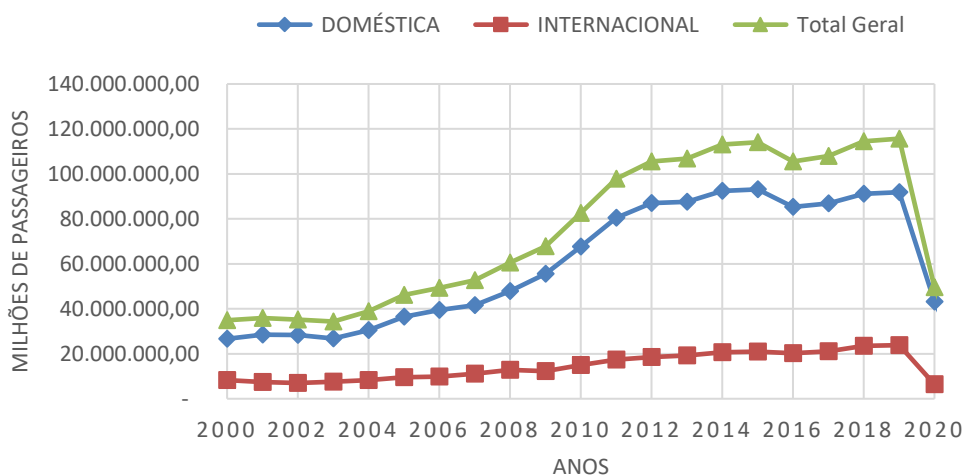
Essas fases envolvem uma série de atividades operacionais e de engenharia que consomem grandes quantidades de combustível e são as ações principais do ambiente aeroportuário, deles se originam emissões de poluentes como óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, óxidos de enxofre e material particulado. Embora a aviação represente apenas de 2 a 3% das 36 bilhões de toneladas de emissões de origem antrópica, a emissão desses poluentes deve crescer à medida que o tráfego aumenta, com estimativas de alta em 300% até o ano de 2050 (CENTRACCHIO et al., 2018; YIM et al., 2015).

O crescimento das atividades aéreas é uma tendência presente nas últimas décadas, impactando substancialmente no desenvolvimento econômico, social e cultural, fato que sustentou um aumento constante no fluxo de tráfego e gera uma expectativa maior para um futuro próximo (XU et al., 2020; CENTRACCHIO et al., 2018; ROCHA, 2012). De fato, a indústria do transporte aéreo tem crescido rapidamente ao longo dos últimos anos (YILMAZ, 2017). É previsto que nas próximas duas décadas o transporte aéreo cresça a uma taxa média de 5% ao ano. Com isso, a degradação da qualidade do ar ao nível do solo, oriunda dos ciclos de LTO, tornaram-se um dos tópicos mais importantes da aviação comercial (PAMPLONA e PINTO ALVES, 2020). A figura 1, demonstra a evolução das atividades de transporte de passageiros por via aérea no Brasil nos últimos 20 anos. Nota-se uma tendência de crescimento

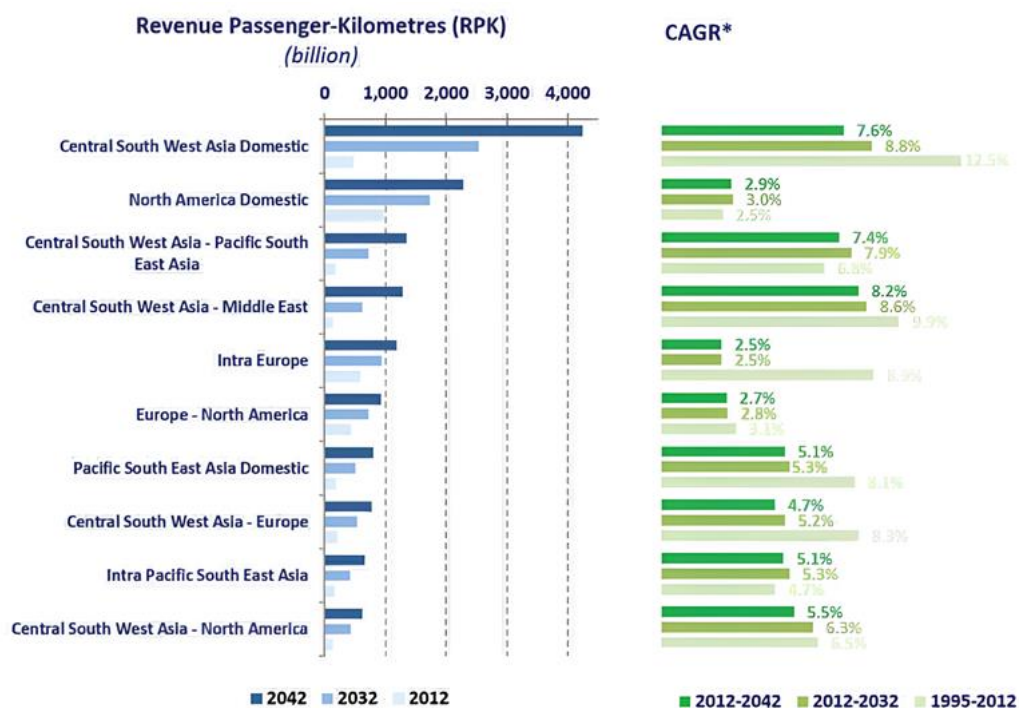


ao longo do período. O total de passageiros pagos transportados pelo país cresceu 331% entre os anos 2000 e 2019, neste último ano foram mais de 91 milhões de passageiros pagos, transportados em voos regulares de natureza doméstica.

O ano de 2020 apresenta uma anomalia devido à pandemia da COVID-19, divergindo das expectativas de volume de tráfego conforme mostrado na figura 2. Da mesma forma, os anos subsequentes, nos quais o movimento de aeronaves foi significativamente afetado pela pandemia, são naturalmente desconsiderados por não representarem o padrão típico das atividades aéreas



**Figura 1** - Evolução do transporte de passageiros no Brasil entre 2000 e 2020  
**Fonte:** Elaboração do autor com base em ANAC (2021).



**Figura 2** – Previsão do transporte de passageiros para América Latina e Caribe

**Fonte:** ICAO (2016a)

É notável a importância da aviação na economia nacional e sua forte relação com os interesses de desenvolvimento da nação. O setor aéreo foi um dos mais dinâmicos da economia brasileira no período entre 2002 e 2019, registrando um crescimento de 2,5 vezes sobre o número de passageiros transportados por quilômetro, acima do próprio crescimento do PIB nacional (ABEAR, 2019). Nos aspectos econômicos, a aviação possui importância significativa em todas suas variáveis, direta ou indiretamente, como produção, renda e emprego, além de servir de catalisador para o setor de turismo. Estima-se que a indústria do transporte aéreo responda por R\$ 103,4 bilhões, totalizando 1,4% do PIB brasileiro (ABEAR, 2019; IATA, 2019).

No entanto, o transporte aéreo representa uma fonte significativa de emissões de poluentes na atmosfera. Sua contribuição relativa para as mudanças climáticas e para a poluição do ar está inclinada a crescer a longo prazo, a menos que haja uma inovação disruptiva no sistema de propulsão das aeronaves, especialmente em países como o Brasil, onde a utilização desse modo de transporte ainda está aquém de seu potencial. Assim, estudar, entender e mitigar os efeitos das emissões provenientes da aviação se torna imperativo, tanto a nível internacional quanto nacional, sendo uma preocupação para os formuladores de políticas do setor e a indústria.

O efeito ambiental negativo do crescimento da aviação comercial, tão necessário ao crescimento econômico de países emergentes, se mostra particularmente mais grave nas principais cidades que são os epicentros da atividade aeronáutica (KAMMOUN et al., 2020; IRVINE et al., 2019). Dada a importância econômica do transporte aéreo e a necessidade de se mitigar seus efeitos ambientais negativos, é de fundamental importância se investigar esses efeitos, atuais e futuros, em cidades de grande relevância, como é o caso do Rio de Janeiro para o Brasil.

### **1.1 Formulação do problema**

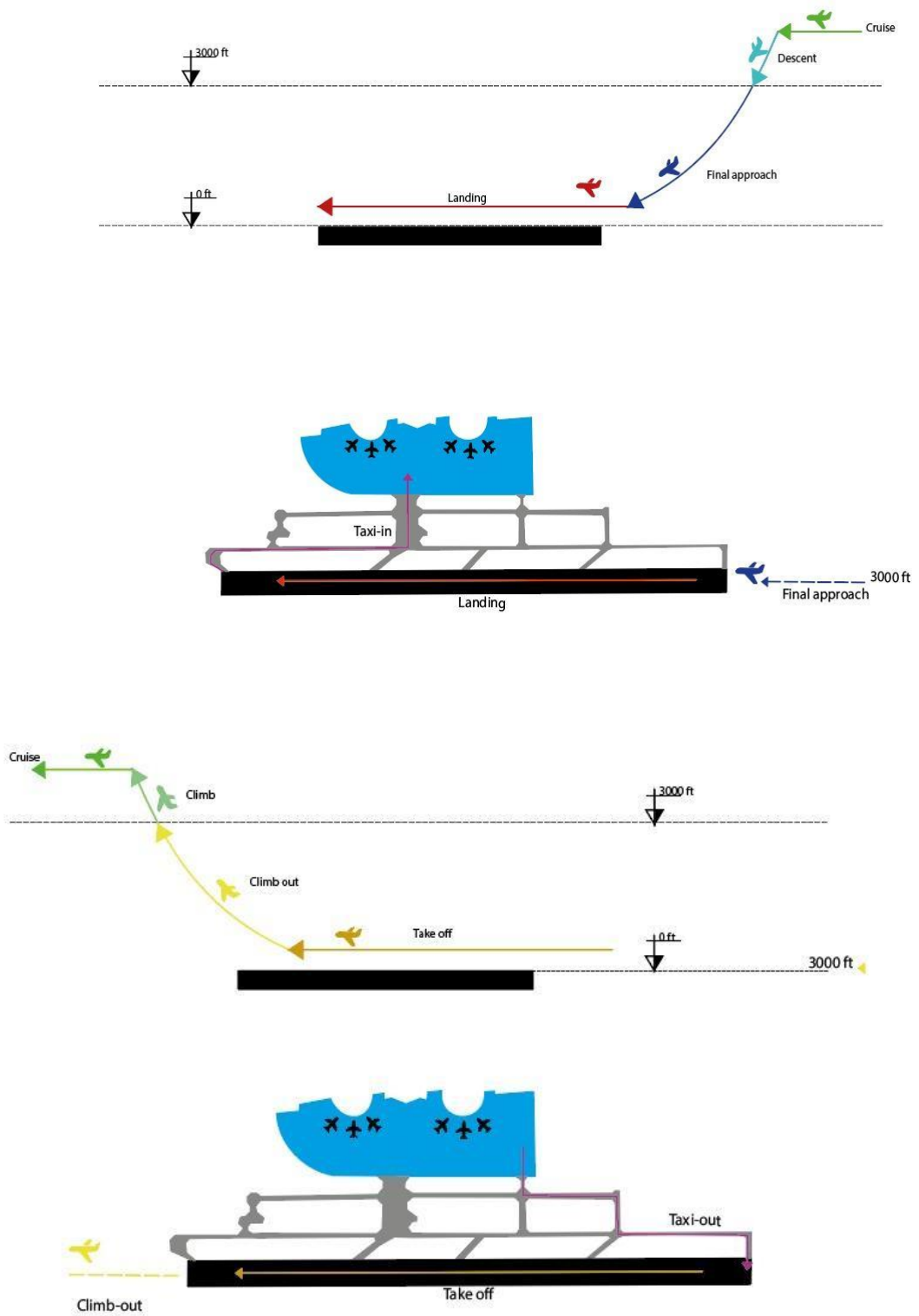
O impacto ambiental relacionado da atividade aérea é normalmente atribuído as emissões de gases do efeito estufa (GEE), gases poluentes e perturbação sonora, sendo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a forma mais comumente medida de poluição do ar (IRVINE et al., 2019; TIAN et al., 2018). Porém, o CO<sub>2</sub> não é o único fator nos impactos ambientais ligados à aviação. As consequências dos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO),

dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e outros poluentes atmosféricos estão sob investigação, devido aos seus potenciais efeitos prejudiciais tanto para a saúde humana quanto para o ambiente (PAMPLONA e PINTO ALVES, 2020).

Tais efeitos, quando oriundos das emissões atmosféricas de aeronaves são, historicamente, examinados de duas formas distintas: emissões locais de poluentes (ciclo LTO) e emissões globais de poluentes (ciclo não-LTO) (YILMAZ, 2017). As emissões possuem efeitos diferentes dependendo da altura em que as aeronaves estão voando. Consequentemente, os impactos gerados serão diferentes de acordo com o considerado, seja nas proximidades do solo ou em altitudes elevadas da atmosfera. No contexto dos efeitos climáticos, são diretamente relacionados ao dióxido de carbono e ao vapor de água, os quais desempenham o papel de gases de efeito estufa (GEE) e mais presentes como emissões globais (ROCHA, 2012).

Quando se trata dos impactos sobre a saúde e o meio ambiente, os poluentes emitidos próximos ao solo (emissões locais), tais como o monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e hidrocarbonetos (HC), notados durante o ciclo de pouso e decolagem (LTO), estão ligados a uma série de efeitos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente (TOKUSLU, 2020; VUJOVIĆ e TODOROVIĆ, 2017). Esse padrão de abordagem ressalta a importância de compreender os efeitos específicos de diferentes poluentes para uma avaliação ambiental mais abrangente.

As aeronaves emitem poluentes enquanto operam no solo e durante o voo, devido à interação dentro da camada limite da atmosfera. Como resultado, algumas dessas emissões afetam diretamente as concentrações de poluentes no nível do solo (SIMONETTI et al., 2015). O ciclo de pouso e decolagem (LTO), conforme definido, engloba as operações de aeronaves que ocorrem dentro da camada de limite atmosférica (zona de mistura). O ciclo padrão inicia quando a aeronave entra na zona de mistura conforme se aproxima do aeroporto, reduzindo sua altitude de cruzeiro, pouso e prossegue com o táxi até seu local de estacionamento. O ciclo se estende com o táxi de retorno à pista para uma nova decolagem e, após essa etapa, a aeronave ganha altitude até atingir cerca de 900 metros (SIMONETTI et al., 2015). Os modos de operação específicos dentro de um ciclo LTO padrão inclui: a aproximação, o táxi para a entrada na pista, o táxi para a saída da pista, a decolagem e a subida. A Figura 3 oferece uma representação visual do perfil típico de um ciclo LTO, exibindo vistas superior e lateral dos segmentos. Este ciclo representa um aspecto essencial para compreender as diferentes fases em que ocorrem as emissões, permitindo uma análise mais precisa de seus impactos no ambiente.



**Figura 3 - Ciclo LTO padrão**

Deve-se destacar que para o início de um ciclo LTO é considerada a altitude de 3000 pés, o que corresponde à etapa final dos procedimentos de aproximação por instrumentos em grande parte das movimentações realizadas nos aeroportos de grande porte. No entanto, esses procedimentos são individuais e específicos para cada tipo de pista e aeroporto, o que implica na existência de procedimentos diferentes para uma mesma pista e local. Em certos casos, a descida das aeronaves se inicia a uma considerável distância do aeroporto, podendo alterar a avaliação quanto à contribuição para a poluição local. Da mesma forma, os procedimentos de saída por instrumentos também serão impactados em relação a distância percorrida pela aeronave até cruzar 3000 pés. Nessa dinâmica, a dispersão de poluentes durante o LTO pode agravar seus impactos ao se somar às outras emissões nas proximidades dos aeroportos, ampliando a complexidade da avaliação do seu impacto ambiental.

Como muitos sítios aeroportuários estão inseridos no âmbito urbano, onde estão próximas diversas fontes significativas de poluentes, como indústrias, vias expressas de automóveis, rodovias, áreas portuárias e outras fontes poluidoras. Logo, a degradação da qualidade do ar ao nível do solo, oriunda dos ciclos de LTO, torna-se importante, especialmente, em relação às possíveis violações dos valores-limite e alvo para muitos poluentes atmosféricos definidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS).

Essa situação se alinha com a realidade da cidade do Rio de Janeiro, uma das principais cidades do Brasil com um alto valor agregado ao PIB, abrigando dois dos aeroportos mais importantes do país em uma proximidade notável dentro de um conglomerado urbano. Como toda grande cidade, o Rio, também sofre com problemas de poluição que são alvos de diversas políticas públicas. A saúde pública, como um sistema de alto uso e prioridade em grandes centros, também é impactado com o aumento de problemas de saúde ligados ao trato respiratório, tornando qualquer possível aumento de poluentes um agravante ao sistema de saúde local (DELLAERT E HULSKOTTE, 2017; SCHLENKER E WALKER, 2016; RAPER ET AL., 1970).

Com base no que foi exposto, a elaboração desta dissertação teve como base dois questionamentos que representam a problemática:

- (i) Quais foram as quantidades de poluentes e gases de efeito estufa emitidos pelos principais aeroportos da cidade do Rio de Janeiro nos últimos anos, qual a variação na eficiência ambiental durante esse período e como ela poderá impactar para a poluição local num próximo momento?

(ii) A cidade do Rio de Janeiro possui um relevo acidentado e um desenvolvimento urbano muito característico. Seus dois principais aeroportos estão numa proximidade física, o que pode gerar um acúmulo de poluentes. Como a contribuição combinada dos aeroportos pode levar para violações nos valores limite e metas estabelecidas para qualidade local da cidade e, subsequentemente, impactar a saúde da população local?

Estas indagações serão fundamentais para orientar o desenvolvimento desta pesquisa. A análise conduzida neste estudo contribui para avaliar de forma abrangente a eficiência ambiental das principais fontes de emissão associadas ao transporte aéreo na cidade, tanto em termos dos gases emitidos quanto na diversidade de motores de aeronaves avaliados. Isto é particularmente relevante, considerando a escassez de estudos na literatura que abordam o cenário nacional e as atividades aéreas como fonte exclusiva de emissão, com muitos focados apenas em um tipo específico de emissão ou de motorização de aeronaves. Além disso, busque-se fomentar discussões sobre os impactos das políticas de controle de emissões e identificar áreas que necessitam de melhorias nas atividades aéreas dos aeroportos. Os dados de movimento da ANAC e o banco de emissões por motor da ICAO foram adotados como base para o cálculo e análise das emissões.

## **1.2 Objetivos da pesquisa**

O objetivo geral deste trabalho é empregar uma variedade de métricas e uma ampla gama de motores de aeronaves, com foco nos mais comumente utilizados pelas companhias aéreas, para estimar e analisar, por meio de um inventário de emissões, as quantidades de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa diretamente associados à atividade das aeronaves nos aeroportos, exemplificada pelo ciclo de pousos e decolagens (LTO). Para tal, foi pesquisado a operação contínua entre os anos de 2009 e 2019, de dois aeroportos com grande relevância para o cenário da aviação brasileira, e seus resultados confrontados num contexto de eficiência ambiental.

Para atender ao objetivo geral da pesquisa, este estudo contém ainda os seguintes objetivos específicos:

- a) Verificar os fatores de emissão por aeronave e estimar as quantidades de poluentes emitidos para cada tipo de motorização;
- b) Traçar um perfil de concentração e distribuição de poluentes;
- c) Propor e aplicar um procedimento de análise nos aeroportos do Rio de Janeiro;

- d) Comparar os valores de eficiência ambiental individual e integrada e destacar a contribuição para qualidade do ar.

### **1.3 Justificativa**

Prevê-se que as emissões de poluentes atmosféricos e gases do efeito estufa nos aeroportos e em todo ambiente à sua volta aumentem em conjunto com o crescimento previsto dos movimentos de tráfego aéreo. Portanto, a importância relativa de alguns aeroportos como áreas de origem das emissões aumentará a um ritmo mais rápido do que o crescimento absoluto das emissões pelas quais são responsáveis. Dessa forma, as questões de eficiência ambiental terão que ser abordadas e avaliadas em tempo hábil que acompanhe e permita o desenvolvimento do setor.

Embora as emissões aeroportuárias não sejam limitadas somente aos gases de escape dos motores das aeronaves, com participações dos movimentos de veículos terrestres e aéreos e instalações fixas, fontes locais de emissões, em particular aquelas que possam ter um efeito adverso significativo para a qualidade do ar ou para as mudanças climáticas, terão que ser identificados e considerados nas estratégias de monitoramento e mitigação existentes e futuras. Logo, como uma das etapas fundamentais e bem-sucedidas para avaliar a poluição, simular o meio ambiente e desenvolver planos de gestão da poluição para as cidades é a criação de inventários de emissões (FAN et al., 2012).

Mesmo com diversos estudos que abordem a questão e tenham tentado quantificar e analisar as emissões dos aeroportos, a maioria deles considera apenas um ou um pequeno grupo de motores como fonte de emissão. Também, não são comuns abordagens que considerem as quantidades de gases do efeito estufa (GEE) geradas apenas dentro dos ciclos LTO, além das concentrações de material particulado (PM) emitidas, por não estarem disponíveis e não serem listadas no banco de dados da ICAO.

Por sua vez, as emissões do ciclo LTO surgem de diferentes modos de operação da aeronave. Cada modo impõe diferentes demandas de funcionamento ao motor, resultando em padrões discretos de emissão de poluentes, variando entre baixas e altas cargas para distintos gases. Portanto, um inventário detalhado e direcionado para as operações de um aeroporto, consegue revelar de uma forma técnica os pontos de eficiência de forma que permita aos pesquisadores avaliar o funcionamento e gerar previsões sobre a atividade local. Além disso, considerando a influência do aeroporto na qualidade do ar na cidade, dados que contribuam para a linha base da avaliação de poluição local em conjunto com a qualidade do ar geralmente

não estão amplamente disponíveis, ou estão dispersos o suficiente para dificultar a abordagem da questão de forma científica e sistemática. Assim, um inventário que contribua para esse tipo de investigação é especialmente importante em cidades com alto nível de desenvolvimento e atividade econômica.

Dentro deste contexto, a justificativa deste trabalho consiste na importância de se gerar um inventário e analisar suas estimativas e os efeitos potenciais dos resultados sob o aspecto da poluição local, tendo como base as atividades de pouso e decolagem. Envolve comparar os padrões de operação de cada aeroporto e avaliar pontos-chave que permitem melhorias de curto prazo. Desta forma, a contribuição do trabalho se concentra na avaliação e comparação de resultados relativos aos modos do ciclo LTO, e entre as atividades dos dois aeroportos pesquisados, visto que estão inseridos num contexto urbano de uma das maiores cidades do Brasil e da América Latina. O pesquisador ainda reconhece a importância deste tipo de trabalho nos principais aeroportos do Brasil, visto que há necessidade de desenvolver políticas que promovam a redução das emissões. Como apresentado na introdução, o transporte aéreo no Brasil ainda possui enorme margem para expansão, além de possuir um caráter integrador no desenvolvimento nacional (ABEAR, 2019), o que faz com que questões que impactem de forma negativa no setor serem de vital importância.

#### **1.4 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação de mestrado foi organizada em 7 (sete) capítulos, conforme descritos abaixo:

**Capítulo 01:** Capítulo introdutório, que foi subdividido em: introdução - inserindo o leitor na temática que será estudada e no foco do trabalho; formulação do problema - contextualização da problemática que motivou a escolha do tema de pesquisa; objetivos gerais e específicos - o que se pretende alcançar findada esta dissertação; justificativa - explicando a necessidade deste estudo; e, por fim, a estrutura da dissertação.

**Capítulo 02:** Traz uma revisão sistemática e revisão da literatura; para iniciar esta pesquisa, e a partir de uma seleção de palavras-chave, decidiu-se por realizá-la para poder identificar como a temática deste estudo está sendo trabalhada nas publicações em periódicos reconhecidos internacionalmente, e assim encontrar lacunas de estudo na área e métodos de condução para pesquisa. Da mesma forma, a revisão serviu de base para o entendimento das questões técnicas e políticas sobre o tema.



**Capítulo 03:** capítulo dedicado para a apresentação das metodologias escolhidas e elaboração do procedimento de inventário, para assim enumerar o passo-a-passo dos processos de quantificação e análise dos fatores que levam às emissões para cada aeroporto.

**Capítulo 04:** Este capítulo tem como objetivo iniciar o estudo dos aeroportos, apresentando as características locais que definem a região de estudo e os indicadores da qualidade do ar local. Serão identificados e verificados os pontos críticos que são impactados pela atividade aérea. Além disso, nesta seção serão definidos os procedimentos utilizados em cada aeródromo estudado, bem como o conceito dos ciclos de pouso e decolagem e como ele se aplica à realidade individual de cada aeroporto.

**Capítulo 05:** Neste capítulo, apresentamos os resultados obtidos a partir da aplicação do procedimento proposto no estudo de caso dos aeroportos, analisando-os como fontes emissoras e verificando o comportamento ao longo do tempo de avaliação. São realizadas discussões para analisar os resultados e fazer inferências sobre os pontos fortes e fracos, além de verificar qual aeroporto é mais eficiente.

**Capítulo 06:** Neste capítulo, são discutidas as políticas e opções para mitigação de emissões, aprofundando a análise dos resultados e debatendo os pontos críticos para encontrar as melhores soluções para o estudo de caso. Além disso, são apresentadas as limitações da pesquisa e discutidas estratégias para melhorar o impacto ambiental dos aeroportos e sua atividade aérea.

**Capítulo 07:** Neste capítulo, são apresentadas as conclusões gerais da dissertação, enfatizando os principais resultados e identificando tanto os aspectos positivos como as limitações da pesquisa. Além disso, são oferecidas sugestões para trabalhos futuros que possam aprimorar o entendimento do tema abordado, contribuindo para uma melhor gestão ambiental nos aeroportos e na atividade aérea em geral.

Por fim, são citadas as referências que foram utilizadas para a realização deste estudo.

## **2 REVISÃO SOBRE O IMPACTO DAS ATIVIDADES AÉREAS NA QUALIDADE DO AR URBANO**

A revisão bibliográfica desta dissertação foi elaborada para estruturar o problema e fornecer informações sobre seu histórico. Em seguida, foi feita uma análise das abordagens utilizadas por outros pesquisadores e suas metodologias, identificando lacunas no conhecimento e possíveis soluções para o estudo de caso. Para realizar esse processo, utilizou-se a metodologia da revisão sistemática, que é uma ferramenta que permite identificar como os temas relevantes estão sendo abordados.

A revisão sistemática realizada permitiu identificar as principais lacunas e desafios existentes na literatura, além de possibilitar a identificação de possíveis soluções para o estudo de caso dos aeroportos Santos Dumont e Galeão no Rio de Janeiro. Neste capítulo, serão apresentados os principais estudos já realizados sobre o tema, as principais metodologias empregadas e as principais conclusões alcançadas pelos pesquisadores.

### **2.1 O impacto do ciclo LTO e sua importância para o ambiente**

Quando avaliado as emissões aeronáuticas no meio ambiente, pode-se dividir as fases de voo em dois grupos: Ciclo LTO e não-LTO. O primeiro abrange a decolagem, subida, aproximação e o pouso, enquanto o segundo inclui a subida, o voo de cruzeiro e a descida. Essa divisão ocorre devido a variação do comportamento das emissões em relação à altitude em que ocorrem. Assim, todas as emissões que se dão nas proximidades dos aeroportos afetam direta e indiretamente a saúde humana e os ecossistemas. Logo, a importância das emissões gasosas nas operações de solo (ciclo LTO) são as mais relacionadas à poluição atmosférica e a qualidade do ar. As emissões nativas dos níveis mais elevados do voo (não-LTO) são aquelas que se relacionarão com os efeitos sobre o clima, uma vez que as aeronaves nessas fases emitem basicamente GEE e vapor d'água (AYGUN E CALISKAN, 2021; TOKUSLU, 2020; SIMONETTI ET AL., 2015; ROCHA, 2012).

O potencial impacto das operações aeroportuárias na qualidade do ar local está associado principalmente às atividades das aeronaves no solo, que são classificadas em vários modos, ou estágios, dentro do ciclo LTO pela Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO, 2020). No entanto, é importante observar que cada instalação aeroportuária possui características únicas que influenciam o volume de emissões durante o ciclo. Para entender a taxa de emissão de poluentes de um motor de aeronave, vários fatores devem ser considerados, incluindo as especificações do motor, modo de operação e layout do aeroporto, os quais

influenciam a duração do ciclo LTO (MAZAHERI et al., 2009; WOOD et al., 2008). Por exemplo, mais de 2000 kg de CO<sub>2</sub> podem ser emitidos durante os primeiros três minutos de decolagem e subida de uma aeronave categoria pesada (GŁOWACKI et al., 2021). Como resultado, é fundamental avaliar o impacto das atividades aeroportuárias na qualidade do ar.

A Organização de Aviação Civil Internacional (ICAO, 2016b) estipula que as emissões de todos os motores de aeronaves devem estar de acordo com as suas normas e serão medidas pelos ciclos de pouso e decolagem (LTO). Durante um ciclo LTO, as aeronaves realizam suas operações numa gama abaixo de 3000 pés sob o terreno, em determinadas condições certificáveis, onde, incluem-se quatro estágios em termos de potência de motor empregado que variam de 0 a 100% em tempos específicos por modo de operação (tempo em modo – TIM). A primeira fase do ciclo se inicia quando a aeronave desce da altitude de cruzeiro em direção à pista, atingindo a “final” de um procedimento por instrumentos e completando o pouso, processo que dura estimadamente 4 minutos e o regime de motor adotado é na casa dos 30%.

Na sequência do ciclo, após o pouso, a aeronave inicia suas operações terrestres e seu regime de motor muda para “idle” (marcha lenta), segue em baixa velocidade até o portão de desembarque/embarque, o que configura o táxi de entrada (taxi-in). Assim, permanece em aguardo para as operações de carga e descarga e novamente dá início às movimentações de saída, seguindo em direção à pista por vias determinadas configurando, então, o táxi de saída (taxi-out). Todo o processo em idle possui duração estimada em 26 minutos, nessa configuração de potência o motor emprega 7%. O ciclo segue com a decolagem, onde é empregado o regime de motor máximo (100%) por 0,7 minutos e, se encerra com a subida inicial da aeronave até ultrapassar a faixa de 3000 pés, o que se dá em 2,2 minutos com uma potência de 85%. O ciclo LTO foi exemplificado na figura 3.

Segundo MASIOL e HARRISON (2014), uma altura de 3000 pés denota a baixa troposfera, onde os poluentes emitidos ao nível do mar se misturam rapidamente. Portanto, como resultado, a regra do ciclo de pouso e decolagem (LTO) é usada para garantir que as aeronaves não excedam os limites ambientais para a gama de poluentes. No entanto, é importante observar que esse modelo tem limitações na operação no mundo real porque a potência do motor pode variar entre diferentes aeronaves e modelos, além de ser influenciada por condições meteorológicas, carga transportada, condições da pista e outros fatores.

Apesar dessas limitações, a metodologia do ciclo LTO (ICAO, 2016b) e o banco de dados ICAO (2021) são considerados referências importantes. Eles são obtidos pelo monitoramento da movimentação das aeronaves pelo setor de controle de tráfego aéreo, pilotos

e engenheiros aeronáuticos. Além disso, esses dados levam em consideração o perfil das Rotas de Chegada por Instrumentos Padrão (STARs), as cartas de Aproximação por Instrumentos (IACs) e as rotas de Saída por Instrumentos padrão (SIDs), que são os procedimentos publicados e seguidos pelas aeronaves antes de chegar e para partir de um aeroporto (MOKALLED et al., 2018).

As emissões do ciclo LTO dos motores de aeronaves pode ser tão significativo que afetará negativamente a qualidade do ar no aeroporto (GŁOWACKI et al., 2021). À medida que o transporte aéreo se expande, é fundamental avaliar o efeito ambiental das frotas de aeronaves e apresentá-las na literatura, principalmente em países que priorizam o crescimento econômico (EKICI E YASIN, 2021). Para entender melhor a qualidade do ar e o impacto ambiental das emissões de poluentes, são necessárias análises detalhadas com base em companhias aéreas e aeroportos. Além disso, é fundamental investigar em que medida as emissões dos ciclos LTO das aeronaves afetam o tráfego aéreo, qualidade do ar regional e a saúde humana, especialmente em áreas densamente povoadas. Mais pesquisas são necessárias para entender a relação entre transporte aéreo, emissões de gases de escape e qualidade do ar, a fim de promover o desenvolvimento sustentável do setor.

A partir do ciclo LTO, uma ampla gama de estudos aponta que as contribuições do setor de aviação para a degradação da qualidade do ar local atingem uma área de até 10 km (DODSON et al., 2009; HSU et al., 2012, 2013; LEE et al., 2010; MOKALLED et al., 2018; SCHUMANN; HUNTRIESER, 2007; YIM et al., 2015; ZHU et al., 2011). Além disso, as atividades do ciclo LTO podem ser mais complexas e impactar além do previsto a qualidade do ar nas vizinhanças (MASIOL E HARRISON, 2014; STETTLER ET AL., 2011).

YIM et al. (2015) demonstrou que determinados poluentes, em específico o material particulado (PM), podem ser atribuídos à aviação em mais de 20 km do aeroporto, no entanto, com o percentual caindo para uma participação de 6%. MOKALLED et al. (2018) aponta que para a análise do ciclo LTO, também é importante considerar a localização, topografia, variações do vento e layout das aproximações, já que todos esses fatores são importantes para o padrão de dispersão das emissões e podem ser agravantes, ou não, da qualidade do ar local.

ARUNACHALAM et al. (2011) utilizaram o modelo CMAQ (Community Multiscale Air Quality) para avaliar a influência das emissões de LTO de aeronaves comerciais nas concentrações de  $PM_{2,5}$  e nos riscos à saúde da população em três aeroportos nos Estados Unidos. Eles examinaram o impacto da resolução do modelo e da escala geográfica nos resultados, e, concluíram que os riscos de mortalidade estimados entre resoluções de 36 km e

12 km são semelhantes. Eles também observaram que uma parte significativa dos riscos à saúde se devia a contribuições secundárias de amônia e nitrato, que ocorreram mais de 300 km dos aeroportos.

Os estudos de (HSU et al., 2013; HUDDA et al., 2016; SABATIER et al., 2021; SHIRMOHAMMADI et al., 2018; TOKUSLU, 2020; VUJOVIĆ; TODOROVIĆ, 2017) distinguiram que as concentrações de determinados poluentes do ciclo LTO aumentaram em direta proporção ao aumento da quantidade de ciclos de pouso e decolagem. Tokuslu (2020) observou que um aumento de 50% nas frequências do ciclo LTO poderiam resultar em 55% até 60% mais emissões e continua degradação da qualidade do ar local. AGRAWAL et al. (2008) investigaram as taxas de emissão de hidrocarbonetos e material particulado (PM) de motores de turbina de aeronaves em diferentes níveis de potência. Eles constataram que as emissões de hidrocarbonetos eram mais elevadas em condições de marcha lenta (idle), enquanto as emissões de PM eram mais elevadas nos níveis de potência mais altos relacionados à decolagem e pouso. Eles também verificaram que o carbono elementar representava uma fração maior do PM à medida que a potência aumentava.

Em conformidade com essa literatura, as consequências dos ciclos LTO podem ser avaliadas usando eficientemente a técnica da ICAO (2016b) e considerando outros fatores como mix de aeronaves e condições climáticas. EKICI E YASIN (2021) realizaram um estudo sobre o efeito ambiental e econômico das emissões de gases de escape de aeronaves no Aeroporto Internacional de Antalya, na Turquia, durante o mês de julho de 2018, que correspondeu ao período de pico do tráfego aéreo. Eles usaram dados de medições em tempo real fornecidas pelo Ministério dos Transportes e Infraestrutura da Turquia para determinar que a família de aeronaves B737 foi a que mais contribuiu para a poluição atmosférica entre todos os tipos de aeronaves e rotas aéreas que operam no aeroporto.

Os estudos também apontam que a proximidade dos aeroportos com áreas residenciais exige um maior controle das concentrações de poluentes, com valores rígidos e investigações para descrever e estabelecer os efeitos potenciais sobre a saúde daqueles que estão nas proximidades. Além disso, os estudos sugerem que sejam adotadas medidas de mitigação das emissões de aeronaves no solo, como o uso de combustíveis alternativos, a otimização das rotas de taxiamento e a redução do tempo de espera nas pistas.

## 2.2 Métricas de avaliação e suas limitações

### 2.2.1 Avaliação do ciclo LTO

Para obter um inventário de emissões atmosféricas de aeronaves confiável, diversas variáveis devem ser levadas em conta. O combustível utilizado (querosene, gasolina ou biodiesel), o modelo da aeronave, o tipo de motor, a potência utilizada em diferentes fases do voo e a altitude atingida são apenas algumas das informações necessárias para calcular as emissões (ROCHA, 2012). Além disso, é fundamental conhecer o número de pousos e decolagens em um determinado aeroporto, bem como a rota percorrida durante o voo e os fatores de emissão específicos de cada tipo de motor utilizado.

Devido à complexidade dessa tarefa, várias metodologias têm sido desenvolvidas para padronizar os procedimentos e garantir a confiabilidade dos resultados obtidos. Essas técnicas são importantes para possibilitar a comparação entre diferentes inventários de emissões e garantir que as informações obtidas sejam precisas e úteis para tomadas de decisão em políticas públicas e na indústria aeronáutica. Seguindo a abordagem da ICAO (2016b), a avaliação dos impactos da aviação é conduzida através de três passos principais, que englobam desde a quantificação das emissões até a determinação dos impactos no ambiente atual, considerando a incerteza presente em cada etapa do processo. É crucial destacar que a relação entre as emissões da aviação e a mudança na concentração de compostos no ambiente também depende da magnitude de outras fontes poluidoras, tornando imprescindível a inclusão das emissões da aviação no contexto geral das emissões atmosféricas.

As emissões da aviação afetam o clima de diferentes formas, e é preciso usar indicadores adequados para comparar seus impactos. Esses indicadores são chamados de métricas climáticas, e podem ser baseados na radiação, na temperatura ou em ambos. Cada métrica tem suas vantagens e limitações, e os resultados podem mudar muito dependendo de como elas são usadas. Por isso, é importante usar as métricas climáticas com consistência e transparência, e considerar os aspectos físicos e éticos envolvidos.

GREWE e DAHLMANN (2015) encontraram quatro principais métricas climáticas em seu estudo: forçante radiativa (RF), potencial de aquecimento global (GWP), potencial de temperatura global (GTP) e resposta de temperatura média (ATR). O RF mede a mudança na radiação causada por uma mudança na concentração de um determinado tipo de emissor, enquanto o GWP representa a soma dos efeitos futuros do RF em relação à concentração atual do emissor em um período especificado. Da mesma forma, o GTP avalia a variação da temperatura global causada por variações na concentração de emissores em um determinado

horizonte de tempo. O ATR, por outro lado, mede a mudança na temperatura média causada por uma emissão instantânea de um determinado tipo de emissor.

O estudo de DESSENS et al. (2014) aponta para três métricas amplamente utilizadas para avaliar os impactos do setor de transporte no meio ambiente: Forçamento Radiativo (RF), Potencial de Aquecimento Global (GWP) e Potencial de Temperatura Global (GTP). Contudo é fundamental enfatizar que essas métricas possuem vantagens e limitações, e os resultados obtidos podem variar consideravelmente em função da escolha de perfil, horizonte de tempo, cenário de emissão e incertezas científicas. WOOD et al. (2008) destaca que a avaliação das emissões de motores de aeronaves deve atender aos padrões de certificação da Organização Internacional de Aviação Civil (ICAO)

No estudo de AKYUZ (2022), os valores de GWP, impacto ambiental (EI) e ecocusto foram utilizados para determinar e comparar as emissões totais e por passageiro de HC, CO, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> durante o ciclo de pouso e decolagem de aeronaves antes e durante a pandemia de COVID-19, com base em dados reais de voos e do Banco de Dados de Emissões de Motores da Organização Internacional de Aviação Civil. Os resultados sólidos do estudo mostraram a viabilidade de calcular as emissões de poluentes causadas por aeronaves no ciclo LTO e a comparação das emissões totais e por passageiro.

AKDENIZ (2022) estimou as emissões de óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) durante as operações de pouso e decolagem (LTO) de voos domésticos e internacionais, e estimou seus impactos ambientais e econômicos. O estudo analisou as emissões de NO<sub>x</sub>, CO e HC geradas por aeronaves, juntamente com as estimativas de Potencial de Aquecimento Global (GWP) das emissões de exaustão e as estimativas de Impacto Ambiental (EI), com base nas metodologias da ICAO e IPCC. As emissões totais de poluentes atmosféricos das aeronaves foram estimadas em 601.067 kg/ano para HC, 6.074.905 kg/ano para CO e 4.156.391 kg/ano para NO<sub>x</sub> no aeroporto. O estudo também mostrou que as emissões de voos internacionais representam 79% das emissões totais de todos os voos. O GWP do A321 foi estimado em 1.066,29t CO<sub>2</sub>, enquanto o GWP do B738 foi de 719,50 t CO<sub>2</sub>. Além disso, os valores de ecocusto das aeronaves do tipo A321, B738, A320 e CL60 foram estimados em quase 61.049,42, 41.086,02, 18.417,43 e 6.163,59 euros, respectivamente.

DORBIAN et al. (2011) utilizaram as métricas de Potencial de Aquecimento Global (GWP) e Potencial de Temperatura Global (GTP) e estimativas de Impacto Ambiental (EI), juntamente com a metodologia de cálculo da ICAO e seu banco de dados de emissões, para avaliar a redução dos impactos não-CO<sub>2</sub> na qualidade do ar e no clima. Os resultados indicaram

que os custos climáticos e os custos da qualidade do ar são de magnitude semelhante abaixo de 3.000 pés.

No Aeroporto de Ordu-Giresun, na Turquia, as emissões das operações das aeronaves foram analisadas usando as fases do ciclo LTO definidas pela ICAO. O estudo de ORHAN (2021) estimou as emissões totais anuais de CO, HC e NO<sub>x</sub> em 150,68 t/ano, com o taxiamento emitindo a maior parcela. Os resultados mostraram a maior emissão de CO durante a decolagem, a maior emissão de HC durante o taxiamento e a maior emissão de NO<sub>x</sub> durante a subida. O estudo estimou um consumo de combustível de aproximadamente 6.551,52 toneladas para o ciclo LTO em 2017.

Outras métricas padronizadas pela ICAO são amplamente utilizadas para avaliação de emissões específicas. WINTHER et al. (2015) estimou as emissões de NO<sub>x</sub> e partículas (massa e números) no Aeroporto de Copenhague, usando o método FOA3.0. O artigo mostrou que o enxofre no combustível de aviação é responsável por mais da metade das emissões de partículas dos motores das aeronaves. O estudo recomendou usar dados locais sobre o conteúdo de enxofre do combustível e a atividade dos motores para estimar as emissões de partículas com mais precisão. UNAL et al. (2005) utilizou uma abordagem abrangente para avaliar o impacto o impacto do Aeroporto Internacional Hartsfield-Jackson. Estimou as emissões de PM em função do número de fumaça (SN) e das taxas de fluxo de combustível da ICAO, para diferentes tipos de motores em diferentes modos de operação. Assim, indicou que os impactos de PM<sub>2,5</sub>, neste caso, são cerca de 1 µg m<sup>-3</sup> dentro de um raio de 16 km ao redor do aeroporto.

É importante destacar que os estudos avaliados demonstram que as métricas ambientais utilizadas em conjunto com a metodologia da ICAO podem produzir resultados sólidos e confiáveis na avaliação do impacto das atividades aéreas na qualidade do ar local. No entanto, é importante reconhecer que existem limitações que precisam ser avaliadas para uma compreensão mais completa dos resultados obtidos. Dentre essas limitações, podemos citar a falta de dados precisos e atualizados sobre a frota de aeronaves e as atividades dos motores, bem como a incerteza associada à modelagem das emissões e à escolha das métricas adequadas. Portanto, para garantir uma avaliação ambiental mais precisa e completa das atividades aéreas, é necessário continuar investindo em pesquisas que aprimorem a metodologia de cálculo das emissões e a coleta de dados relevantes, para que os resultados obtidos sejam ainda mais robustos e confiáveis.



### 2.2.2 Limitações nas avaliações de emissões

As avaliações ambientais da prática aeronáutica podem apresentar variações significativas dependendo do objetivo e do contexto. Para garantir a precisão das medições e o gerenciamento adequado das emissões, é fundamental abordar as limitações existentes nas estimativas de emissões em diferentes contextos. Vários estudos apontam para a importância de avaliar a qualidade e a confiabilidade dos dados de emissão, bem como os fatores que podem influenciar as emissões, como o tipo de combustível, as condições operacionais e o perfil da frota de aeronaves. É essencial que os métodos de avaliação ambiental sejam aprimorados continuamente para que as estimativas de emissões sejam cada vez mais precisas e confiáveis.

A obtenção de inventários de emissões aeroportuárias confiáveis é limitada pela falta de informações operacionais precisas das aeronaves. Por exemplo, os regulamentos da ICAO não distinguem entre as emissões de NO e NO<sub>2</sub>, apenas o NO<sub>x</sub> total é especificado. No entanto, a especificidade dessas emissões é importante em termos de toxicidade (WOOD et al., 2008). Além disso, é importante notar que os valores padrão da ICAO para os parâmetros operacionais de um ciclo LTO, como o tempo gasto e os níveis de empuxo usados em cada fase, podem variar consideravelmente em relação aos valores reais usados nos aeroportos.

Embora estudos tenham mostrado diferenças significativas nas emissões de motores idênticos em aeronaves iguais, a falta de dados operacionais individuais disponíveis para decolagens é uma limitação importante (CARSLAW et al., 2008). Além disso, as características de dispersão de campo próximo das plumas de jato de aeronaves também são parcialmente compreendidas, devido à falta de pesquisas de campo que busquem concentrações absolutas, em vez de apenas nos índices de emissão.

Estudos de caracterização de emissões em terrenos aeroportuários tem buscado desenvolver fatores de emissão que possam ser generalizados e potencialmente aplicados em diversos modelos de dispersão atmosférica (AGRAWAL et al., 2008). Mesmo demonstrando um potencial de poluição significativo associado às condições de alto empuxo durante decolagens, é necessário preencher a lacuna entre esses estudos e o monitoramento ambiental (DIEZ et al., 2012). É essencial quantificar as contribuições relativas das fontes de emissão para as concentrações no campo próximo.

Isso requer um esforço conjunto entre pesquisadores, autoridades aeroportuárias e reguladores para desenvolver metodologias de medição confiáveis e padronizadas. Com isso, poderemos obter uma compreensão mais abrangente e precisa dos impactos ambientais da aviação e tomar medidas mais eficazes para minimizá-los. HERNDON et al. (2004) sugere o

uso de técnicas que permitam coletar dados em diferentes condições operacionais das aeronaves, tais como o tempo ocioso, o tempo em taxiway e a duração da decolagem. Esses experimentos podem aprimorar os modelos e as avaliações das emissões do aeroporto no contexto da qualidade do ar urbano, reduzindo as principais incertezas na quantificação das emissões.

Estudos como GROBLER et al. (2019) e EVANS e SCHÄFER (2014) que tentaram avaliar as mudanças marginais nos inventários de emissões e as respostas das cias aéreas às restrições de capacidade enfrentaram diversas incertezas que dificultaram a assimilação dos resultados. As modificações nas tecnologias do motor ou combustível das aeronaves, respostas a fatores climáticos, alterações no tamanho da aeronave usada para atender a esses mercados, alterações nas malhas de voo que operam e alterações em seus horários de voo são apenas algumas das incertezas que influenciam os resultados. A falta de modelos que contemplem esses dados, bem como a disponibilidade limitada de dados, apresenta grandes desafios para os pesquisadores no futuro.

### **2.3 Poluição Atmosférica e a Qualidade do Ar**

Um dos principais problemas ligados ao transporte aéreo, que tem ganhado destaque devido sua particularidade, são as emissões de gases e sua contribuição para qualidade do ar (CENTRACCHIO ET AL., 2018; HENKES E PÁDUA, 2017; MASIOL E HARRISON, 2014; RIBEIRO, 2008; SCHUMANN, 1994; RAPER ET AL., 1970). A poluição é definida como a presença de contaminantes ou substâncias poluentes na atmosfera que interferem na saúde ou no bem-estar humano ou causam outros efeitos nocivos ao meio ambiente (VALLERO, 2007). A ICAO (2020) descreve a qualidade do ar local como a condição do ar ambiente na qual os seres humanos e a natureza estão expostas, onde, na maioria das vezes, é mensurada pela concentração de poluentes. Estes valores, quando comparados com os regulamentos locais, estabelecem e definem os níveis aceitáveis de qualidade do ar local, inclusive os meios para alcançá-los.

A aviação é uma fonte significativa de poluição atmosférica e pode ter uma influência negativa na qualidade do ar nas áreas próximas aos aeroportos. Além disso, a exposição das pessoas a altos níveis de ruído, poluição do ar e risco de acidentes aéreos é uma grande preocupação em termos de saúde e segurança pública. As emissões de gases de efeito estufa da aviação também contribuem para o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio,

resultando em efeitos negativos na saúde humana e no meio ambiente em todo o mundo (JANIĆ, 1999).

A rápida expansão da atividade aeronáutica coincidiu com o aumento da poluição atmosférica, reconhecida pelas autoridades internacionais como a maior ameaça à saúde ambiental. Essa poluição é um fator de risco para uma variedade de doenças, incluindo câncer, doenças cardíacas e acidentes vasculares cerebrais, e contribui para uma maior taxa de mortalidade, além de um alto custo econômico para a sociedade (WHO, 2021; ROY E BRAATHEN, 2017).

A composição química dos gases de escape emitidos pelos motores das aeronaves varia significativamente ao longo de uma ampla gama de níveis de empuxo utilizados em aeroportos, como voo lento e decolagem. No entanto, a influência dessas emissões de compostos orgânicos voláteis, material particulado e óxidos de nitrogênio na qualidade do ar local e regional permanece desconhecida (WOOD et al., 2008). No entanto, para que a discussão sobre a qualidade do ar e os efeitos da expansão da aviação seja produtiva, as emissões e os poluentes devem ser quantificados em escala regional.

As emissões dos motores das aeronaves incluem diversos gases como dióxidos de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxidos de carbono (CO), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), dióxidos de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), material particulado (PM), hidrocarbonetos (HC) e compostos voláteis (sulfato e carbono orgânico), com alguns desses gases se transformando em outros poluentes devido a reações químicas e físicas na atmosfera (AYGUN E CALISKAN, 2021; STETTLER ET AL., 2011). Para obter uma compreensão completa da influência das emissões do aeroporto na qualidade do ar local e regional, é necessária uma contabilidade precisa das emissões e o entendimento dos seus efeitos (WOOD et al., 2008). Levando em consideração os compostos químicos liberados pelas aeronaves, é possível avaliar seus efeitos conforme a tabela abaixo.

**Tabela 1** - Impactos potenciais principais dos compostos químicos emitidos por aeronaves na atmosfera

<b>Composto Químico</b>	<b>Impacto</b>
<b><math>\text{CO}_2</math></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Forçante radiativa no infravermelho e impacto climático associado.</li> </ul>
<b><math>\text{H}_2\text{O}</math></b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Forçante radiativa no infravermelho e impacto climático associado;</li> <li>● Formação de trilhas de condensação e nuvens cirrus e impacto climático associado;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Formação de nuvens estratosféricas polares e impacto relacionado à química heterogênea;</li> <li>● Formação de HO<sub>x</sub> e impacto sobre a química atmosférica.</li> </ul>
NO <sub>x</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Formação de ozônio na troposfera superior e impacto climático associado;</li> <li>● Aumento na quantidade de radicais hidroxilas troposférico;</li> <li>● Elevação catalítica da destruição do ozônio na estratosfera média e impacto climático associado;</li> <li>● Redução da depleção do ozônio estratosférico pelo HO<sub>x</sub>, ClO<sub>x</sub>, BrO<sub>x</sub> e impacto climático associado;</li> <li>● Conversão a HNO<sub>3</sub> e formação de nuvens polares estratosféricas Tipo I com potencial ativação de cloro na atmosfera</li> <li>● e depleção do ozônio.</li> </ul>
CO	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Perturbação do ozônio troposférico e balanço do HO<sub>x</sub>.</li> </ul>
SO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Formação de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> em plumas recém-emitidas;</li> <li>● Formação de aerossóis sulfatados e impacto climático associado;</li> <li>● Mudança nas propriedades das nuvens cirrus e impacto climático associado;</li> <li>● Ativação de fuligem como núcleo de condensação de nuvens e núcleos de gelo;</li> <li>● Aumento na área superficial de partículas com redução do NO<sub>x</sub>, ativação de cloro e depleção de ozônio.</li> </ul>

**Fonte:** ROCHA (2012)

O coquetel de emissões provenientes das aeronaves tem uma grande contribuição para a mudança climática, pois aquece a atmosfera por meio de um forçamento radiativo que é cerca de três vezes mais forte do que o dióxido de carbono isoladamente (IPCC, 2006). Isso ocorre devido ao efeito geral de absorção e reflexão no equilíbrio da radiação solar incidente e da radiação térmica emitida de volta para a atmosfera superior. Como por exemplo, ELBIR (2008) destaca que embora os motores de aeronaves contribuam apenas com cerca de 1% das emissões totais de NO<sub>x</sub> na fonte móvel nos Estados Unidos, em algumas áreas de aeroportos, o transporte aéreo pode contribuir com até 4% das emissões de NO<sub>x</sub>.

A fim de proteger a saúde pública e o meio ambiente, padrões de emissão de aeronaves foram implementados há cerca de 30 anos e se aplicam a todas as aeronaves comerciais. Ao longo dos anos, esses padrões de emissão foram atualizados para lidar com diferentes aspectos dos motores de aeronaves (GARDNER et al., 1997). No entanto, é importante continuar monitorando e atualizando os padrões de emissão de aeronaves para minimizar o impacto ambiental dessa indústria em constante crescimento. As emissões de gases e partículas provenientes da queima de combustíveis fósseis pelos motores das aeronaves afetam a composição química e física da atmosfera, alterando o balanço radiativo e a saúde humana. Essas espécies de poluentes emitidos têm diferentes tempos de vida e distribuições espaciais na atmosfera, bem como diferentes efeitos sobre o clima e a qualidade do ar. Portanto, é importante quantificar e comparar os impactos atmosféricos da aviação por tipo de emissão, altitude e localização.

O estudo conduzido por GROBLER et al. (2019) evidenciou que as emissões da aviação impactam significativamente tanto o clima quanto a qualidade do ar, com três componentes responsáveis por 97% dos danos por unidade de queima de combustível: NO<sub>x</sub> em 58%, CO<sub>2</sub> em 25% e rastros em 14%. Além disso, o estudo apontou que os efeitos nas condições do ar devido às emissões da aviação superam consideravelmente os impactos climáticos, com os ciclos de decolagem e pouso apresentando um impacto na qualidade do ar até 4,4 vezes maior do que no clima, por unidade de queima de combustível. Tais descobertas devem ser levadas em consideração ao se desenvolver estratégias para mitigar os impactos ambientais da aviação, considerando as diferentes fases do voo e as espécies poluentes envolvidas

SCHÄFER e WAITZ (2014) estimam que, devido à grande escala do sistema de transporte aéreo, os danos globais anuais ultrapassam US\$ 1 bilhão em termos de poluição e ruído e, até dez vezes mais em relação às mudanças climáticas. Embora, em um nível agregado, os danos causados pelas mudanças climáticas sejam predominantes, os danos relacionados à poluição e ruído das aeronaves são altamente específicos do local. Os moradores que vivem nos limites do aeroporto são mais afetados pelos custos relacionados à poluição do ar e sonora das aeronaves, enquanto os custos relacionados às mudanças climáticas são mais altos para aqueles que vivem mais distantes dos aeroportos.

Os impactos decorrentes das emissões de gases poluentes e gases de efeito estufa (GEE) geram consequências significativas tanto para a saúde pública quanto para o clima, tornando imperativa a adoção de políticas sustentáveis para a mitigação desses efeitos. Diante disso, o Estado enfrenta diversas pressões relacionadas à qualidade do ar nas proximidades dos

aeroportos, incluindo restrições de desenvolvimento, aumento da conscientização sobre os impactos na saúde e a introdução de novas leis, bem como a expectativa pública em relação aos níveis de qualidade do ar (ICAO, 2020). A gravidade da situação é agravada pelo potencial impacto da aviação no clima, além das questões relacionadas ao ruído aeronáutico e à economia do setor, o que exige medidas regulatórias e econômicas específicas e aumenta o compromisso com a qualidade do ar nas proximidades dos aeroportos.

#### 2.4 Impactos da atividade aérea na saúde pública

A poluição do ar, que causa mais de sete milhões de mortes por ano, é a mais significativa e especificamente relacionada aos impactos na saúde (ASEEL et al., 2021). Quase 90% da população urbana em todo o mundo está exposta à poluição que não atende às diretrizes da Organização Mundial da Saúde para a qualidade do ar (WHO, 2021). A condição do ar tem uma influência significativa na saúde humana, afetando principalmente os sistemas respiratório, circulatório e neurológico. A exposição a poluentes ocorre, principalmente, pela respiração, e alguns desses poluentes podem interferir nas funções pulmonares, comprometendo a saúde das pessoas expostas (VALLERO, 2007).

A poluição atmosférica pode causar uma variedade de efeitos negativos na saúde, desde simples irritações oculares até morte prematura. Em muitos casos, a poluição do ar pode agravar doenças já existentes, aumentando o risco de infecções ou o desenvolvimento de doenças respiratórias crônicas (PIRES, 2005). Além disso, certos poluentes atmosféricos estão associados a efeitos específicos na saúde, conforme apresentado na tabela a seguir.

**Tabela 2 - Efeitos dos Poluentes à Saúde**

<b>Poluente</b>	<b>Efeitos à Saúde</b>
<b>Material Particulado (PM)</b>	Aumenta a mortalidade geral; adsorve e carrega poluentes tóxicos para as partes profundas do aparelho respiratório; na presença de SO <sub>2</sub> , aumenta a incidência e a severidade de doenças respiratórias; pode contribuir para o desenvolvimento de doenças cardiovasculares.
<b>Monóxido de Carbono (CO)</b>	Interfere no transporte de oxigênio pelo sangue; diminui reflexos; afeta a discriminação temporal; exposições de longo prazo podem agravar arteriosclerose e doenças vasculares.

<b>Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)</b>	Agrava sintomas de doenças cardíacas e pulmonares; bronco constritor especialmente em combinação com outros poluentes; aumenta a incidência de doenças respiratórias agudas.
<b>Dióxido de Nitrogênio (NO<sub>2</sub>)</b>	Altas concentrações podem ser fatais; em baixas concentrações pode aumentar a suscetibilidade a infecções; causa irritação pulmonar, bronquite e pneumonia; contribui para o desenvolvimento de doenças cardiovasculares.
<b>Ozônio (O<sub>3</sub>)</b>	Irritação nas mucosas do sistema respiratório ocasionando tosse e prejuízo à função pulmonar; reduz a resistência a gripes e outras doenças como pneumonia; agrava doenças cardíacas, asma, bronquites e enfisemas.

**Fonte:** Adaptado de PIRES (2005)

A degradação da qualidade do ar causada pela atividade aérea é um problema de saúde pública, pois aumenta o risco de mortalidade e morbidade da população exposta aos poluentes emitidos no ciclo de pouso e decolagem (LTO) (WHO, 2021). Por exemplo, estima-se que as emissões de aeronaves no regime LTO sejam responsáveis por 650 mortes prematuras na América do Norte, o que corresponde a 43% do total de impactos na saúde atribuídos à aviação na região, com um custo monetário de US\$ 3,07 bilhões (ASHOK et al., 2017; YIM et al., 2015).

A exposição a longo prazo aos poluentes emitidos pelos aeroportos pode causar efeitos deletérios na saúde humana, levando a graves problemas de saúde, como doenças respiratórias, cardíacas, derrames e câncer de pulmão (SILVA, 2018). Estudos mostram que pequenos volumes de gases do ar ambiente podem ter efeitos substanciais na incidência de doenças respiratórias locais. Numa quantificação das emissões de PM<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> e NO<sub>2</sub> atribuíveis ao ciclo LTO, ARTER et al. (2022) mostrou que as mortes prematuras de PM 2,5 e NO 2 atribuíveis ao LTO aumentaram de 2011 a 2016, sendo o NO<sub>2</sub> responsável por 91% do total de mortes prematuras.

De acordo com um estudo LOBO et al. (2012) que utilizou o modelo Community Multiscale Air Quality, há a projeção para determinadas emissões aumentarem em um fator de 4%. Essa é uma tendência alarmante, pois as emissões de material particulado fino durante a decolagem e aterrissagem de aeronaves comerciais podem ter um impacto significativo na qualidade do ar local e regional, bem como na saúde pública. O estudo também previu que os impactos na saúde relacionados à aviação dobrariam quando consideradas as emissões de material particulado fino isoladamente.

SCHLENKER e WALKER (2015) descobriu que o monóxido de carbono (CO) está levando a aumentos significativos nas taxas de hospitalização por asma, doenças respiratórias e admissões em emergências relacionadas ao coração em uma ordem de grandeza maior do que as estimativas convencionais. Esses resultados são especialmente alarmantes, considerando que um aumento de um desvio padrão nos níveis diários de poluição leva a um adicional de US\$ 1 milhão em custos de hospitalização para internações relacionadas a problemas respiratórios e cardíacos para os 6 milhões de indivíduos que vivem a 10 km dos 12 maiores aeroportos da Califórnia.

O estudo também destacou que bebês, idosos e adultos são igualmente afetados pelos impactos na saúde causados pelo CO, não pelo NO<sub>2</sub> ou O<sub>3</sub>. Os resultados sugeriram que pode haver benefícios consideráveis de morbidade na redução do padrão de CO existente. Portanto, é crucial que sejam implementadas medidas eficazes para reduzir a emissão de CO nos aeroportos, a fim de proteger a saúde pública e evitar custos desnecessários relacionados a internações hospitalares.

Logo, é crucial que a compreensão das emissões das aeronaves comerciais em operações LTO normais e que seus impactos na qualidade do ar local e regional e na saúde pública sejam avaliados. Os dados obtidos de inventários e monitoramentos também podem ser úteis para entender os potenciais impactos das operações LTO do aeroporto nas comunidades vizinhas.

## 2.5 Medidas regulatórias sobre a qualidade do ar e a poluição

As legislações sobre a qualidade do ar e poluição atmosférica, geralmente, baseiam-se na necessidade de proteger a saúde e o meio ambiente, com os Estados desenvolvendo suas diretrizes de acordo com suas necessidades. A tabela 3 demonstra a variabilidade dos padrões aplicados de concentração de poluentes, eles especificam o número aceitável de cada local com base nas orientações da OMS.

**Tabela 3** - Limites de qualidade do ar em diferentes países

País/ BLOCO	Poluentes (período de amostragem)				
	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	CO (µg/m <sup>3</sup> )	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )



	1 h	24 h	Anual	1 h	24 h	Anual	1 h	8 h	1 h	8 h	24 h	24 h	Anual
<b>OMS</b>	-	20	-	200	-	40	30	10	-	100		50	20
<b>EU</b>	350	125	-	200	-	40	-	10	-	120	-	50	40
<b>BRAZIL</b>	-	365	80	320	-	100	40	10	160	-	50	-	-
<b>CHINA</b>	150	50	20	200	80	40	10	-	160	100	-	50	40
<b>EUA</b>	210	-	-	200	-	100	43	10	-	160	-	150	50

**Fonte:** (WHO, 2021; ICAO, 2020)

Com o aumento da urbanização e o fato de os aeroportos atraírem novas áreas de desenvolvimento, os países devem gerir para que os limites de poluentes não sejam violados, além de revisar periodicamente se os valores ainda se adequam para realidade local. Como foi apresentado, os valores brasileiros são do início da década de 90 e são os que demonstram os maiores limites de concentração de poluentes, imbuindo de maior importância a avaliação de qualidade do ar e eficiência das principais fontes emissoras.

No Brasil, ao contrário dos EUA, Europa ou China, não há uma regulamentação federal dedicada exclusivamente à qualidade do ar. Em vez disso, a Lei 6.938/1981 (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2015) estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), que visa proteger a qualidade ambiental propícia à vida, incluindo a qualidade do ar. A lei estabelece objetivos, fins e negociações para a formulação e aplicação de políticas ambientais no Brasil, com o objetivo de preservar, melhorar e recuperar a qualidade ambiental e garantir condições para o desenvolvimento socioeconômico, a segurança nacional e a proteção da vida humana, respeitando os princípios da Constituição Federal.

Embora a lei inclua a avaliação de impactos ambientais, o licenciamento e a fiscalização de atividades potencialmente poluidoras, ela não é direcionada para nenhuma área específica, permitindo que os órgãos administradores e concessionárias atuem de forma abrangente para combater o excesso de emissões. No entanto, essa falta de regulamentação específica pode levar a uma lacuna na proteção da qualidade do ar e à necessidade de medidas mais eficazes para combater a poluição do ar no país

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão colegiado responsável por adotar medidas normativas e deliberativas em prol da proteção ambiental no Brasil, criado pela Lei Federal nº 6.938/81. Embora seja o principal órgão em política ambiental no país, o CONAMA não possui poder fiscalizador e suas responsabilidades são compartilhadas com diversas instituições. A colaboração entre os governos federal e estaduais é vista como fraca e conflituosa, o que dificulta a implementação de ações efetivas de proteção ambiental (OCDE, 2021). Para aprimorar a atuação do CONAMA, é fundamental fortalecer os vínculos entre os diferentes níveis de governo e garantir uma maior cooperação entre as instituições responsáveis pela proteção do meio ambiente.

A Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro aprovou duas leis relevantes para a proteção do meio ambiente: a Lei nº 5.248 de 27 de Janeiro de 2011 (RIO DE JANEIRO, 2011), que estabelece metas de redução de gases de efeito estufa (GEE), e a Lei nº 7.315, de 26 de abril de 2022 (RIO DE JANEIRO, 2022), que reconhece o Estado de Emergência Climática global e se compromete com a transição para uma economia livre de combustíveis fósseis, além de planejar e implementar políticas públicas locais para mitigação e adaptação à mudança climática, com prioridade para as comunidades vulneráveis. Esses marcos legais são importantes para permitir que o município estabeleça estratégias e ações efetivas para proteger o sistema climático. No entanto, essas leis focam apenas na redução de GEE, não há determinações específicas para a redução de poluentes atmosféricos, além daquelas previstas na Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA).

No Brasil, a principal fonte de poluição do ar nas grandes cidades é o transporte. Portanto, é urgente a necessidade de regulamentar os poluentes das principais fontes, como transporte, indústria e produção de energia, de acordo com os padrões mais rigorosos. Nesse sentido, o governo brasileiro deve buscar utilizar todos os recursos disponíveis para diminuir a concentração de poluentes atmosféricos nos centros urbanos, já que isso significa salvar vidas e aumentar a qualidade de vida de milhares de pessoas, resultando em milhões de dólares em ganhos para a economia brasileira (ABE et al., 2016).

No entanto, a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) aponta que há potencial para coordenar melhor as licenças entre os níveis de governo, utilizando recursos financeiros e humanos para monitorar e fazer cumprir as licenças ambientais que variam amplamente em todo o país (OCDE, 2021). Portanto, é necessário que haja uma regulamentação mais específica da poluição do ar no Brasil, para garantir que as emissões sejam controladas e reduzidas de forma mais efetiva.

## 2.6 Estratégias de mitigação para atividade aérea e suas emissões

Existem várias medidas que podem ser adotadas para reduzir as emissões de aeronaves no ciclo LTO. BENOSA et al. (2018) quantificou os impactos ambientais da aviação e apresentou estratégias de mitigação para reduzir esses impactos. Três estratégias foram apontadas: redução do tempo de táxi; eletrificação do equipamento de apoio; e implementação de combustíveis alternativos. A implementação simultânea dessas estratégias reduziu em 36% e 32% a exposição da população ao PM, no verão e no inverno respectivamente. As emissões de HC e NO<sub>x</sub>, apresentaram redução com a diminuição do tempo em táxi e a eletrificação de equipamentos. O uso de combustíveis alternativos reduziu as emissões de SO<sub>x</sub> e PM. Todavia, esses ganhos foram acompanhados de um aumento de 16% nos impactos do O<sub>3</sub>, o que mostra que mais pesquisas são necessárias para avaliação dessas estratégias e sua viabilidade.

O planejamento das atividades de superfície nos aeroportos é uma das estratégias para redução de custos e emissões de gases poluentes. ELBIR (2008) destaca diversas opções para isso, como o uso de pistas de táxi de alta velocidade, reboque de aeronaves, restrições a determinados tipos de aeronaves, melhorias nas áreas de parada e o taxiamento com operação mínima do motor. Segundo o autor, o tempo de táxi tem um alto impacto nos níveis de emissão, o que indica a importância de se considerar esse fator no planejamento das operações.

ZHANG et al. (2022) destaca a mistura de combustíveis convencionais com alternativos como uma forma promissora de reduzir as emissões de partículas não voláteis. Para otimizar esses ganhos, é necessário investir em fontes renováveis ou sintéticas. No entanto, é importante realizar mais testes para verificar os efeitos das emissões em condições específicas e o uso de melhores métodos para medição das emissões.

TEOH e KHOO (2016) enfatizam que a sustentabilidade ambiental do setor aéreo requer uma combinação de medidas que envolvem todos os atores do sistema, desde os planejadores até os operadores. Essas medidas incluem políticas públicas, tecnologias mais eficientes e limpas nas aeronaves, otimização da frequência e da trajetória dos serviços e conscientização dos consumidores sobre opções mais sustentáveis de transporte. Com uma abordagem integrada, é possível reduzir significativamente os impactos ambientais da aviação.

YOON e JEONG (2018) examinaram quatro políticas recomendadas pela ICAO para redução de emissões de CO<sub>2</sub> e constataram que nenhuma delas foi eficiente em termos de resolução econômica e ambiental. As políticas avaliadas incluíam acordos voluntários, esquemas de comércio de emissões, taxas de emissões e imposto de carbono. Embora o

esquema de comércio de emissões tenha apresentado melhores retornos, os autores alertam para a presença de muitos fatores de incerteza devido aos múltiplos cenários possíveis, o que pode causar desvios nos resultados.

O debate em torno da eficácia de diferentes políticas de redução de emissões de CO<sub>2</sub> no setor da aviação é complexo e multifacetado. Embora, um imposto sobre o combustível de aviação seja frequentemente proposto como uma solução, estudos como o de OLSTHOORN (2001), indicam que a elasticidade-preço da demanda por combustível é baixa, o que pode resultar em reduções insignificantes nas emissões de CO<sub>2</sub>. No entanto, GONZÁLEZ e HOSODA (2016) sugerem que um equilíbrio entre a proteção ambiental e a prosperidade dos negócios pode ser alcançado por meio da implementação de impostos sobre combustíveis de aviação. É necessário, portanto, realizar pesquisas adicionais para aprimorar as políticas de redução de emissões no setor da aviação.

Para abordar a complexidade das incertezas envolvidas na redução de emissões, BRUNELLE-YEUNG et al. (2014) propuseram um modelo de contabilização das incertezas como um elemento mitigador. Ao considerar a incerteza em fatores como o valor de uma vida estatística e a concentração-resposta para mortalidade prematura, o estudo mostrou que dessulfurizar o combustível de aviação e o aumento do rigor de NO<sub>x</sub> são intervenções políticas plausíveis para reduzir as mortes prematuras.

ASHOK et al. (2017) destacam que o controle de pushback pode minimizar a queima de combustível e reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> durante o táxi em até 38%. Além disso, a redução da potência durante a decolagem e o ajuste de potência em diferentes modos foram identificados como eficazes na mitigação dos impactos ambientais e redução de custos. No entanto, outras políticas como controle de slots ou aumento das taxas de aterrissagem podem ser necessárias para reduzir os atrasos a níveis mais gerenciáveis e alcançar uma redução efetiva das emissões (EVANS e SCHAEFER, 2014).

### **3 METODOLOGIA**

O método empregado neste estudo adotou uma abordagem abrangente, integrando revisões bibliográficas e da literatura com a coleta de dados sobre as operações aéreas nos aeroportos Santos Dumont e Galeão, situados no Rio de Janeiro. Inicialmente, uma revisão bibliográfica minuciosa foi conduzida para compreender o estado atual das pesquisas sobre o impacto ambiental da aviação e identificar lacunas no conhecimento existente. Observou-se que a maioria das contribuições é de origem estrangeira e publicada em inglês. No entanto,

constatou-se uma carência de contribuições nacionais recentes, com trabalhos menos atualizados e esparsos entre os anos de 2000 e 2019.

Em seguida, os dados sobre as operações aéreas nos aeroportos em questão foram coletados utilizando informações disponíveis nos bancos de dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). Esses dados incluíram informações sobre as frotas de aeronaves e as companhias aéreas que operam nos aeroportos, proporcionando uma compreensão abrangente da situação da aviação na região. Além disso, foram analisados os fatores que influenciam as emissões de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa durante as operações de pouso e decolagem. Para isso, utilizou-se o banco de dados de emissões por motor da Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), considerando as características específicas de cada aeroporto, como padrões de tráfego e infraestrutura.

As análises foram iniciadas com base nessas informações e na metodologia da ICAO, sendo complementadas por outras métricas, como a metodologia de Aproximação de Primeira Ordem (FOA-3.0), o modelo do Sistema para Avaliação de Emissões Globais da Aviação (SAGE) e a metodologia do IPCC para cálculo simplificado de carbono equivalente.

De acordo com a Organização de Aviação Civil Internacional (ICAO, 2016b), será utilizado nos cálculos o tempo em modo (*TIM*), os fluxos de combustível e os índices de emissão do motor (*EI*). *TIM* é o tempo que o motor de uma aeronave passa em um dos modos de operação no ciclo de LTO, o qual é expresso em minutos. O *EI* é a massa de um determinado poluente emitida por unidade de massa do combustível queimado em um motor específico. Assim, ao multiplicar o *EI* específico do modo de voo pelo fluxo de combustível do *TIM*, uma taxa de emissão do modo é obtida em unidades de gramas de poluente por ciclo de LTO (ICAO, 2016b).

Os dados disponibilizados são fornecidos em quatro pontos de operação padrão, definidos como: marcha lenta (7% de empuxo máximo), aproximação e pouso (30%), subida (85%) e decolagem (100%). Um típico ciclo LTO é mostrado na figura 1. Ressalta-se que as distâncias relativas, onde se iniciam a aproximação final e terminam a fase de subida, são determinadas conforme os procedimentos específicos de aproximação e decolagem por instrumentos de cada aeroporto.

### 3.1 Método de Cálculo

As emissões de hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) são calculadas pelo método de ciclos de LTO (ICAO, 2016b), que inclui

operações de aeronaves nas proximidades aeroportuárias abaixo da altitude de 3000 pés (915 m). As emissões são uma função do tempo em modo ( $TIM$ ), índice de emissão ( $EI$ ) e fluxo de combustível do motor ( $FF$ ) (ICAO, 2020). Além disso, consideram-se as informações do tipo de aeronave e motor. As emissões totais de um poluente  $i$  produzido pela aeronave  $j$  para um ciclo LTO (g),  $E_{ij}$ , são calculadas pela equação 1.

$$E_{ijk} = \sum (TIM_{jk} \times 60) \times (FF_{jk} \div 1000) \times EI_{jk} \times NE_j \quad (1)$$

Onde:

$E_{ijk}$  é o índice de emissão do poluente  $i$  (em gramas de poluente por quilograma de combustível) no modo  $k$  (decolagem, subida, taxiamento/marcha lenta e aproximação) para cada motor usado na aeronave tipo  $j$ .  $TIM_{jk}$  é o tempo no modo  $k$  (em minutos) para a aeronave tipo  $j$ .  $FF_{jk}$  é o fluxo de combustível para o modo  $k$  (em quilogramas de combustível por segundo -  $\text{kg s}^{-1}$ ) para cada motor usado na aeronave tipo  $j$ .  $EI_{jk}$  é o índice de emissão para cada motor da aeronave  $j$ , no modo de operação  $k$ .  $NE_j$  é o número de motores usados na aeronave tipo  $j$ . A metodologia de cálculo para  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$  e  $\text{HC}$  é feita em duas etapas. Primeiro, o tipo de aeronave é determinado. Após, com o banco de dados da ICAO para motores de aeronaves, as emissões (massa de poluente) podem ser calculadas pelo uso da equação 1.

Para o cálculo de  $\text{SO}_x$ , como não há uma definição padrão para a avaliação das emissões estipulada pela ICAO, foi utilizado o modelo do Sistema para Avaliação de Emissões Globais da Aviação (SAGE), estipulado pela Agência Federal de Administração da Aviação Norte Americana (FAA, 2005). No SAGE, a quantidade de óxidos de enxofre emitidos está diretamente relacionada à quantidade de enxofre no combustível, definido como 0,8 g/kg. Assume-se a queima de 100% do combustível, onde todo o enxofre (S) presente é convertido em  $\text{SO}_2$ . Então, a emissão total de  $\text{SO}_x$  para aeronave  $j$  para um ciclo LTO em gramas ( $E_j$ ) é calculada pela equação 2.

$$E_j = \sum (TIM_{jk} \times 60) \times ER_{jk} \times NE_j \quad (2)$$

Onde:

$TIM_{jk}$  é o tempo em modo  $k$  (em minutos) para a aeronave tipo  $j$ .  $ER_{jk}$  é a taxa de emissão total de  $\text{SO}_x$  emitido por segundo pelo modo  $k$  ( $\text{gs}^{-1}$ ) para aeronave  $j$  ( $ER_j = 1 \times FF_{jk}$ ).  $FF_{jk}$  é o consumo de combustível por modo  $k$  (em quilogramas de combustível por segundo -  $\text{kg s}^{-1}$ ) para cada motor da aeronave  $j$ .

### 3.2 Avaliação de material particulado (PM)

Para os cálculos de material particulado emitido nos ciclos de LTO, é considerado em parte o número de fumaça ( $SN$ ). O  $SN$  é obtido pela perda de refletância de um filtro utilizado para retenção de partículas de fumaça, seus valores estão contidos no banco de dados da ICAO para motores de aeronaves (ICAO, 2021). Também, foi adotado a metodologia de Aproximação de Primeira Ordem (FOA-3.0) proposta por Wayson et al. (2009). Nela é possível calcular PM voláteis ( $PM_{vol}$ ) e não voláteis ( $PM_{nvol}$ ), onde  $PM_{nvol}$  é considerado como fuligem, pelo alto teor de carbono negro, e os  $PM_{vol}$  são resultado da reação de poluentes secundários como sulfatos (Wayson et al., 2009).

O  $PM_{vol}$  é calculado por meio de dois índices, um baseado no teor de enxofre e outro baseado nas reações químicas de orgânicos com a pressão do vapor. As equações 3 e 4 são utilizadas para o cálculo desses índices.

$$EI_{vol-FSC}(mg/kg) = 3 \times 10^6 \times FSC \times \varepsilon \quad (3)$$

$$EI_{vol-fuel-organic}(mg/kg) = \delta \times EI_{HCj} \quad (4)$$

Onde:

$EI_{vol-FSC}$  é o índice de emissão para  $PM_{vol}$  do teor de enxofre do combustível ( $FSC$ ).  $FSC$  é a razão da massa com o valor padrão 0,00068.  $\varepsilon$  é a conversão fracionária de enxofre em sua forma elementar ( $S^{IV}$ ) em ácido sulfúrico ( $H_2SO_4: S^{IV}$ ) (utilizada para aproximar o processo de múltiplas reações químicas imediatas), com valor padrão de 0,033.  $EI_{vol-fuel-organic}$  é a emissão de  $PM_{vol}$  do combustível orgânico (em miligramas por quilo de combustível).  $\delta$  é o fator dependente do modo, com valores determinados na Tabela 4.  $EI_{HCj}$  é o índice de emissão de HC para o motor da aeronave  $j$ , estabelecido conforme banco de dados da ICAO.

O  $PM_{vol}$  é a soma dos resultados das expressões 3 e 4, multiplicado por  $TIM$  e fluxo de combustível. A Tabela 4 mostra os valores de  $\delta$  por modo do ciclo de LTO, sugeridos por Wayson et al. (2009) para metodologia FOA-3.0.

**Tabela 4** - Valores de  $\delta$

Modo	$\delta$
Decolagem	115
Subida	76
Aproximação	56,25

Táxi/Marcha lenta	6,17
-------------------	------

O  $PM_{nvol}$  se correlaciona bem com o  $SN$ , assim, para a avaliação das emissões de  $PM_{nvol}$  é calculado por um índice de concentração ( $CI$ ), que é a massa de  $PM_{nvol}$  por volume padrão de exaustão; E uma taxa de fluxo volumétrico de exaustão do núcleo por quilograma de combustível queimado ( $Q_{core}$ ), baseado na razão massa ar-combustível ( $AFR$ ) e as quantidades molares da reação química de oxidação da combustão do combustível. As equações 5 e 6 mostra a formulação de cálculo de  $CI$  e  $Q_{core}$ .

$$CI(mg\ m^{-3}) = 0,0694 \times SN^{1,24} \quad (5)$$

$$Q_{core}(m^3kg_{fuel}^{-1}) = 0,776 \times AFR + 0,877 \quad (6)$$

O  $AFR$  varia de acordo com o motor e para as diferentes configurações de potência empregada nos modos do ciclo de LTO. O FOA-3.0 assume valores médios de  $AFR$  para todos os motores conforme é apontado na Tabela 5. O total de  $PM_{nvol}$  é obtido multiplicando-se o  $CI$  e  $Q_{core}$  por  $TIM$  e fluxo de combustível. A Tabela 5 mostra os valores de  $AFR$  sugeridos por Wayson et al. (2009) para diferentes configurações de potência no FOA-3.0.

**Tabela 5 - Valores de AFR**

<b>Configuração de Potência</b>	<b>AFR</b>
7% (Decolagem)	106
30% (Subida)	83
85% (Aproximação)	51
100% (Táxi/Marcha lenta)	45

O total de PM emitido no ciclo de LTO é o somatório de  $PM_{vol}$  e  $PM_{nvol}$ .

### 3.3 Combinações de aeronave/motor

Para a análise, escolheu-se as combinações mais típicas de acordo com as informações dos fabricantes de aeronaves e do banco de dados de emissões da ICAO (2021). Uma vez que para uma mesma companhia aérea, aeronaves de um tipo específico podem ser equipadas com diferentes tipos de motores, tal simplificação se torna essencial, já que as informações



detalhadas de aeronave/motor são difíceis de obter. As combinações usadas para o cálculo estão listadas na Tabela 6.

**Tabela 6** - Combinações típicas de aeronave /motor usadas para cálculo.

<b>Tipo de Avião</b>	<b>Tipo de Motor</b>	<b>Tipo de Avião</b>	<b>Tipo de Motor</b>
A300-200	CF6-80C2A5	B777	GE90-115B
A319	CFM56-5A5	B787	Trent 1000-E
A320	CFM56-5-A1	C208	PW6124A
A330	PW4168	CRJ9	CF34-8C5
A340	CFM56-5C4/P	CRJ-200	CF34-3B
A350	Trent XWB-84	DC-9	JT8D-17A
AN-124	CF6-80C2A1	DC-10	CF6-50C2
ATR-42/43	PW1215G	DC-87	JT3D-3B
ATR-72	PW1217G	E145	AE3007A1
B722	JT8D-15	E190	CF34-10E6
B733	CFM56-3-B1	E195	CF34-10E7
B734	CFM56-3C-1	FOKER-100	TAYMK650-15
B737	CFM56-7B22	IL-76/96	PS-90A
B738	CFM56-7B27	L410	GE90-85B
B747	CF6-80C2B1F	MD-11	CF6-80C2D1F
B757	RB211-535E4	RJ100	LF507-1F-1H
B767	PW4062		

### 3.4 Avaliação de custo social e ambiental das emissões

Visando atingir dados que possuam valor de implicação política junto aos debates em curso sobre a regulamentação ambiental relativa ao transporte aéreo, foi escolhido o esquema descrito por Grampella et al. (2012) e Martini et al., (2013). Logo será possível avaliar a contribuição das emissões aeroportuárias na qualidade do ar local e desenvolver técnicas e

planos estratégicos de mitigação às emissões. Primeiro, considera-se que as aeronaves afetam a poluição do ar local quando operam ao longo do ciclo LTO. Para a análise, desconsideram-se os motores de combustão interna usados em equipamentos categoria leve, avaliando motores com peso máximo de decolagem (MTOW) superior a 5700kg.

Com base no índice de emissões produzido com o modelo da ICAO (2016b), obtém-se a quantidade de cada poluente produzido anualmente por um aeroporto que é agregado ao custo social dos danos produzidos por poluente. Assim, podemos descobrir os valores de poluição local ponderada (WLP), obtidos com a soma dos quilogramas produzidos de cada poluente ( $w_p$ ), multiplicado pelo custo relativo do dano ( $c_p$ ). A equação 7 demonstra o cálculo de poluição local.

$$WLP = \sum_p w_p \times c_p \quad (7)$$

Para os valores de custo relativo do dano ( $c_p$ ), são adotados os valores descritos e estimados por Martini et al. (2013) e Leurs et al. (2002), onde a cada quilograma de HC é equivalente a 4 €/kg e para NO<sub>x</sub> o valor considerado é 9 €/kg. Os custos sociais das emissões de monóxido de carbono (CO) não são computados, uma vez que as emissões desse gás relacionadas à aviação não costumam resultar em efeitos substanciais para a saúde, assim, seu custo é zero.

Uma vez que as mudanças climáticas e seus efeitos também afetam a população, faz-se necessário avaliar as emissões de dióxido de carbono como custo social/ambiental. Com base no obtido dos cálculos apresentados, utilizou-se a equação de avaliação ambiental dos GEE com base em Caliskan (2015) da seguinte forma:

$$C_{CO_2} = \sum x_{CO_2} \times c_{CO_2} \quad (8)$$

Onde o  $C_{CO_2}$  é o índice ou fator de custo ambiental, gerado pelo somatório geral dos valores de  $x_{CO_2}$ , as emissões de CO<sub>2</sub> liberadas em um período (no ciclo LTO), multiplicadas pelo preço de emissão de gases de efeito estufa  $c_{CO_2}$  (€/kg CO<sub>2</sub>). Como os preços internos do carbono costumam variar entre os países, adotou-se o padrão descrito por Aygun e Caliskan (2021) onde o preço internacional do carbono é determinado por 0,116 €/kg CO<sub>2</sub>. Por fim, para complementar a análise ambiental, é adotado a análise de potencial de aquecimento global (GWP) (BRANDER, 2012; IPCC, 2014). Como diferentes GEE duram na atmosfera por períodos diferentes e absorvem quantidades diferentes de calor, este padrão de análise indica a quantidade de aquecimento causado por um gás em uma janela temporal (normalmente 100 anos).

Para este cálculo, foram selecionados apenas os gases de efeito estufa diretos (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) mais diretamente associados à aviação. Suas estimativas foram derivadas dos valores padrão de fator de emissão e poder calorífico para o querosene de aviação. A ANAC (2019) define os índices do combustível brasileiro calculados da seguinte maneira: 31,5.10<sup>-1</sup> kgCO<sub>2</sub>/kgQAv; 88,2.10<sup>-6</sup> kgN<sub>2</sub>O/kgQAv; 22,1.10<sup>-5</sup> kgCH<sub>4</sub>/kgQAv.

Com base no CO<sub>2</sub>, que recebe valor de índice 1, os outros GEE são multiplicados pelo número de vezes que aquecem a mais que a base, ou seja, em comparação ao CO<sub>2</sub>. O cálculo de GWP é encontrado conforme a equação 9, os valores equivalentes para o cálculo estão contidos na tabela 7, adotando-se os dados conforme IPCC AR 5 (2014) para padronização.

**Tabela 7 - Valores equivalentes de dióxido de carbono**

<b>GEE</b>	<b>GWP</b>
<b>Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)</b>	1
<b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>	28
<b>Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O)</b>	265

**Fonte:** IPCC (2014)

$$GWP_{CO_2} = CO2_{CO2eq} + CH4_{CO2eq} + N2O_{CO2eq} \quad (9)$$

#### **4 CARACTERIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DAS ÁREAS PESQUISADAS**

O presente estudo concentrou-se nos dois principais aeroportos do Estado do Rio de Janeiro, ambos localizados no âmbito da Região Metropolitana do Estado (RMRJ). A RMRJ é um sítio considerado crítico em termos de poluição atmosférica, assim, necessitando de avaliações constantes e prioritariamente de ações de controle (PIRES, 2005). Além do desenvolvimento urbano-industrial exacerbado e sem controles de planejamento adequados, a região é de especial relevância por suas características fisiográficas, com a presença de maciços, lagoas e a proximidade com o oceano, que interferem diretamente na circulação dos ventos e, por sua vez, na dispersão/concentração de poluentes (OLIVEIRA-JÚNIOR ET AL., 2017; FERREIRA, 2008).

Como a área estudada possui uma diversidade de uso e cobertura do solo, com a presença marcante de áreas urbanas e alta industrialização no entorno, pontos que aumentam o

número de fontes poluidoras, este capítulo pretende apontar o relevante para a discussão e o que possuir relação direta com o aumento das atividades aéreas.

#### 4.1 Caracterização da Região Metropolitana do Rio de Janeiro

Com o conglomerado de 22 municípios, sendo o Rio de Janeiro o de maior importância econômica e mais densamente povoado (5.265,82 hab./km<sup>2</sup>) (IBGE, 2010; PIRES, 2005). Abriga cerca de 12 milhões de pessoas, sendo a região metropolitana com maior densidade habitacional no país, possui uma ampla diversidade de indústrias e uma concentração elevada de veículos que nela circulam (FERREIRA, 2008; IPEA, 2012). Dos 6 maiores PIB do Estado, 5 são fronteiriços: Rio de Janeiro, Duque de Caxias, Niterói, Nova Iguaçu e São Gonçalo.

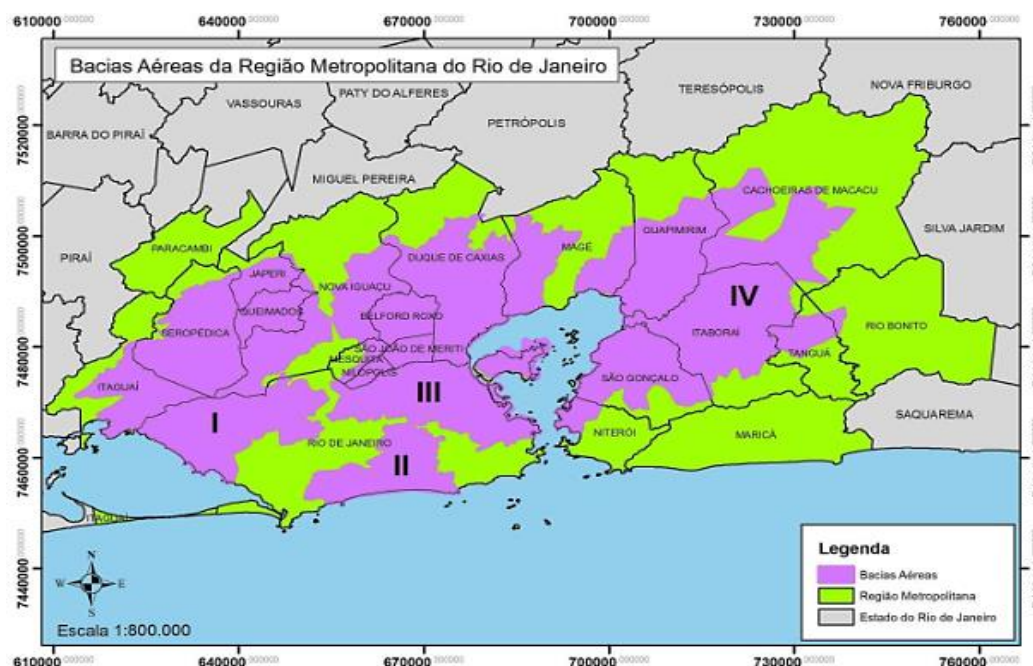
Tais características populacionais e industriais são indicadores do potencial de emissão de poluentes e fontes de calor existentes na região. Além disso, existem peculiaridades topográficas e atmosféricas que influenciam diretamente nos componentes de dispersão de calor e poluentes na atmosfera. Com a presença de três maciços, Tijuca, Pedra Branca e Gericinó, uma diversidade de microclimas naturais influenciam na circulação dos ventos e nos meios de transporte e dispersão de poluentes (OLIVEIRA-JÚNIOR ET AL, 2017; MONTEIRO, 2017). Como se estendem do continente até o Oceano Atlântico, no sentido sudeste (Tijuca) e sudoeste (Pedra Branca), há uma influência sobre o sentido de ampliação do crescimento urbano com limitação a determinados quadrantes de área.



**Figura 4** - Localização da Baía de Guanabara e dos Municípios da RMRJ em relação aos Aeroportos SBGL e SBRJ

**Fonte:** OLIVEIRA-JÚNIOR ET AL. (2017)

Por todas as características de relevo e meteorologia, há uma divisão em sub-regiões que compilam semelhanças para melhor gestão da qualidade do ar. As “Bacias Aéreas” são os espaços aéreos delimitados pela topografia onde os poluentes do ar estão sujeitos aos mesmos mecanismos de circulação e dispersão (FARIAS ET AL., 2013; PIRES, 2005). A RMRJ possui quatro bacias aéreas com diferentes concentrações de poluentes, a figura 5 apresenta as subdivisões.



**Figura 5** - Bacias aéreas da RMRJ

Fonte: FARIAS (2018)

Segundo (PIRES, 2005), as divisões acontecem da seguinte forma:

- Bacia Aérea I: Ocupa uma área de aproximados 730 km<sup>2</sup>, localizada na zona oeste da RMRJ
- Bacia Aérea II: Com cerca de 140 km<sup>2</sup>, localizada inteiramente no município do Rio de Janeiro e envolvendo as regiões administrativas da Barra da Tijuca e Jacarepaguá.
- Bacia Aérea III: Área de 700 km<sup>2</sup> compreendendo a zona norte carioca e grande parte dos municípios da Baixada Fluminense.
- Bacia Aérea IV: Abrange os municípios de São Gonçalo, Itaboraí, Magé e Tanguá, com quase 830 km<sup>2</sup>

De todas as divisões, a bacia aérea III é aquela de maior importância. Os autores Farias (2018), De Oliveira (2013) e Pires (2005), apontam que por possuir a maior ocupação urbano-industrial do Estado, a BA-III possui maior potencial emissor de poluente e demanda prioridade

no controle de qualidade do ar. Dados apontam que, desde 2004, a BA-III é a que apresenta as maiores taxas de emissão para dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC). Já em relação aos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), embora com uma pequena diferença em relação à BA-III, a BA-I apresenta os níveis mais elevados. Essa tendência se reflete de maneira semelhante nos níveis de material particulado (PM). Esses padrões indicam a importância crítica de direcionar a atenção para a BA-III no que diz respeito às emissões desses poluentes nos últimos anos.

**Tabela 8** - Valores de emissão de poluentes por bacia aérea

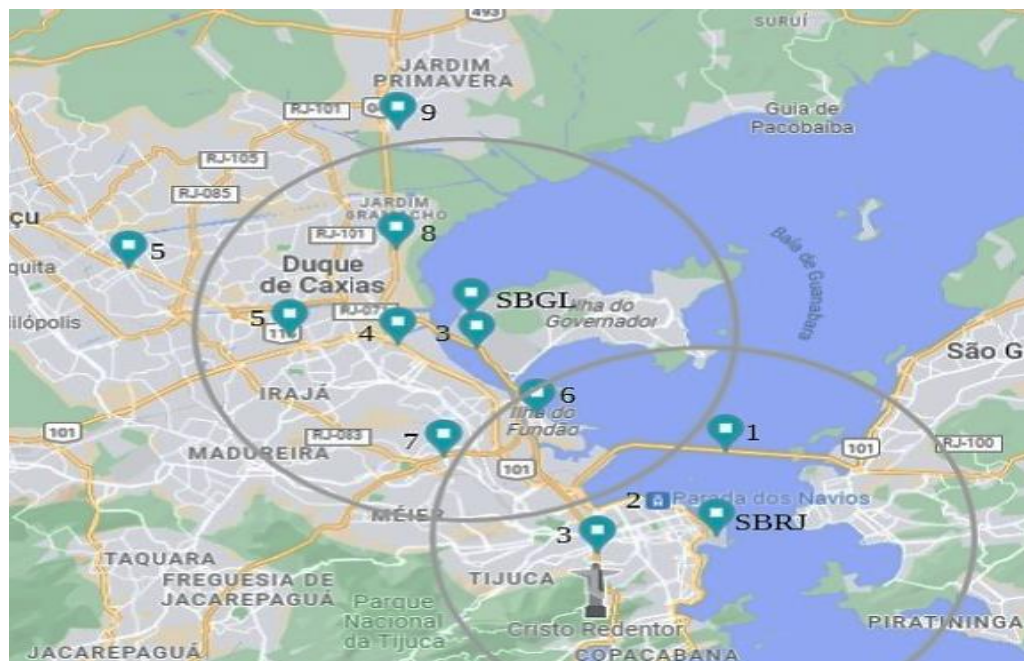
Bacia Aérea	Poluentes – Taxa de emissão (ton./ano x 1.000 e %)									
	PM <sub>10</sub>		SO <sub>2</sub>		NO <sub>x</sub>		CO		HC	
I	5,9	58%	21,5	39%	14,6	50%	0,9	15%	0,3	1%
II	0,4	4%	0	0%	0,1	0%	0,1	2%	0,7	3%
III	2,5	25%	29,4	54%	13,3	45%	2,8	45%	24,4	95%
IV	1,4	14%	3,8	7%	1,3	4%	2,4	38%	0,1	1%

Fonte: FARIAS (2018); INEA (2014)

#### 4.2 Zona de Influência dos Aeroportos SBGL e SBRJ

Separados por apenas 14 km de distância, os dois maiores aeroportos do Estado estão muito próximos. A Figura 6 ilustra sua localização geográfica e as zonas de impacto associadas, que, de acordo com a literatura especializada, abrangem uma área de aproximadamente 10 km a partir de cada aeroporto (SIMONE AT AL., 2013; STETTLER ET AL, 2011; LEE ET AL., 2010). A figura aponta diversos pontos cruciais que funcionam como fontes emissoras, todas elas inseridas nas regiões afetadas pela atividade aeroportuária. Essa proximidade excepcional dos aeroportos é um aspecto crucial a ser considerado na análise das emissões e seus efeitos na qualidade do ar da região.





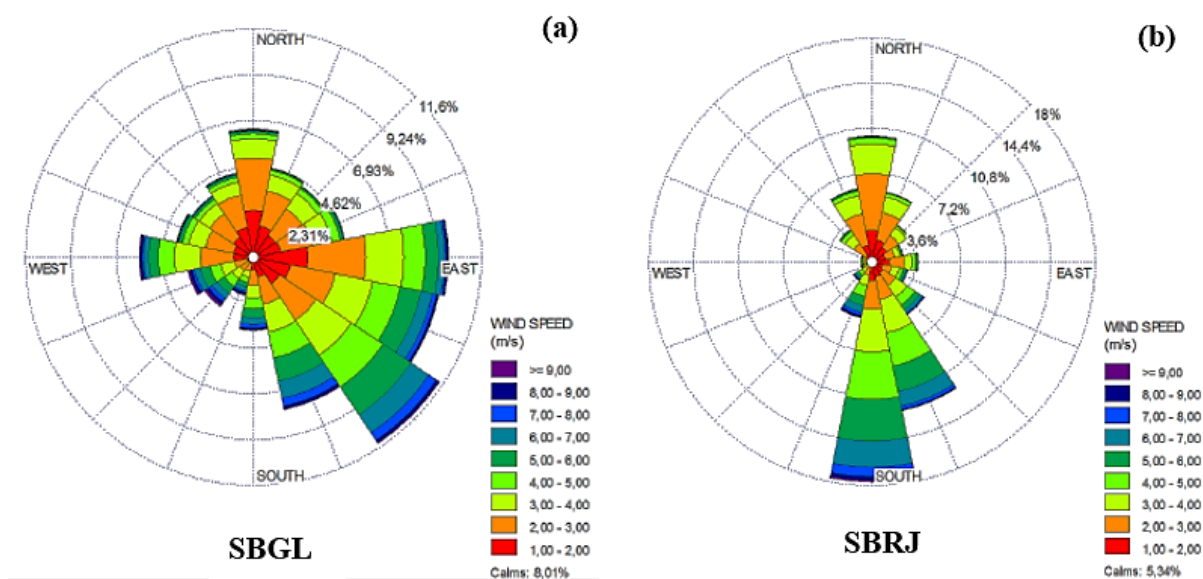
**Figura 6** - Zonas de Influência dos Aeroportos SBGL e SBRJ e outras fontes emissoras

Conforme se espera em uma região altamente urbanizada, a zona de impacto dos aeroportos abrange uma série de fontes significativas de emissões de poluentes e gases de efeito estufa. Conforme marcações na figura: Importantes vias rodoviárias, como a Rodovia Presidente Dutra (5) e a Rodovia Washington Luís (8), assim como a Avenida Brasil (4), as expressas Linha Amarela (7) e Linha Vermelha (3); a Refinaria de Duque de Caxias (9); a Cidade Universitária (6); a Ponte Rio-Niterói (1) e a zona portuária do Rio de Janeiro (2). Todas estas áreas estão inseridas na esfera de influência dos aeroportos. Cabe destacar que algumas dessas fontes de emissão estão sob a influência direta de ambos os aeródromos. A coexistência desses elementos dentro da região urbana acentua ainda mais a complexidade da análise.

A análise da dinâmica dos ventos nos aeroportos SBGL e SBRJ revela um padrão que pode agravar as condições observadas. A circulação do vento na região urbana tem o potencial de afetar adversamente a dispersão de poluentes, tendo um impacto direto na qualidade do ar em áreas específicas da cidade. Um exemplo disso é a influência dos ventos predominantemente do Sudeste, que têm o potencial de transportar poluentes emitidos pelos aeroportos em direção a áreas residenciais ao longo da Baía de Guanabara.

Os ventos, conforme ilustrado na Figura 7, apresentam um padrão distinto. Eles tendem a se projetar na direção da Bacia Aérea III, com predominância de ventos provenientes das direções Sudeste (SE) e Leste (E) em relação ao Aeroporto do Galeão. Em contraste, para o

Aeroporto Santos Dumont, os ventos predominantes são originados do Sul (S) (OLIVEIRA-JÚNIOR ET AL., 2017).



**Figura 7** - Gráficos de Vento Predominante para os aeroportos SBGL e SBRJ  
**Fonte:** OLIVEIRA-JÚNIOR ET AL (2017)

Considerando as múltiplas fontes de emissões dentro das zonas de influência dos aeroportos e a dinâmica dos ventos nessas regiões, surge uma questão de grande relevância relacionada ao impacto cumulativo na área. As comunidades residenciais ao longo da Baía de Guanabara e aquelas nas proximidades das rodovias estão especialmente susceptíveis à poluição proveniente das operações aeroportuárias. Portanto, é essencial conduzir estudos contínuos para avaliar esses impactos e identificar medidas de mitigação eficazes a fim de garantir e preservar a qualidade do ar na cidade. Esta abordagem é crucial para atender às necessidades de sustentabilidade e saúde pública nas áreas urbanas afetadas.

### 4.3 Caracterização dos procedimentos de pouso e decolagem

Os procedimentos de pouso e decolagem englobam uma série de etapas e medidas de segurança destinadas a garantir tanto a segurança dos passageiros e tripulação como a minimização do impacto ambiental. Entretanto, é importante reconhecer que cada região e aeroporto pode implementar procedimentos específicos para atender às variadas demandas dos usuários do sistema de aviação. Ainda que, frequentemente, haja semelhanças, as trajetórias para pousos e decolagens, sejam elas sob regras de voo visual (VFR) ou de voo por instrumentos (IFR), podem diferir em termos de pontos de partida, duração e padrões de voo das aeronaves.



Para simplificar a análise, concentramo-nos exclusivamente nas trajetórias associadas aos principais procedimentos IFR de cada um dos aeroportos em questão.

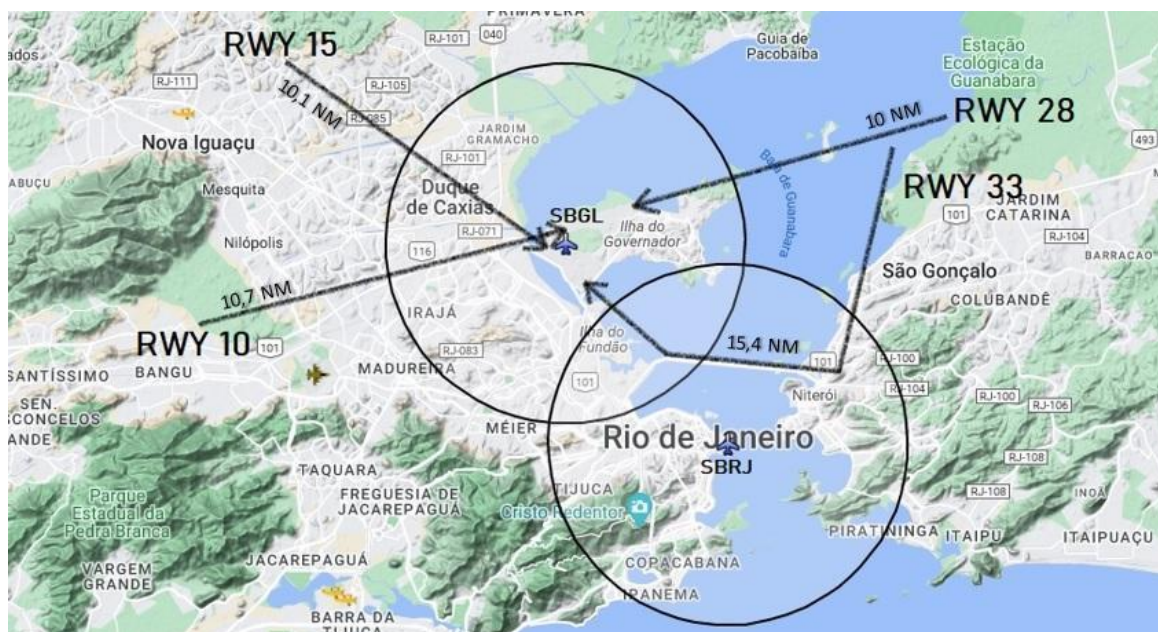
Antes do pouso, as aeronaves são orientadas pelos controladores de tráfego aéreo para seguir uma rota de aproximação pré-determinada para o aeroporto. Durante essa etapa, as aeronaves são orientadas para descer para a altitude de pouso e seguir uma trajetória específica para alinhar-se com a pista. Esse momento é normalmente orientado pelas Cartas de Aproximação por Instrumentos (IAC), as quais irão ditar exatamente a altitude que as aeronaves deverão estar, por quanto tempo e qual a distância a ser voada até o pouso propriamente dito. É importante notar que o ingresso no ciclo LTO fica atrelado ao momento em que se atinge 3000' pés na descida, e esse momento, é discriminado pelas IAC. Além disso, a distância e o tempo de voo previsto nas cartas, também, podem se diferenciar para mais, ou menos, dos 10 km de área de influência, tornando a área do ciclo LTO maior ou menor, de acordo com o previsto nas cartas para atingir a altitude de três mil pés.

Já o procedimento de decolagem envolve, além da preparação da aeronave na área de embarque, acionamento dos motores e toda parte de taxiamento, o uso dos Procedimentos de Saída por Instrumento (SID) que funcionarão da mesma forma que as IAC, porém, fornecendo um perfil de subida até que seja cruzado a faixa de altitude para encerrar o ciclo LTO. Durante a execução dos procedimentos de pouso e decolagem, as aeronaves estão sujeitas a interferências do controle de tráfego aéreo, o que pode causar atrasos na execução desses procedimentos. Além disso, em casos de aproximação perdida, descritos nas IACs, há necessidade de extensão além das finais de pouso e decolagem, com maior probabilidade de alterações na trajetória devido às demandas do controle de tráfego aéreo.

Para melhor avaliar e entender a área de impacto de cada aeroporto, então, é necessário analisar as IACs e SIDs e verificar onde se encaixam na zona de influência.

#### 4.3.1 Procedimentos do SBGL

O SBGL possui dois sistemas de pista, as pistas (RWY) 15/33 e 10/28, portanto, possui IACs e SID para cada uma dessas cabeceiras, com diversos tipos de aproximação e circuitos de decolagem diferentes para cada cabeceira. Para a análise, serão observados aqueles de maior ocorrência: IACs ILS Z RWY 15; ILS X RWY 10; ILS U RWY 28; ILS W RWY 33. As trajetórias desses procedimentos estão presentes na figura



**Figura 8** – Trajetórias de Aproximação por Instrumento SBGL

Observa-se que todos os procedimentos de aproximação por instrumentos adotados no SBGL apresentam extensões além do perfil de 10 quilômetros, conforme descrito na literatura. Tal fato levanta preocupações quanto ao impacto ambiental das operações aeroportuárias nas áreas urbanas circunvizinhas. A extensão desses procedimentos pode aumentar a área de dispersão de poluentes, o que gera dúvidas sobre a atividade do aeroporto em relação à cidade. Embora esses procedimentos sejam adaptados às características topográficas da área, além da capacidade das aeronaves de executar manobras precisas, é crucial considerar o potencial impacto ambiental e na saúde pública. Quando estendidos por algum motivo, esses procedimentos podem aumentar a área de dispersão de poluentes e resultar em acúmulo de substâncias poluentes em áreas urbanas que não foram contabilizadas, potencialmente resultando em problemas de saúde para os residentes.

É importante ressaltar que, de acordo com o apresentado na figura 8, o procedimento de aproximação por instrumentos para pista 33 pode chegar a uma extensão de até 28 quilômetros, o que é muito além do perfil padrão de 10 km descrito na literatura. Esse dado é alarmante, pois indica que os impactos ambientais da atividade aeroportuária no entorno de áreas urbanas podem ser ainda maiores do que se imagina.

Além disso, é importante lembrar que os procedimentos de aproximação por instrumentos tendem a poluir muito mais do que os procedimentos de ciclo LTO (decolagem e pouso) padrão, que se valem apenas do circuito visual do aeroporto. Quando esses procedimentos são estendidos, a área sobre a qual os poluentes são dispersos aumenta

consideravelmente, podendo levar a um acúmulo de poluentes em áreas urbanas não contabilizadas.

Na figura 9 é possível observar que as SID do SBGL podem se estender para mais de 10 km, dependendo do tipo de aeronave e do padrão de subida específico de cada companhia. No entanto, é necessário observar a possibilidade de restrições de altitude e vetores na saída. Os controladores de tráfego aéreo costumam utilizar vetores ou restrições para gerenciar a saturação da rede, o que pode agravar o problema do impacto ambiental. Sendo assim, é fundamental avaliar o impacto desses procedimentos estendidos tanto na saída quanto na chegada e considerar alternativas que possam minimizar seu impacto no meio ambiente e na saúde pública. Dentre as soluções potenciais, pode-se citar a modificação dos procedimentos para minimizar a dispersão de poluentes ou o desenvolvimento de rotas alternativas que evitem áreas densamente povoadas



**Figura 9** - Trajetórias de saídas por instrumentos SBGL

#### 4.3.2 Procedimentos do SBRJ

O Aeroporto Santos Dumont possui uma pista principal, denominada sistema 20L/02R, e uma pista auxiliar destinada a aeronaves de pequeno porte em voos visuais ou em caso de emergências. Similarmente ao SBGL, há IACs e SIDs específicas para cada cabeceira, e serão analisados os principais procedimentos.

Todavia, o SBRJ, possui algumas peculiaridades que influenciam em seus procedimentos: a topografia local e a extensão da pista de pouso. O fato de estar rodeado por elevações como edificações, morros e serras, além da pista de pouso/decolagens contar apenas



com pouco mais de 1 km de extensão (1323 m), faz com que as aeronaves tenham que voar por mais tempo em determinadas altitudes ou com regimentos de motor diferenciados para que seja possível operar nesse aeródromo.

Logo, o seu perfil de aproximações e decolagens podem ter um impacto significativo na dispersão de poluentes e no ruído gerado pelas aeronaves durante as operações de pouso e decolagem. As aeronaves que operam no SBRJ precisam manobrar com mais frequência e voar mais baixo do que em aeroportos maiores, o que pode aumentar a exposição das comunidades vizinhas a ruídos e poluentes. Além disso, as condições climáticas muitas vezes tornam as operações ainda mais desafiadoras.

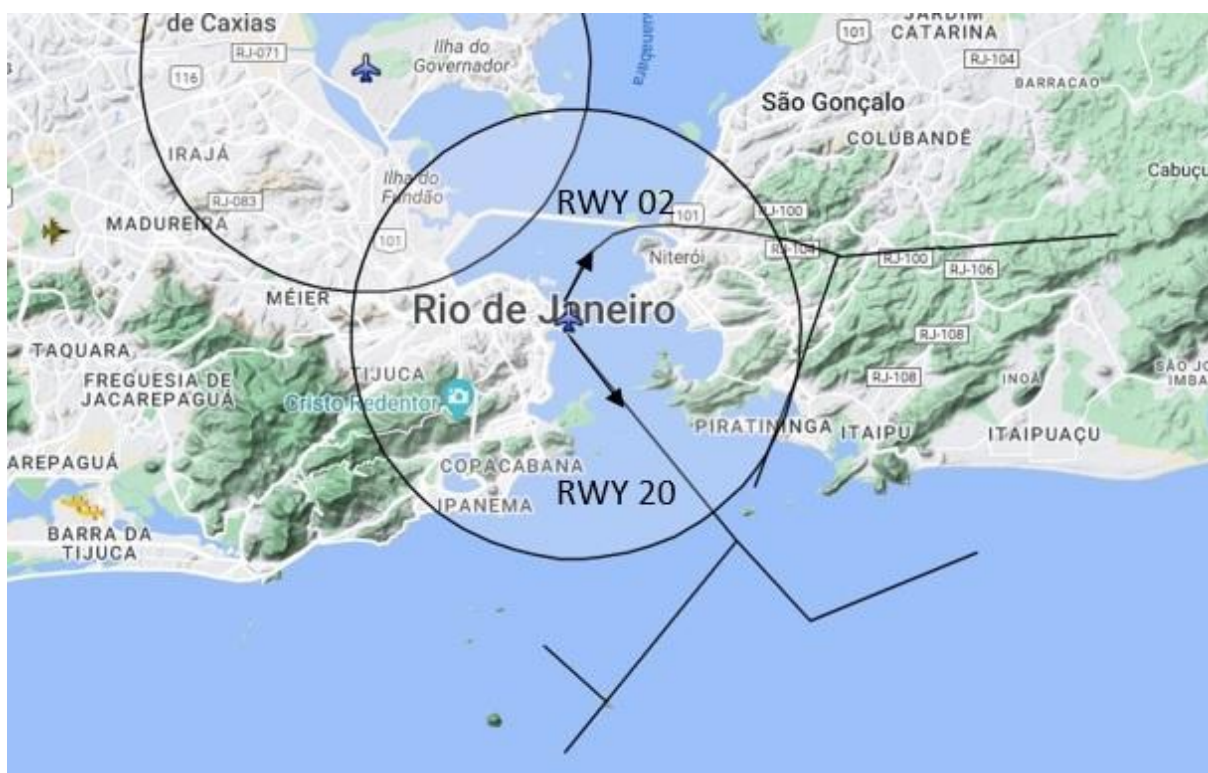
Para minimizar esses impactos, o SBRJ implementou algumas medidas, como a restrição de voos noturnos, a limitação do tamanho e do número de aeronaves que podem operar no aeroporto, e a adoção de procedimentos especiais para minimizar o ruído gerado pelas aeronaves. No entanto, ainda há muito a ser feito para mitigar completamente os efeitos negativos das operações do SBRJ no meio ambiente e na saúde pública das comunidades próximas



**Figura 10** - Trajetórias das aproximações por instrumentos SBRJ

Observa-se que a sobreposição de trajetórias do SBRJ com o Galeão pode gerar um aumento significativo na emissão de poluentes na região metropolitana do Rio de Janeiro. Essa situação é agravada pelo fato de que as aproximações e decolagens do SBRJ podem se estender além do perfil padrão, resultando em um maior alcance de dispersão de poluentes.

É importante destacar que a emissão simultânea de poluentes pelos dois aeroportos pode levar a um acúmulo de poluentes em áreas urbanas não contabilizadas, potencialmente causando problemas de saúde para a população local. Diante desse cenário, é necessário avaliar os impactos ambientais e de saúde pública da operação desses aeroportos e considerar a implementação de alternativas que minimizem a emissão de poluentes, como a modificação dos procedimentos de aproximação e decolagem, o desenvolvimento de rotas alternativas e a utilização de tecnologias mais limpas nas aeronaves.



**Figura 11** - Trajetórias de saída por instrumentos SBRJ

No caso das saídas do Santos Dumont, há uma concentração das trajetórias em direção ao setor de Niterói e São Gonçalo, o que pode afetar áreas mais distantes dos outros pontos de emissão da cidade do Rio de Janeiro. É necessário avaliar o impacto dessas trajetórias e considerar alternativas que minimizem seus efeitos locais.

Nesse contexto, soluções viáveis englobam a adaptação dos procedimentos de voo com o intuito de reduzir a dispersão de poluentes ou o desenvolvimento de rotas alternativas que evitem áreas densamente povoadas. Isso contribuiria para mitigar os potenciais impactos na

qualidade do ar e na saúde pública, fortalecendo, assim, a busca por uma operação mais sustentável desses aeroportos.

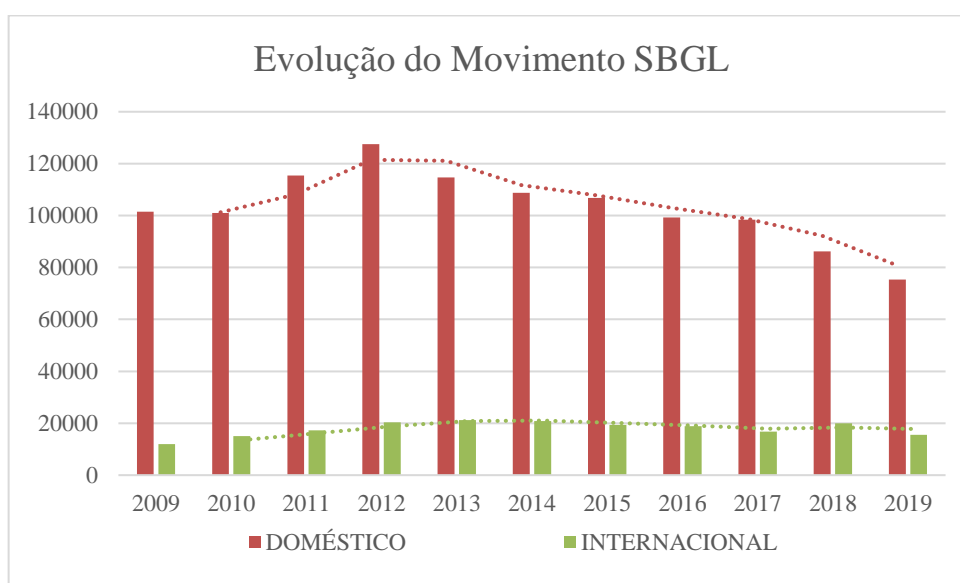
## 5 ESTUDO DOS AEROPORTOS DO GALEÃO E SANTOS DUMONT

O objetivo deste capítulo é apresentar os resultados da pesquisa sobre os poluentes atmosféricos e gases do efeito estufa nos dois grandes aeroportos da cidade do Rio de Janeiro, ambos já citados anteriormente (SBGL e SBRJ), com valores coletados ao longo de 10 anos. Neste sentido, serão descritos os principais achados em relação aos níveis de emissões, bem como as tendências ao longo do período de análise.

A compreensão dos resultados é fundamental para identificar os principais impactos ambientais e para subsidiar a tomada de decisões em relação à gestão ambiental dos aeroportos e áreas urbanas próximas. A seguir, serão apresentados os resultados da pesquisa referentes ao estudo de caso.

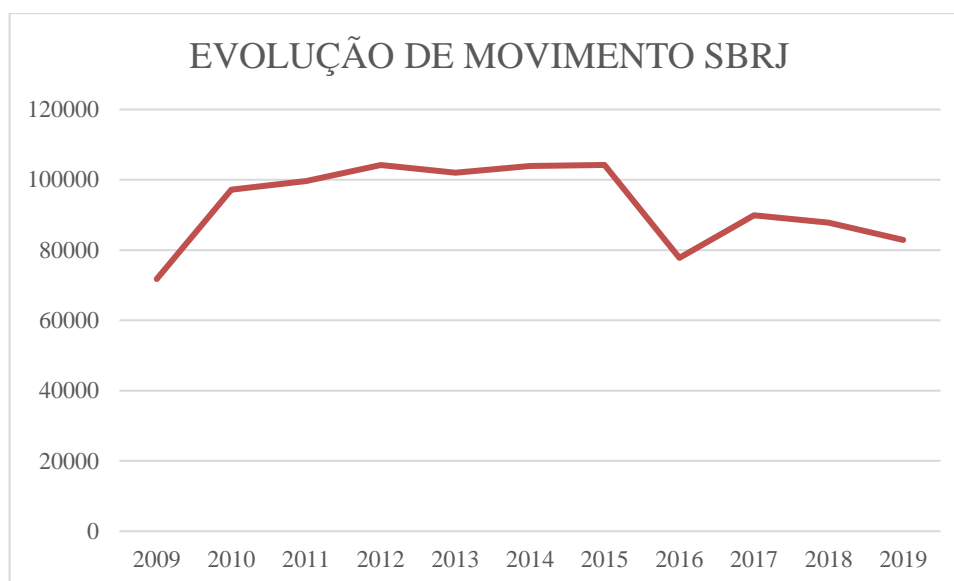
### 5.1 Estudo sobre os movimentos e distribuição de aeronaves

Os dados de movimento de aeronaves apresentados na figura 12 mostram o número de voos domésticos e internacionais registrados em cada ano, de 2009 a 2019, no aeroporto do Galeão. Esses dados são importantes para a análise da poluição em aeroportos, uma vez que o tráfego aéreo figura como uma das principais fontes de emissões de poluentes na atmosfera. A partir desses dados, é possível avaliar o impacto ambiental das operações aeroportuárias e considerar estratégias para reduzir seu impacto.



**Figura 12** - Evolução de movimentos em SBGL de 2009 a 2019

Ao avaliar os dados de movimento de aeronaves, é possível observar que houve um aumento significativo no número de voos domésticos entre 2009 e 2012, com um pico em 2012. A partir de 2013, o número de voos domésticos começou a diminuir gradualmente, atingindo seu menor valor em 2019. Já o número de voos internacionais apresentou uma tendência de crescimento mais estável ao longo do período analisado, com um pico em 2012 e um declínio em 2019.



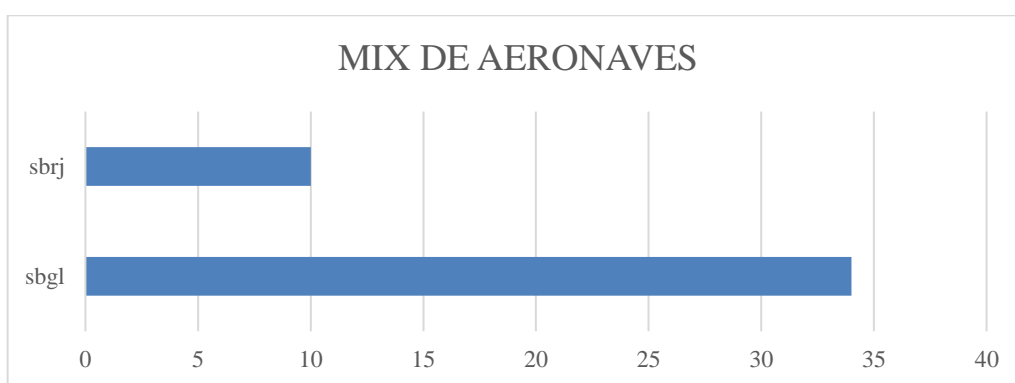
**Figura 13** – Evolução de movimentos em SBRJ de 2009 a 2019

Ao analisar os movimentos do SBRJ, é possível observar que os números de voos, todos domésticos, são significativamente menores do que os valores apresentados pelo Galeão ao longo da década. Enquanto o movimento do SBGL mostrou um aumento significativo no número de voos domésticos de 2009 a 2012, com um pico em 2012, o Santos Dumont apresentou um padrão mais estável, com flutuações relativamente menores ao longo do período analisado. Além disso, a redução no número de voos domésticos a partir de 2013, que foi observada para SBGL, não é tão acentuada em SBRJ. Isso sugere que a queda no número de voos no aeroporto da Ilha do Governador pode ter sido influenciada por outros fatores, além da demanda por viagens aéreas, como a concorrência de outros modais de transporte ou mesmo problemas de infraestrutura.

Em relação à análise da poluição em aeroportos, é importante ressaltar que o número de voos é apenas um dos fatores que influenciam as emissões de poluentes. Todavia, a correlação entre esses dados e o tema da poluição em aeroportos é bastante significativa. O aumento no número de voos domésticos e internacionais implica em um aumento na emissão de gases poluentes na atmosfera, o que pode contribuir para o agravamento dos problemas de poluição.

Além disso, a concentração de poluentes pode ser influenciada por fatores como a intensidade do tráfego aéreo e as condições meteorológicas, o que reforça a importância da análise integrada de dados de poluição e de movimento de aeronaves para a compreensão dos impactos ambientais causados pelos aeroportos.

Outros fatores, como as tecnologias utilizadas pelas aeronaves, ou seja, o mix de aeronaves que operou no aeroporto, também deve ser considerado. A diferença no número de tipos de aeronaves que operam nos dois aeroportos pode ter implicações significativas. Essa variedade pode significar uma maior diversidade de tecnologias, tamanhos e modelos de aeronaves, cada um com suas próprias características e níveis de emissão de poluentes. Logo, essa diferença pode restringir as opções para reduzir a emissão de poluentes.



**Figura 14** - Comparativo do mix de aeronaves entre SBGL e SBRJ

Os dados revelaram que, ao longo da última década, o Aeroporto Santos Dumont (SBRJ) apresentou predominantemente atividades comerciais realizadas por aeronaves classificadas como médias (M), que possuem um peso máximo de decolagem de até 136.000 kg. Notavelmente, apenas uma aeronave leve (L), com peso máximo de decolagem de até 7.000 kg, foi registrada no aeroporto durante esse período.

Essa distribuição aponta para um potencial significativo de emissões de poluentes, visto que a maioria das aeronaves operadas no SBRJ se aproxima do limite de tamanho suportado pelo aeroporto. No entanto, é vital destacar que o Aeroporto Santos Dumont enfrenta limitações físicas e estruturais que o impedem de receber aeronaves pesadas (H), com um peso máximo de decolagem acima de 136.000 kg.

Além disso, o aeroporto está sujeito a restrições de horário, o que pode resultar em uma maior concentração de voos simultâneos. Esses fatores exercem uma influência direta na diversidade de tipos de aeronaves que podem operar no Aeroporto Santos Dumont. Portanto, a

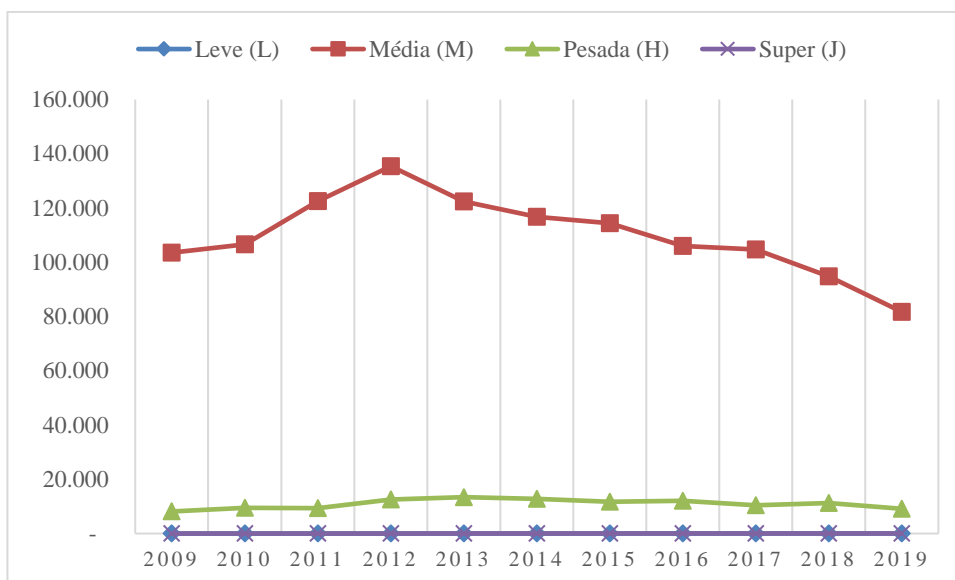


predominância de aeronaves médias e a impossibilidade de receber aeronaves pesadas são características notáveis da operação aeroportuária, o que deve ser considerado na avaliação do potencial de emissões de poluentes.

Por outro lado, ao analisarmos o Aeroporto Internacional do Galeão (SBGL), notamos uma maior diversidade de aeronaves que operaram no aeroporto ao longo da última década, totalizando 34 tipos diferentes. Essa variabilidade indica a capacidade do aeroporto em acomodar uma ampla gama de aeronaves, o que, por sua vez, pode ter um impacto positivo na redução das emissões de poluentes. A possibilidade de operar aeronaves mais leves e com eficiência de combustível superior pode ser promovida, contribuindo para uma operação aeroportuária mais sustentável.

Entretanto, ao examinarmos a Figura 15, é evidente que o número de aeronaves classificadas como "Médias" permaneceu consistentemente alto ao longo de todos os anos, apresentando uma variação significativa no número total de atividades registradas em comparação com as demais categorias. Além disso, a categoria "Super" contou com um número limitado de aeronaves durante o período analisado, com apenas um pico observado em 2014. Curiosamente, a categoria "Leve" não disponibilizou dados até o ano de 2019.

Esses dados sugerem que o Galeão é uma base predominantemente ativa para voos domésticos, o que se alinha com observações anteriores, pois a utilização de aeronaves maiores costuma estar associada a operações internacionais. Portanto, embora o SBGL demonstre a capacidade de acomodar uma variedade de aeronaves, ainda é necessária uma análise mais aprofundada para determinar a proporção de aeronaves mais leves e eficientes em termos de combustível. Tal análise é crucial para avaliar o verdadeiro potencial de redução das emissões de poluentes no aeroporto.

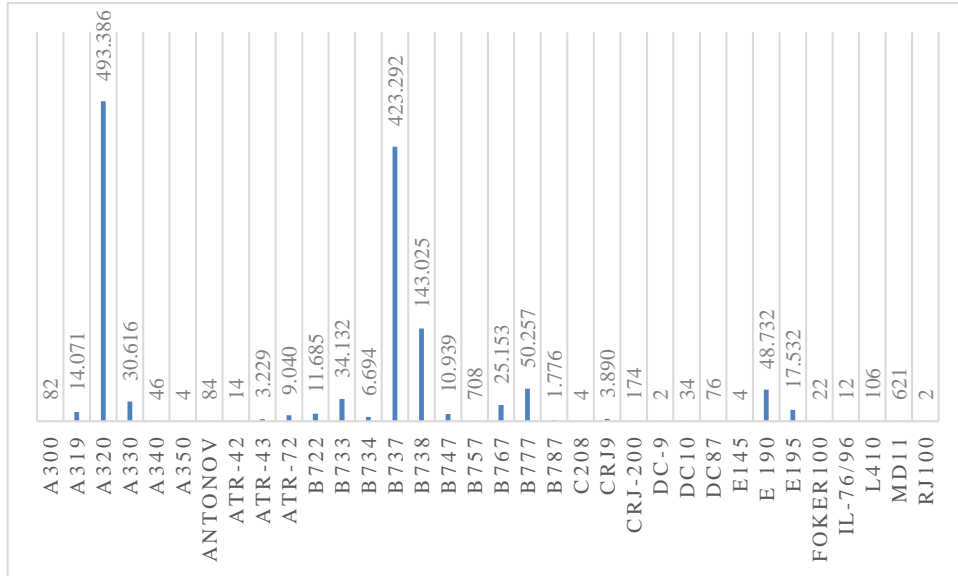


**Figura 15** - Distribuição de categorias de aeronave por atividade de voo

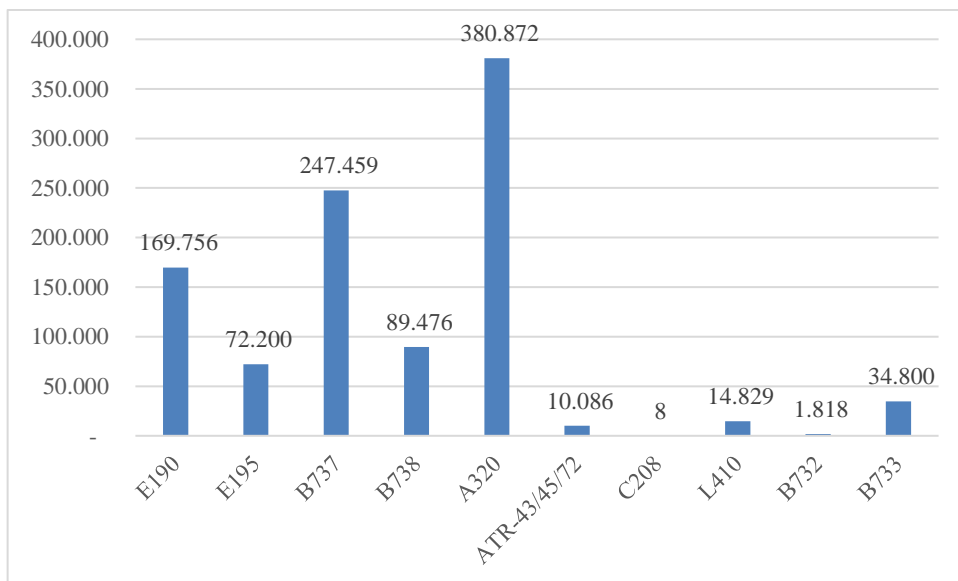
Esses dados são relevantes para a avaliação das emissões de poluentes nos aeroportos, uma vez que a relação entre o peso das aeronaves e as emissões é significativa. Aeronaves mais pesadas geralmente emitem uma quantidade superior de poluentes em comparação com suas contrapartes mais leves. A compreensão da distribuição das aeronaves por categoria possibilita a seleção de medidas eficazes para reduzir as emissões e melhorar a qualidade do ar nas proximidades do aeroporto.

Nesse contexto, algumas estratégias mitigadoras podem ser consideradas para o SBGL. Por exemplo, a limitação do tráfego de aeronaves mais pesadas durante determinados horários do dia pode ser uma abordagem eficaz. Além disso, a promoção da utilização de aeronaves mais leves e eficientes em termos de combustível pode ser uma solução relevante para reduzir as emissões poluentes.

As Figuras 16 e 17 oferecem uma visão detalhada da participação de diferentes tipos de aeronaves no ciclo LTO ao longo da década analisada. No caso do SBGL, é possível observar que as aeronaves da família A320, que incluem modelos como o A319, A320 e A321, lideraram em número de participações, totalizando 507.477 operações. Em seguida, as aeronaves da família B737, que abrangem modelos como B733, B734, B737 e B738, totalizaram 607.143 participações, destacando-se como as segundas mais utilizadas no aeroporto. Além disso, outras aeronaves também desempenharam papéis importantes em termos de participação, incluindo o E190, com 48.732 operações, o ATR-72, com 9.040 operações, e o B777, com 50.257 operações.



**Figura 16** - Distribuição de tipos de aeronaves por ciclos LTO no SBGL



**Figura 17** - Distribuição de tipos de aeronaves por ciclos LTO no SBRJ

No SBRJ, os dados mostram que as famílias A320 e B737 foram as mais utilizadas no período, com uma quantidade significativa de ciclos LTO completos. No entanto, é importante destacar que a participação das aeronaves E190 e E195 é bem maior em relação ao Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (SBGL), com 241.956 registros em ciclo LTO. Apesar da grande diferença de tamanho e capacidade entre os dois aeroportos, os números mostram uma certa paridade entre eles.

A ampla presença das famílias A320, B737, E190, ocupando as maiores posições em termos de participação em ciclos LTO, é um indicativo da forte atividade doméstica no mercado

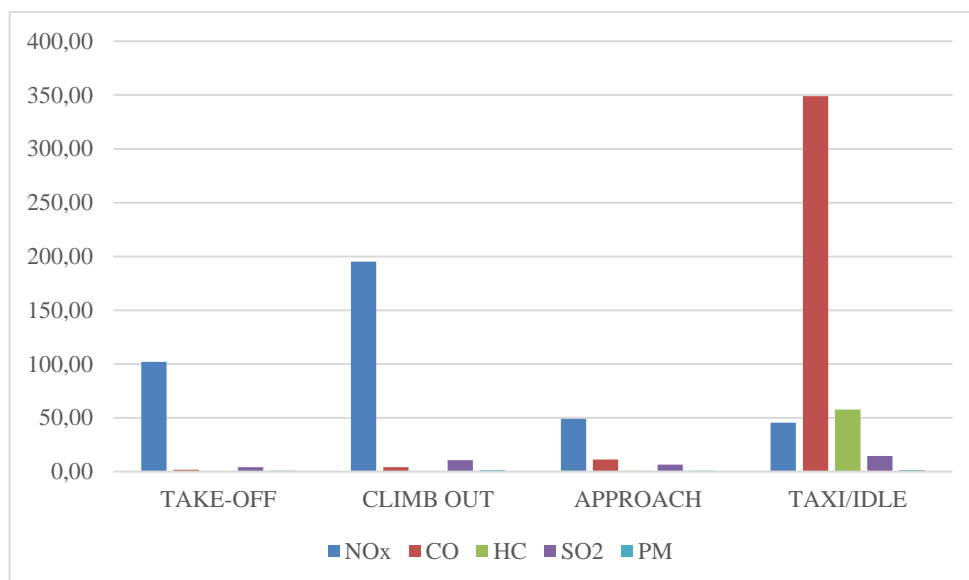
de transporte aéreo no Estado, uma vez que esses tipos de aeronaves são utilizados pelas principais companhias aéreas do país. É importante lembrar que, devido à quantidade de ciclos realizados no aeroporto, as aeronaves com maiores porcentagens de participação acabam se tornando as maiores emissoras para o montante final, mesmo que haja presença de aeronaves consideradas pesadas ou super, com padrões de emissão e queima de combustível maiores.

Porém, é válido observar que aeronaves mais antigas e com alto padrão de consumo e emissões, como A319, B722, B733 e B734, ainda tiveram uma participação significativa nos ciclos de LTO. Isso deve ser uma preocupação, já que o aeroporto tende a um aumento em suas operações e a participação de aviões mais antigos é um fator agravante para a emissão de poluentes. Por isso, é importante que a expectativa de vida e o tipo do motor das aeronaves sejam observados como forma de limitar o aumento das emissões. Aeronaves com motores envelhecidos, em média 30 anos, fornecem índices de emissão mais altos em comparação com o mesmo tipo de aeronave, mas novos.

Em resumo, a diversidade de aeronaves que operam em um aeroporto é um fator importante a ser considerado na avaliação das emissões. Embora o tamanho e as características do aeroporto possam influenciar essa diversidade, é possível promover medidas para incentivar a utilização de aeronaves mais eficientes em termos de combustível e reduzir a emissão de poluentes.

## **5.2 Avaliação das emissões de poluentes no ciclo LTO**

Neste capítulo, serão apresentados dados sobre a distribuição de poluentes no ciclo LTO de diversas aeronaves que operam nos aeroportos do Rio de Janeiro. A figura 18 apresenta as emissões de cinco poluentes atmosféricos durante as quatro fases do ciclo LTO: decolagem, subida, aproximação e taxiamento. Os poluentes são óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e material particulado (PM).



**Figura 18** - Distribuição de poluentes por fases do ciclo LTO no período 2009-2019

De acordo com os dados apresentados, em valores agregados, a fase de subida foi a que mais emitiu NO<sub>x</sub>, com média de 195,1 kg/ciclo LTO, seguida pela fase de decolagem com 101,86 kg/ciclo LTO. A fase de aproximação apresentou a menor emissão de NO<sub>x</sub>, com 49,17 kg/ciclo LTO. Esses resultados são esperados, pois durante a subida e decolagem, as aeronaves consomem mais combustível e, portanto, emitem mais poluentes.

Já o CO apresentou sua maior emissão durante o taxiamento e em marcha lenta (*idle*), com 349,01 kg/ciclo LTO, enquanto a menor emissão ocorreu durante a decolagem, com 1,65 kg/ciclo LTO. Isso se deve ao fato de que, durante o taxiamento, as aeronaves ficam com seus motores ligados por mais tempo, o que aumentou a emissão desse poluente.

As emissões de HC são baixas em todas as fases do ciclo, sendo a maior emissão durante o taxiamento, com quase 57,6 kg/ciclo LTO. O táxi, também, foi o que mais emitiu SO<sub>2</sub>, com 14,56 kg/ciclo LTO, enquanto a fase de subida apresentou emissões de 10,7 kg/ciclo LTO. Por fim, o material particulado apresenta baixas emissões em todas as fases do ciclo, apresentando um empate nas fases de subida e durante o taxiamento, com 1,4 e 1,5 kg/ciclo LTO, respectivamente.

Vale lembrar que o dióxido de enxofre, assim como os óxidos de nitrogênio, são poluentes que podem causar impactos significativos na qualidade do ar e na saúde humana. Ambos apresentaram as médias constantes durante todas as fases do ciclo LTO, com um destaque para NO<sub>x</sub>, que além de tudo, ainda apresentou valores significativos, principalmente, na subida e na decolagem, fases complementares.

Além disso, é interessante ressaltar que a fase de taxiamento apresentou os valores mais elevados de emissão de poluentes. Isso pode ser explicado pelo fato de que os aviões geralmente utilizam os motores em marcha lenta durante a fase, o que aumenta a emissão de poluentes em relação a demais do ciclo LTO. No entanto, é importante observar que há uma certa incerteza quanto ao tempo gasto nessa fase, uma vez que não há um sistema padronizado de monitoramento.

Durante a pesquisa realizada, foi possível identificar que os poucos registros de tempo em táxi são oriundos da progressão de Ficha de Voo Eletrônica (FPVE) dos voos, que são gerenciadas manualmente pelos ATCOs. Essa falta de padronização pode gerar incertezas em relação aos dados obtidos e tornar mais difícil a implementação de medidas eficazes de controle de emissão de poluentes nessa fase do ciclo LTO. Dentre diversas atribuições, os controladores devem executar o comando de progressão das FPVEs no exato momento em que as aeronaves iniciam seu taxiamento e, comandar novamente as fichas, na exata hora em que iniciarem o aumento de potência para a decolagem.

Logo, se faz necessário avaliar como cada aeronave que participou dos ciclos se comportou em termos de emissões. A tabela 9 apresenta informações sobre o consumo de combustível e emissões de poluentes de diversas aeronaves durante o ciclo LTO em ambos os aeroportos.

**Tabela 9 - Combustível gasto e Emissões Totais de Poluente por Ciclo LTO (kg)**

<b>Aeronave</b>	<b>Combustível</b>	<b>HC</b>	<b>CO</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>SO<sub>2</sub></b>	<b>PM</b>
<b>A300-200</b>	1742	6	28	25	1,4	0,2
<b>A319</b>	731	0,6	6,4	9	0,6	0,1
<b>A320</b>	771	0,6	6,2	9	0,6	0,1
<b>A330</b>	2034	0,2	13	28	1,6	0,2
<b>A340</b>	955	1,8	12	15	0,8	0,1
<b>A350</b>	2138	1	20	41	1,7	0,2
<b>AN-124</b>	3287	12	55	50	2,6	0,4
<b>ATR42-45</b>	451	0,01	3,6	4,5	0,4	0,03
<b>ATR-72</b>	633	0,04	6,7	6,5	0,5	0,04
<b>B722</b>	1459	1,3	9	12	1,2	0,04
<b>B733</b>	783	0,9	13	7,2	0,6	0,07
<b>B734</b>	897	0,6	11	9,7	0,7	0,08

<b>B737</b>	779	0,9	8	9	0,6	0,09
<b>B738</b>	913	0,7	6,9	13,5	0,7	0,1
<b>B747</b>	3291	12,7	58	43	2,6	0,4
<b>B757</b>	1421	2,5	10	27	1	0
<b>B763</b>	1790	7,6	29,7	29	1,4	0,5
<b>B777</b>	2907	4	38	68	2	0,3
<b>B787</b>	1573	0,03	6,5	27	1,3	0,1
<b>C208</b>	429	0	5	4	0,3	0,04
<b>CRJ-9</b>	481	0,04	4	4	0,4	0,04
<b>CRJ-200</b>	329	0,8	7	2	0,3	0,04
<b>DC-9</b>	941	3	6	8	0,8	0,03
<b>DC10</b>	2306	2,4	21	36	1,8	0,30
<b>DC-87</b>	1864	97	92	11	1,5	0
<b>E145</b>	314	0,6	6	2,7	0,3	0,02
<b>E190</b>	606	1,7	13,6	5,7	0,5	0,07
<b>E195</b>	646	1,4	12,6	6,7	0,5	0,08
<b>FOKKER-100</b>	755	1,5	14	6	0,6	0,1
<b>IL-76/96</b>	2468	2	17	33	2	0,3
<b>L410</b>	2168	2,4	27,6	47	1,7	0,2
<b>MD-11</b>	2628	1,4	18	38	2,1	0,2
<b>RJ100</b>	603	1,4	11,2	4	0,5	0,08

Quando analisamos os valores de consumo de combustível, fica evidente que a relação entre o tamanho das aeronaves e o consumo de combustível é diretamente proporcional. Aeronaves de maior porte, como o B747 e o AN-124, consomem significativamente mais combustível em comparação com aeronaves menores, como o C208 e o CRJ-200. Isso é uma consequência natural, visto que o tamanho e o peso de uma aeronave exercem uma influência direta sobre a quantidade de combustível consumido. Essa observação reforça a tendência identificada na análise do mix de aeronaves operando em cada aeroporto. Portanto, onde há uma presença mais significativa de aeronaves maiores e mais pesadas, como é o caso do SBGL, é esperado um maior consumo de combustível e, por conseguinte, um aumento nas emissões durante o ciclo LTO.

No que diz respeito às emissões de poluentes, os valores de poluentes como HC (hidrocarbonetos), CO (monóxido de carbono), NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrogênio), SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre) e PM (material particulado) exibem variações consideráveis entre as diferentes aeronaves. De maneira geral, as aeronaves de maior porte tendem a emitir quantidades mais expressivas de poluentes em comparação com as aeronaves menores, seguindo a mesma tendência relacionada ao consumo de combustível. Entretanto, é importante destacar que há exceções a essa regra, como o caso do DC-87, que emite quantidades notavelmente altas de HC e CO. Como mencionado anteriormente, a idade e o estado de manutenção das aeronaves, como no caso do DC-87, podem representar exceções em relação às emissões, visto que a tecnologia e os padrões de emissão evoluíram ao longo do tempo.

Os dados apresentados na tabela mostram que os poluentes emitidos durante as fases de subida, decolagem e táxi de aeronaves são um problema significativo. Embora o NO<sub>x</sub> seja o principal poluente emitido, é importante notar que o CO também apresenta valores expressivos. Portanto, é fundamental concentrar esforços em reduzir a emissão desses dois poluentes durante todas as fases do ciclo LTO, com ênfase especial nas fases em que sua presença é mais intensa. Reduzir a emissão desses poluentes pode ser uma maneira eficaz de minimizar o impacto ambiental dessas operações aéreas.

O consumo de combustível durante o ciclo LTO também desempenha um papel fundamental na operação das aeronaves, independentemente de quão modernas elas possam ser. Mesmo aeronaves mais atuais, como o B738, demonstraram um consumo significativo de combustível durante essas fases críticas do voo. Essa realidade adquire uma relevância ainda maior quando consideramos que o combustível representa o principal custo operacional para as companhias aéreas. De acordo com informações fornecidas pela Associação Brasileira das Empresas Aéreas (ABEAR) em 2019, os custos com combustível representaram aproximadamente 28% dos custos operacionais das companhias aéreas no Brasil (ABEAR, 2019). Isso significa que qualquer esforço em direção à redução do consumo de combustível durante o ciclo LTO não apenas pode resultar em economias substanciais para as companhias aéreas, mas também contribuir para a redução das emissões de poluentes atmosféricos, com impactos positivos tanto econômicos quanto ambientais.



### 5.3 Evolução das emissões entre 2009 e 2019

Os ciclos LTO nos aeroportos do Galeão e Santos Dumont de 2009 a 2019 foram analisados nas tabelas 10 e 11, que apresentam os valores de emissão de poluentes. Embora o consumo de combustível tenha variado durante o período, as emissões de poluentes permaneceram elevadas em ambos os aeródromos. O NO<sub>x</sub> foi o poluente mais emitido, seguido pelo CO e HC. Observa-se que, ao longo dos anos, houve uma redução das emissões de CO e HC, mas um aumento das emissões de NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e PM.

**Tabela 10** - Evolução do Consumo de Combustível e Emissões de Poluentes do Ciclo LTO 2009 – 2019 no SBGL

ANO	Combustível (kg)	HC (kg)	CO (kg)	NO <sub>x</sub> (kg)	SO <sub>2</sub> (kg)	PM (kg)
2009	107043579	133458	1183720	1361293	85635	13202
2010	104828305	124789	1093354	1347846	83863	13006
2011	116451862	136233	1236102	1483822	93162	14416
2012	134533188	164978	1494435	1750733	107627	16297
2013	127829648	156840	1367293	1724894	102264	15671
2014	122621031	145555	1282051	1659295	98097	15041
2015	117924638	141436	1238717	1582039	94340	14464
2016	111623349	138722	1186019	1505853	89299	13706
2017	113963926	120559	1078121	1653244	91171	14531
2018	106534048	109936	1004761	1565797	85227	13479
2019	90139796	93757	844748	1308928	72112	11482

**Tabela 11** - Evolução do Consumo de Combustível e Emissões de Poluentes do Ciclo LTO 2009 – 2019 no SBRJ

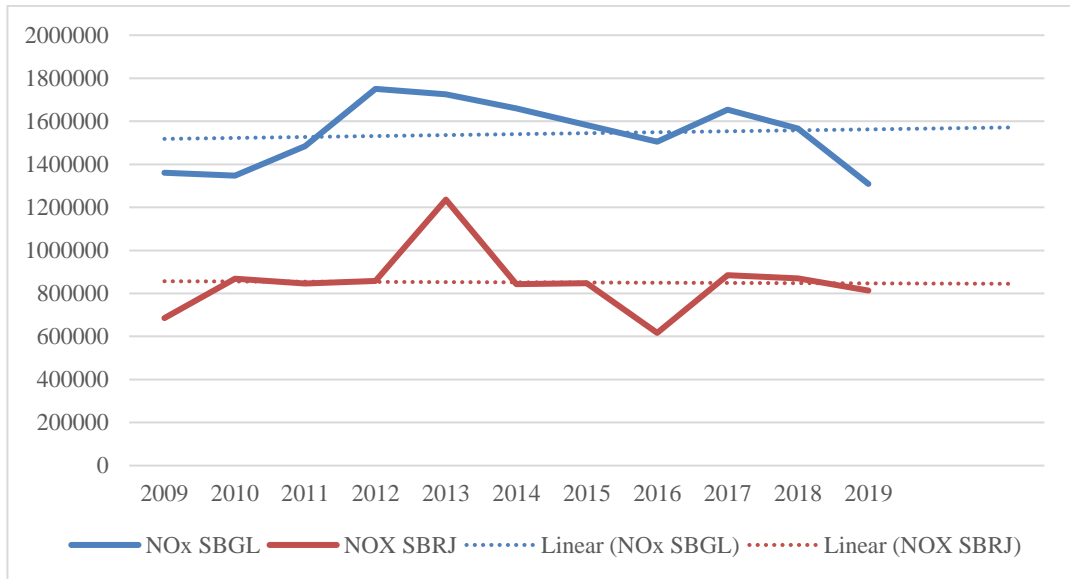
ANO	Combustível (kg)	HC (kg)	CO (kg)	NO <sub>x</sub> (kg)	SO <sub>2</sub> (kg)	PM (kg)
2009	57056000	60548	628567	685007	45645	6888
2010	74726453	85399	870076	867976	59781	9021
2011	74980142	89486	901382	846580	59984	9025
2012	77230038	100472	961894	858152	61784	9380
2013	89826478	107945	1044268	1236245	71861	10327
2014	75624643	104245	932469	843174	60500	9395
2015	75943159	103870	930616	847803	60755	9439

<b>2016</b>	55862634	79261	707158	616714	44690	7093
<b>2017</b>	70427938	73981	736443	884941	56342	9182
<b>2018</b>	69071743	71059	709350	870329	55257	9032
<b>2019</b>	64730552	69947	690896	812858	51784	8419

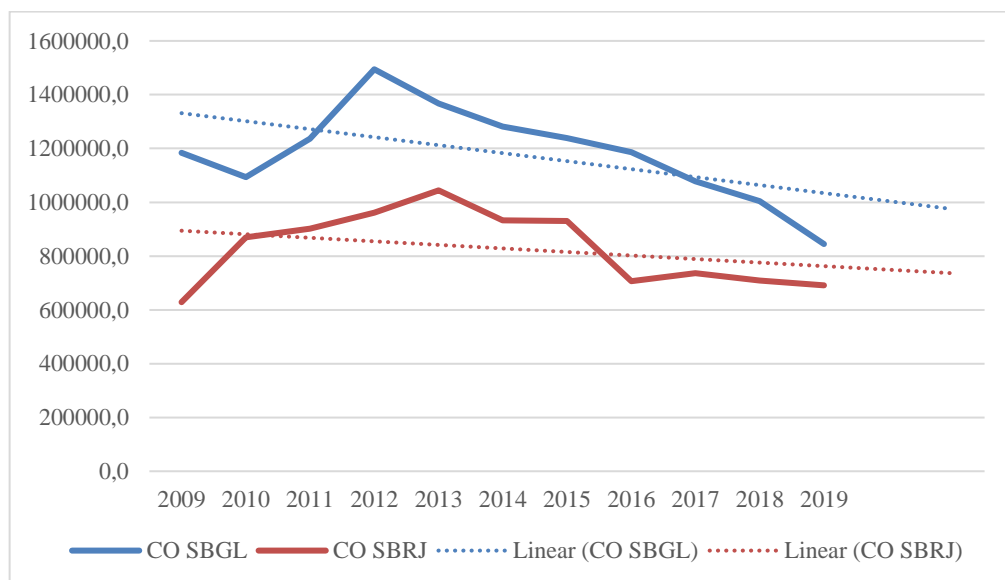
Devido ao período de 11 anos analisado, foram emitidas grandes quantidades de poluentes nos aeroportos do SBGL e SBRJ, totalizando aproximadamente 32.577 e 20.155 toneladas, respectivamente, durante a atividade aérea do ciclo LTO. É importante ressaltar que, devido à proximidade dos aeroportos, esses poluentes podem ser considerados de uma única fonte, já que apresentam áreas de interseção. Além disso, o capítulo 4 da dissertação indica que existem áreas de sobreposição além do que é comum para a literatura, ampliando a área de impacto simultâneo dos poluentes emitidos. No entanto, é interessante notar que a predominância de certos poluentes varia em diferentes áreas do ciclo, possibilitando uma análise mais focada em determinados casos.

Os gráficos a seguir, figura 19, comparam as médias gerais de  $\text{NO}_x$  emitidos nos ciclos LTO nos aeroportos do Galeão e Santos Dumont. É possível observar que há uma linha de tendência ascendente para o  $\text{NO}_x$ , que difere da quantidade de movimento vista anteriormente. Embora a redução dos voos tenha sido mais acentuada no SBGL a partir de 2014, as emissões desse poluente não acompanharam essa tendência. Por outro lado, para o SBRJ, as emissões apresentam uma tendência mais linear ao longo do tempo. No geral, o SBGL emitiu mais  $\text{NO}_x$  do que o SBRJ, com ambos apresentando um pico entre 2012 e 2013, uma redução em 2016 e novamente uma tendência ascendente.

Já em relação às emissões de CO, representadas na figura 20, há diferenças significativas em relação às emissões de  $\text{NO}_x$ . As emissões de CO acompanham mais de perto a variação de voos ao longo do tempo. Em 2009, as emissões de CO foram de 1.183.720 kg para o SBGL e 628.567 kg para o SBRJ, enquanto em 2019 esses valores foram reduzidos para 844.747 kg e 690.896 kg, respectivamente. Embora tenha havido uma variação negativa para o Galeão e uma variação positiva para o Dumont, é importante destacar que ainda representam um ganho em relação ao aumento médio de voos ao longo do período. Essa queda nas emissões pode ser resultado de melhorias na eficiência dos motores das aeronaves, bem como das políticas e regulamentações empregadas.



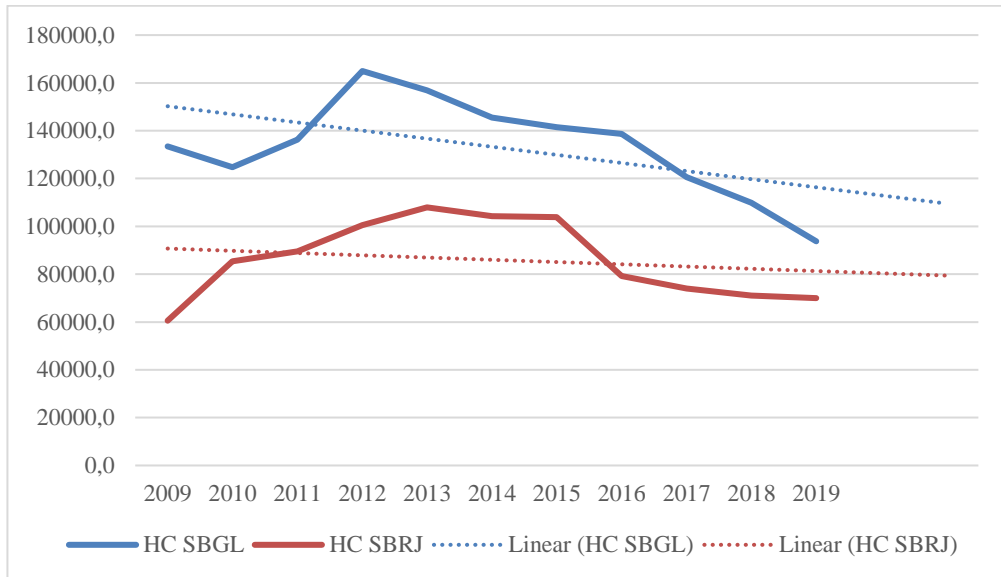
**Figura 19** – Comparação das emissões médias de NO<sub>x</sub> entre SBGL e SBRJ



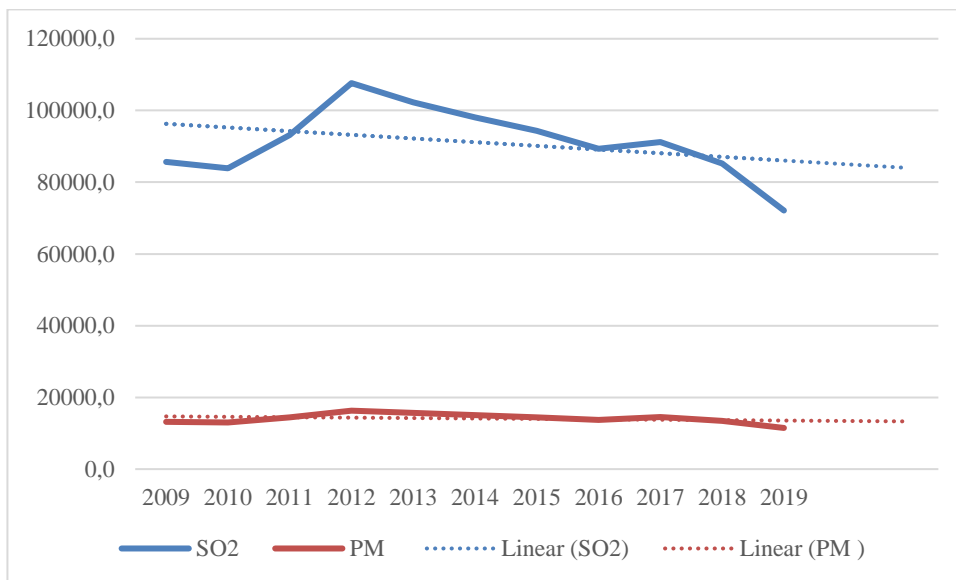
**Figura 20** – Comparação das emissões médias de CO entre SBGL e SBRJ

A comparação entre as emissões de CO e as de NO<sub>x</sub> sugere uma diferença no comportamento desses poluentes ao longo do tempo. Enquanto as emissões de NO<sub>x</sub> apresentaram uma tendência de aumento, as emissões de CO diminuíram, como evidenciado na figura 20. Outros poluentes também parecem apresentar comportamento semelhante ao do CO, porém de forma menos acentuada, o caso para SO<sub>2</sub> e PM, ou se aproximam desse padrão como HC, o que pode indicar que os esforços para redução das emissões nos aeroportos têm se concentrado mais no controle do CO do que nos demais poluentes. Entretanto, outra possível explicação é que as melhorias na eficiência dos motores a jato permitiram uma redução mais

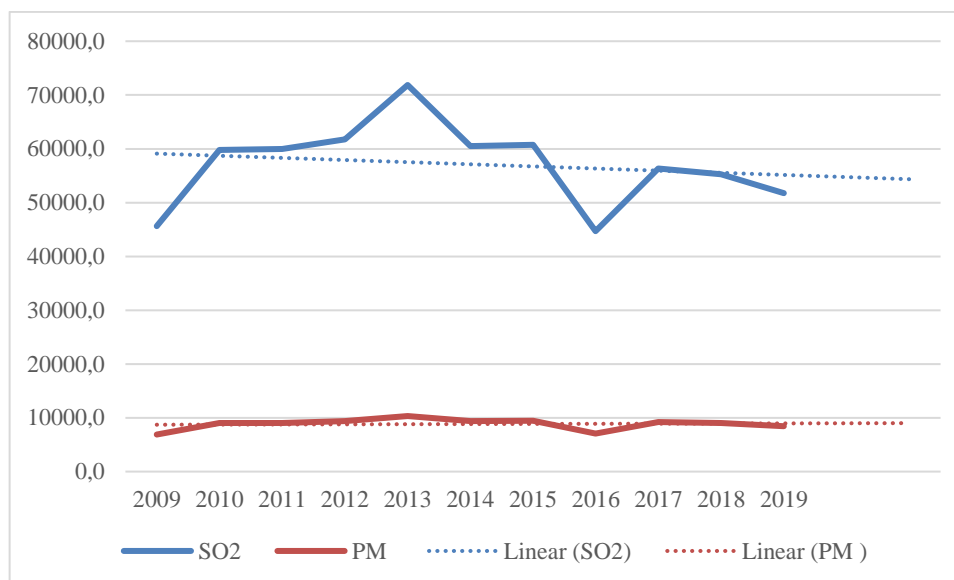
acentuada nas emissões de alguns poluentes em detrimento de outros. Essa segunda hipótese é preocupante, pois esperar por avanços tecnológicos pode não trazer os retornos esperados em termos de redução das emissões de poluentes.



**Figura 21** – Comparação das emissões médias de HC entre SBGL e SBRJ



**Figura 22** – Evolução de SO<sub>2</sub> e PM no SBGL



**Figura 23** – Evolução de SO<sub>2</sub> e PM no SBRJ

Em termos gerais, apresenta-se uma tendência de diminuição nas emissões de SO<sub>2</sub> e PM em ambos os aeroportos ao longo dos anos. No entanto, a distribuição desses poluentes difere entre eles. Observa-se que, enquanto as emissões de SO<sub>2</sub> apresentam uma tendência mais acentuada de redução, as emissões de PM mostram um comportamento mais linear, com poucas variações significativas. Além disso, é possível notar que essa tendência de redução é mais pronunciada para o SBGL do que para o SBRJ, onde a tendência é suavizada. Já para o Santos Dumont, os dados indicam uma leve tendência de aumento nas emissões de PM para os últimos anos. Isso sugere que ainda há espaço para melhorias na mitigação de ambos os poluentes, já que os valores de emissão ainda são consideráveis.

As tabelas 12 e 13 apresentam os valores obtidos dos cálculos de GEE oriundos do ciclo LTO durante o período de análise. Foram contabilizados aproximados 4 milhões de toneladas e 2,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas em uma década pelos aeroportos do SBGL e SBRJ, respectivamente.

**Tabela 12** – Evolução das emissões de Gases do Efeito Estufa no SBGL (kg)

ANO	SBGL		
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
2009	3,37E+08	9,44E+03	9,74E+03
2010	3,30E+08	9,25E+03	9,51E+03
2011	3,67E+08	1,03E+04	1,06E+04
2012	4,24E+08	1,19E+04	1,22E+04
2013	4,03E+08	1,13E+04	1,15E+04
2014	3,86E+08	1,08E+04	1,10E+04
2015	3,71E+08	1,04E+04	1,06E+04

<b>2016</b>	3,52E+08	9,85E+03	1,00E+04
<b>2017</b>	3,59E+08	1,01E+04	1,00E+04
<b>2018</b>	3,36E+08	9,40E+03	9,35E+03
<b>2019</b>	2,84E+08	7,95E+03	7,92E+03

**Tabela 13** – Evolução das emissões de Gases do Efeito Estufa no SBRJ (kg)

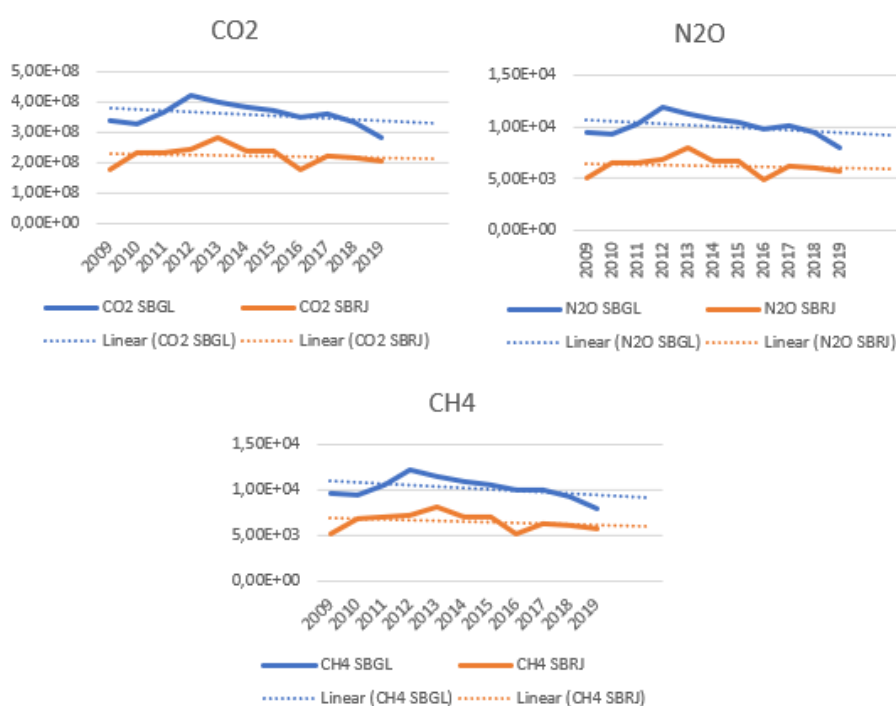
ANO	SBRJ		
	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
<b>2009</b>	1,80E+08	5,03E+03	5,22E+03
<b>2010</b>	2,35E+08	6,59E+03	6,93E+03
<b>2011</b>	2,36E+08	6,61E+03	6,98E+03
<b>2012</b>	2,43E+08	6,81E+03	7,20E+03
<b>2013</b>	2,83E+08	7,92E+03	8,16E+03
<b>2014</b>	2,38E+08	6,67E+03	7,01E+03
<b>2015</b>	2,39E+08	6,70E+03	7,03E+03
<b>2016</b>	1,76E+08	4,93E+03	5,17E+03
<b>2017</b>	2,22E+08	6,21E+03	6,33E+03
<b>2018</b>	2,18E+08	6,09E+03	6,21E+03
<b>2019</b>	2,04E+08	5,71E+03	5,82E+03

Analisando os dados apresentados, podemos notar uma tendência de aumento nas emissões de CO<sub>2</sub> em ambos os aeroportos ao longo dos anos e uma posterior queda, com o SBGL apresentando valores mais elevados, da mesma forma que ocorre com a emissão de poluentes. No entanto, é importante ressaltar que em 2019, houve uma diminuição significativa na emissão de CO<sub>2</sub> em ambos os aeroportos, especialmente no SBGL.

Quanto ao N<sub>2</sub>O, observamos que os valores das emissões são bem menores se comparados ao CO<sub>2</sub>, mas ainda assim apresentam um aumento ao longo do tempo, embora com variações mais suaves. Já em relação ao metano (CH<sub>4</sub>), nota-se uma tendência de diminuição nas emissões em ambos os aeroportos ao longo dos anos. É interessante notar que, em alguns anos, as emissões de CH<sub>4</sub> do SBGL são maiores do que as do SBRJ, enquanto em outros anos ocorre o contrário. Vale destacar que, embora as emissões de CH<sub>4</sub> sejam menores do que as de CO<sub>2</sub>, ele é um gás de efeito estufa mais potente em termos de aquecimento global.

A análise da figura 24 mostra de forma clara e comparativa o comportamento das emissões de GEE entre os aeroportos SBGL e SBRJ. Observa-se que as tendências para o SBGL são maiores que para o SBRJ, especialmente nas emissões de metano, embora ambos apresentem uma redução ao longo dos anos. Entretanto, é importante destacar que a disposição para o SBRJ é mais linear, quase se mantendo estável nos últimos anos, o que é evidente também para os outros GEE.

Apesar de ter recebido uma quantidade significativamente menor de voos do que seu concorrente, o SBRJ demonstra menor variação nas suas emissões. Isso sugere que o Galeão foi mais eficiente que o Santos Dumont ao longo da década. No entanto, ambos os aeroportos geram preocupação em relação ao impacto ambiental das atividades aeroportuárias, mesmo com a redução tanto de poluentes quanto de GEE, indicando esforços para a mitigação. Dessa forma, é necessário o desenvolvimento de estratégias de mitigação diferenciadas e específicas para cada um dos aeroportos, levando em consideração as suas particularidades e as diferenças nas emissões entre eles, que são bastante significativas quando comparados com outras fontes de emissão na cidade.



**Figura 24** – Comparativo das Tendências nas Emissões de GEE

#### 5.4 Análise comparativa de emissões por passageiros, CO<sub>2</sub> eq. e de custos ambientais

Os aeroportos do Rio de Janeiro, Galeão (SBGL) e Santos Dumont (SBRJ), apresentam diferenças significativas em relação às suas emissões por passageiro. Além disso, é importante também considerar os valores de CO<sub>2</sub> equivalente e os custos ambientais associados a essas emissões. Neste capítulo, serão apresentados os resultados dessas análises para os dois aeroportos.

Como se pode ver nas tabelas 14 e 15 o SBGL foi mais eficiente em termos de emissão por passageiros. É possível observar que houve uma redução em todas as emissões analisadas ao longo do período, para o Galeão. As emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que são as mais relevantes, diminuíram de 28,6 kg por passageiro em 2009 para 20,4 kg por passageiro em

2019, confirmando o que foi observado na seção anterior. Além disso, outras emissões relevantes, como as de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e material particulado (PM), também apresentaram reduções significativas.

**Tabela 14** – Evolução das emissões de poluentes e GEE por passageiro no SBGL  
(kg/passageiro)

ANO	HC	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
2009	1,13E-02	1,01E-01	1,16E-01	7,27E-03	1,12E-03	2,86E+01	8,02E-04	8,27E-04
2010	1,02E-02	8,93E-02	1,10E-01	6,85E-03	1,06E-03	2,70E+01	7,55E-04	7,77E-04
2011	9,13E-03	8,28E-02	9,94E-02	6,24E-03	9,66E-04	2,46E+01	6,88E-04	7,09E-04
2012	9,54E-03	8,64E-02	1,01E-01	6,22E-03	9,42E-04	2,45E+01	6,86E-04	7,04E-04
2013	9,22E-03	8,04E-02	1,01E-01	6,01E-03	9,21E-04	2,37E+01	6,63E-04	6,74E-04
2014	8,47E-03	7,46E-02	9,65E-02	5,71E-03	8,75E-04	2,25E+01	6,29E-04	6,39E-04
2015	8,49E-03	7,44E-02	9,50E-02	5,67E-03	8,69E-04	2,23E+01	6,25E-04	6,36E-04
2016	8,65E-03	7,40E-02	9,39E-02	5,57E-03	8,55E-04	2,19E+01	6,14E-04	6,24E-04
2017	7,47E-03	6,68E-02	1,02E-01	5,65E-03	9,00E-04	2,22E+01	6,23E-04	6,20E-04
2018	7,29E-03	6,67E-02	1,04E-01	5,65E-03	8,94E-04	2,23E+01	6,23E-04	6,20E-04
2019	6,74E-03	6,08E-02	9,41E-02	5,19E-03	8,26E-04	2,04E+01	5,72E-04	5,69E-04

**Tabela 15** – Evolução das emissões de poluentes e GEE por passageiro no SBRJ  
(kg/passageiro)

ANO	HC	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>2</sub>	PM	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
2009	1,17E-02	1,21E-01	1,32E-01	8,81E-03	1,33E-03	3,47E+01	9,71E-04	1,01E-03
2010	1,09E-02	1,11E-01	1,11E-01	7,66E-03	1,16E-03	3,01E+01	8,44E-04	8,87E-04
2011	1,03E-02	1,04E-01	9,75E-02	6,91E-03	1,04E-03	2,72E+01	7,62E-04	8,04E-04
2012	1,10E-02	1,05E-01	9,40E-02	6,77E-03	1,03E-03	2,66E+01	7,46E-04	7,88E-04
2013	1,17E-02	1,13E-01	1,34E-01	7,76E-03	1,12E-03	3,06E+01	8,56E-04	8,82E-04
2014	1,05E-02	9,41E-02	8,51E-02	6,11E-03	9,48E-04	2,40E+01	6,73E-04	7,07E-04



<b>2015</b>	1,07E-02	9,62E-02	8,77E-02	6,28E-03	9,76E-04	2,47E+01	6,93E-04	7,27E-04
<b>2016</b>	8,80E-03	7,85E-02	6,84E-02	4,96E-03	7,87E-04	1,95E+01	5,47E-04	5,74E-04
<b>2017</b>	8,08E-03	8,04E-02	9,66E-02	6,15E-03	1,00E-03	2,42E+01	6,78E-04	6,92E-04
<b>2018</b>	7,69E-03	7,68E-02	9,42E-02	5,98E-03	9,78E-04	2,36E+01	6,60E-04	6,72E-04
<b>2019</b>	7,65E-03	7,56E-02	8,89E-02	5,66E-03	9,21E-04	2,23E+01	6,24E-04	6,37E-04

Para a maioria dos poluentes e gases, houve uma redução nas emissões por passageiro ao longo dos anos, com exceção de algumas flutuações. O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é de longe o poluente com as maiores emissões por passageiro em todos os anos e apresenta uma tendência de redução lenta, mas constante, ao longo do tempo. Os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) apresentam a maior flutuação nas emissões por passageiro, mas seu comportamento é compatível com o analisado anteriormente. Os hidrocarbonetos (HC) e o monóxido de carbono (CO) apresentam uma tendência de redução constante ao longo dos anos, mas em níveis bem mais baixos que o CO<sub>2</sub>. Já as emissões de material particulado (PM) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) são muito baixas em comparação com os outros poluentes, mas também apresentam uma tendência de redução constante.

Comparando os valores desses poluentes, vemos que as emissões por passageiro em SBRJ são geralmente maiores do que em SBGL, demonstrando uma ineficiência do primeiro. O comportamento do dióxido de carbono é importante, principalmente, quando se avaliam os resultados em termos de carbono equivalente. Ao avaliar os resultados apenas em relação ao CO<sub>2</sub>eq, podemos observar que o SBGL teve uma emissão de 3,98E+09 kg de CO<sub>2</sub>eq, enquanto o SBRJ teve uma emissão de 2,5E+09 kg de CO<sub>2</sub>eq. Isso indica que o SBGL apresenta um maior potencial de impacto ambiental em relação às emissões de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global. É importante destacar que a análise de carbono equivalente leva em conta o potencial de aquecimento global de cada gás, o que permite uma avaliação mais precisa e justa das emissões em termos ambientais. Logo, pode-se interpretar que o SBGL é menos prejudicial em termos de poluentes em relação ao SBRJ, porém tem mais potencial de contribuir com as mudanças climáticas.

A tabela 16 mostra o aproveitamento de RPK (receita por quilômetro voado) em diferentes anos para os aeroportos SBRJ e SBGL. O RPK é uma medida de eficiência operacional que indica a quantidade de receita gerada por cada quilômetro voado por um avião.

Observa-se que o aeroporto SBGL tem um aproveitamento maior de RPK em comparação com SBRJ em quase todos os anos apresentados.

**Tabela 16 – Comparativo de aproveitamento do RPK**

<b>AD</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>
<b>SBRJ</b>	52%	56%	59%	59%	69%	70%	69%	61%	72%	72%	77%
<b>SBGL</b>	66%	64%	71%	74%	72%	77%	75%	68%	81%	76%	75%

Em ambos os aeroportos, pode-se notar que mesmo com bons níveis de aproveitamento da ocupação, ainda há espaço para melhorias. Nos cálculos para este trabalho, estimou-se que o SBRJ e o SBGL, caso operassem com 100% de aproveitamento de RPK, conseguiriam evitar 20% e 15% de suas emissões em termos de CO<sub>2</sub>eq, respectivamente. Isso significa que, se todas as aeronaves estivessem com suas capacidades totais de passageiros ocupadas, haveria uma diminuição significativa nas emissões.

Porém, essa situação é difícil de ser alcançada na prática, pois envolve muitos fatores, como a oferta e demanda de voos, horários de pico, sazonalidades, entre outros. Mas é importante ter em mente que a adoção de medidas que aumentem o aproveitamento de RPK, como melhorias na gestão de rotas e horários, podem contribuir para uma redução das emissões de gases poluentes e, conseqüentemente, ajudar a mitigar os impactos ambientais da aviação.

Além da redução de emissões de CO<sub>2</sub>eq, outra forma de avaliar o impacto ambiental dos aeroportos é por meio de uma avaliação dos custos ambientais associados a suas operações. Para quantificar os danos ambientais gerados pelas emissões de gases de efeito estufa e poluição do ar, foram realizados cálculos de custo do carbono para cada aeroporto. De acordo com os resultados, o custo ambiental do SBGL foi avaliado em € 462.207.193,57, representando mais de 42 milhões de euros anuais. Já para o SBRJ, o custo ambiental foi de cerca de 26,3 milhões de euros ao ano. Esses valores ressaltam a importância de avaliar os custos ambientais das operações dos aeroportos e incentivam a adoção de medidas sustentáveis para reduzir os impactos ambientais gerados.

Além dos custos ambientais associados à emissão de gases de efeito estufa, é importante destacar também os impactos da poluição local. Nesse sentido, foram calculados os custos da poluição ponderada localmente, levando em consideração a concentração de poluentes emitidos pelos aeroportos e seus efeitos na saúde humana e no meio ambiente.

Os resultados mostraram que o custo da poluição local do SBGL foi de aproximados € 14.396.250 por ano, enquanto para o SBRJ foi de quase € 8.010.260 por ano. Esses valores

evidenciam a necessidade de uma avaliação mais ampla dos custos ambientais associados às atividades aeroportuárias, uma vez que a poluição local pode ter impactos significativos na qualidade de vida das pessoas e no meio ambiente.

Dessa forma, a análise conjunta dos custos ambientais associados às emissões de gases de efeito estufa e à poluição local dos aeroportos, mostra que o SBGL apresenta um custo ambiental anual muito mais elevado do que o SBRJ. Esses resultados reforçam a importância de se investir em medidas para reduzir as emissões de poluentes nos aeroportos, a fim de minimizar os impactos ambientais e os custos associados a eles.

## **6 DISCUSSÕES SOBRE A GESTÃO DA QUALIDADE DO AR E DOS POSSÍVEIS IMPACTOS**

A gestão da qualidade do ar é uma questão crucial para garantir um ambiente saudável para a população e prevenir impactos negativos na saúde pública. Nos aeroportos, o controle das emissões de poluentes é uma preocupação constante, principalmente em áreas urbanas densamente povoadas, onde as consequências da poluição do ar são ainda mais graves.

Nesse sentido, é importante destacar a necessidade de medidas efetivas para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos, como a utilização de tecnologias mais limpas, o controle das operações de veículos terrestres próximas aos aeroportos e o monitoramento constante da qualidade do ar. Nessa seção serão avaliadas as medidas que já vem sendo empregadas e as possíveis modificações e adaptações a serem feitas de acordo com a análise, bem como as limitações do processo frente ao cenário de constante expansão do transporte aéreo.

### **6.1 Análise das estratégias e políticas mitigadoras**

Segundo a Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro (2011), o setor de transportes é o maior emissor de gases de efeito estufa (GEE) no município do Rio de Janeiro, onde foi responsável por 48,3% das emissões em 2005. O transporte aéreo apresentou um aumento de 5% ao ano no período de 2009 a 2019, e há previsões de aumento na taxa de crescimento até 2050. Dessa forma, a tecnologia e o tipo de combustível utilizados são fatores determinantes nas emissões de poluentes e GEE do setor, juntamente com o crescimento populacional, o crescimento econômico e as políticas de gestão no setor de transportes.

Para reduzir as emissões do transporte aéreo, é possível adotar medidas como aumentar a eficiência nos motores e substituir os combustíveis por opções mais sustentáveis, como biocombustíveis, hidrogênio e motores elétricos. Como visto no capítulo anterior, o uso de

combustível durante as fases de subida, decolagem e táxi é responsável por grande parte das emissões de gases poluentes. Vale destacar que o combustível utilizado na aviação é altamente refinado e de alta qualidade, o que acarreta um custo significativamente mais alto do que o combustível utilizado em veículos terrestres. Por isso, a redução do consumo pode trazer benefícios ambientais e econômicos.

A redução do consumo de combustível pode ser uma estratégia importante para as companhias aéreas, principalmente em momentos de crise econômica e aumento nos preços do petróleo, que foram fatores apontados como responsáveis pela redução dos movimentos após 2013 e em 2019. Além disso, a implementação de tecnologias mais eficientes e a melhoria na gestão de combustível podem reduzir os custos operacionais das companhias aéreas e melhorar sua rentabilidade (ABEAR, 2019). Portanto, é importante que haja incentivos e políticas públicas para fomentar o desenvolvimento e a adoção dessas tecnologias e combustíveis sustentáveis no setor aéreo.

Dentre as várias maneiras de reduzir o consumo de combustível durante o ciclo LTO, a adoção de técnicas de voo mais eficientes, como o uso de trajetórias de voo otimizadas e a melhoria da eficiência dos sistemas de gerenciamento de tráfego, são opções relevantes. Para reduzir o tempo em cada fase do ciclo, há oportunidades como a construção de taxiways aprimoradas, com entradas e saídas rápidas e menos paradas, curvas e cruzamentos, ou coordenações de tráfego aéreo pré-acionamento e push-back, as quais ajudariam a reduzir os tempos de taxiamento e o período ocioso na operação das aeronaves. Na fase de aproximação, medidas de gerenciamento de tráfego podem evitar quaisquer tipos de vetorações radar, esperas ou ações que decorram na adoção de procedimentos de aproximações perdidas pelas aeronaves. A adequação correta de slots de saída e chegada para o aeroporto, em conjunto com a ferramenta AMAN (Arrival Manager - Gerenciador de Chegadas), também abre oportunidades para a redução do congestionamento, tanto no momento do táxi quanto na aproximação.

Além disso, medidas gerenciais que possibilitem decolagens sem parada na cabeceira, como a HIRO (Operações de Pista de Alta Intensidade) prevista na AIC nº 12/2022 (DECEA, 2022), já aplicada em algumas regiões brasileiras, são importantes. A aplicação de sanções para as companhias que não cumprem com os horários exatos de calços fora, devem ser observadas como uma oportunidade futura, onde exista um maior congestionamento e demanda de uso do aeroporto. Portanto, é crucial que as companhias aéreas e a indústria da aviação continuem investindo em tecnologias mais eficientes e em práticas sustentáveis para reduzir o impacto ambiental do ciclo LTO e garantir a sustentabilidade do setor a longo prazo.

Além das medidas relacionadas ao consumo de combustível, é importante considerar o melhor aproveitamento da ocupação dos voos direcionados aos aeroportos em questão. Ao aumentar a eficiência do uso de RPK, as companhias aéreas podem reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>eq e dos demais poluentes. A eficiência do uso de RPK (receita por passageiro por quilômetro) é um fator-chave na redução das emissões de CO<sub>2</sub>eq e dos demais poluentes. A utilização de aeronaves mais eficientes, que permitam maior ocupação de passageiros, é uma das estratégias mais eficazes para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>eq. No entanto, é importante ressaltar que a redução de CO<sub>2</sub>eq pode variar de acordo com o tipo de aeronave e sua capacidade de expandir a ocupação.

A adoção de tecnologias mais avançadas, como o uso de trajetórias de voo otimizadas e a melhoria da eficiência dos sistemas de gerenciamento de tráfego, também podem contribuir significativamente para a redução das emissões de CO<sub>2</sub>eq. No entanto, é preciso ressaltar que a responsabilidade pela redução das emissões de gases de efeito estufa não é apenas das companhias aéreas, mas também dos governos e da sociedade em geral.

A implementação de políticas públicas que incentivem a redução das emissões de gases de efeito estufa, como a adoção de tecnologias mais limpas, o estabelecimento de metas de redução de emissões e a taxação das emissões de CO<sub>2</sub>eq, é fundamental para mitigar os impactos ambientais do setor aéreo. Nesse sentido, é importante que as companhias aéreas e a indústria da aviação em geral continuem, ao mesmo tempo em que os governos e a sociedade em geral assumam sua responsabilidade em reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Para mitigar as emissões na cidade do Rio de Janeiro, é fundamental estabelecer uma dinâmica coordenada com as fontes de emissão significativas que operam em conjunto com os aeroportos. Devido às peculiaridades da cidade e às dinâmicas especiais da aviação, é necessário um planejamento que organize a atividade aérea atual e suporte sua expansão futura.

Quanto maior a demanda por uso de um aeroporto, maior a exigência por eficiência energética e cuidados com o ambiente ao entorno do aeroporto, o que acontece com investimentos na área tecnológica, legislativa aeronáutica local e política de uso de aeronaves em horários/sítios específicos. Exemplos de cidades polo do transporte aéreo mundial, como Amsterdã Schiphol, Frankfurt e Paris Charles de Gaulle, mostram a combinação e integração das instalações aeroportuárias com as áreas adjacentes (SALDIRANER, 2013).

No entanto, é essencial aprimorar o sistema de monitoramento e coleta de dados em todas as fases do ciclo LTO, para obter informações mais precisas e confiáveis sobre a emissão de poluentes e implementar medidas mais eficazes de controle de emissões. É vital também a

implantação de um programa de monitoramento de emissões ao redor do aeroporto, principalmente em bairros com alta concentração de poluentes, e a revisão dos valores-limite para a concentração de poluentes, já que as legislações sobre o assunto são antigas (30 anos) e não acompanharam as atualizações propostas pela OMS e outros países. Com essas medidas, é possível reduzir significativamente o impacto ambiental da aviação na cidade do Rio de Janeiro.

De acordo com o Relatório da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro (INEA, 2020; INEA, 2014), a cidade do Rio de Janeiro apresenta altas concentrações de poluentes em médias de curto período (1-8h) e em regiões próximas aos aeroportos. Os níveis de  $\text{NO}_2$  chegam a  $247 \mu\text{g m}^{-3}$  na cidade do Rio, com concentrações acima de  $200 \mu\text{g m}^{-3}$  em áreas próximas aos aeroportos, como no Engenheiro (240  $\mu\text{g m}^{-3}$ ) e em Manguinhos (207  $\mu\text{g m}^{-3}$ ), além de até 137  $\mu\text{g m}^{-3}$  na cidade de Duque de Caxias, também influenciada pela indústria petroquímica (INEA, 2020). O ozônio ( $\text{O}_3$ ), que é gerado a partir da reação do  $\text{NO}_x$ , apresenta uma média horária acima de  $150 \mu\text{g m}^{-3}$ , com picos de até  $577 \mu\text{g m}^{-3}$ , mesmo em locais distantes das fontes emissoras, como próximo ao aeroporto do SBGL (80  $\mu\text{g m}^{-3}$  para a Ilha do Governador) (WHO, 2021; INEA, 2020; MASIOL; HARRISON, 2014).

Em relação ao PM, os municípios próximos ao Galeão como Duque de Caxias e São João de Meriti apresentam médias diárias de 175 e 113  $\mu\text{g m}^{-3}$   $\text{PM}_{10}$ , respectivamente, e médias anuais de até 67  $\mu\text{g m}^{-3}$  para Duque de Caxias e 46  $\mu\text{g m}^{-3}$  para São João de Meriti. Além disso, bairros como Bonsucesso e São Cristóvão, impactadas pelo SBRJ, apresentam médias acima de 150  $\mu\text{g m}^{-3}$   $\text{PM}_{10}$ . Tais dados indicam que a atividade aérea pode contribuir significativamente para a poluição do ar em áreas próximas aos aeroportos. No entanto, apesar da existência de uma rede de monitoramento comum na cidade, não foram identificados outros métodos de avaliação ou medição que pudessem indicar os principais emissores de poluentes em cada local. Com o crescimento urbano e a intensificação da atividade industrial e do uso do sistema de transporte, a expansão da atividade aérea representa um risco para a qualidade do ar, pois possui um grande potencial para a emissão de poluentes e GEE.

Portanto, é inegável que a ciência desempenhe um papel crucial na busca por soluções capazes de controlar os impactos ambientais e aprimorar a qualidade do transporte aéreo em âmbito local. A avaliação e comparação da eficácia das fontes emissoras, bem como a identificação das medidas necessárias para atenuar as emissões de poluentes, demandam a aplicação de abordagens científicas sólidas, como a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) e a Análise de Ciclo de Vida (ACV). Através dessas avaliações, é possível não apenas determinar

o custo ambiental associado às emissões, mas também quantificar o investimento requerido para mitigar tais impactos.

Nesse contexto, a colaboração entre os diversos intervenientes na gestão dos aeroportos no Rio de Janeiro se revela essencial para a instituição de uma política de gestão integrada da qualidade do ar. Isso envolve não apenas as autoridades governamentais, mas também as companhias aéreas e os operadores aeroportuários. Apesar da implementação de planos de mitigação, da divulgação de dados de saúde e das iniciativas isoladas de sustentabilidade, a falta de coordenação entre as partes interessadas compromete a eficácia dessas medidas.

É relevante observar que as reduções nas emissões de poluentes nos aeroportos cariocas se relacionam mais a avanços tecnológicos do que a um esforço deliberado para diminuí-las. Além disso, apesar de algumas emissões terem diminuído substancialmente, outras permanecem relativamente constantes ao longo do tempo, o que aponta para a necessidade de adotar medidas adicionais a fim de reduzir essas emissões persistentes.

Em resumo, a atividade aérea ostenta um potencial considerável para gerar emissões de poluentes e gases de efeito estufa, representando um risco evidente para a qualidade do ar e a saúde da população. A aplicação de métodos como a AIA e a ACV oferece uma base sólida para quantificar o custo ambiental dessas emissões e identificar as ações necessárias para mitigar tais impactos. A cooperação e a coordenação entre os diversos atores envolvidos na gestão dos aeroportos são de importância crítica na implementação de medidas eficazes para a gestão integrada da qualidade do ar.

## **6.2 Limitações e desafios da medição e monitoramento dos aeroportos e áreas próximas**

A implementação de práticas para melhorar a eficiência ambiental do transporte aéreo na cidade do Rio de Janeiro é uma tarefa complexa que envolve diversos fatores interligados. Um aspecto fundamental é a necessidade de uma coalizão para a administração do setor, que atualmente se encontra dispersa com várias fontes de decisão. Dentre elas estão órgãos ministeriais do Governo Federal, Estadual e Municipal, agências reguladoras e até ação dos militares através da força aérea (DECEA, CGNA). Cada um desses atores possui atividades específicas dentro do setor aéreo, com parâmetros próprios e limitações, o que dificulta a condução da expansão do setor.

Essa dispersão também se reflete na obtenção de dados e na verificação das políticas aplicadas. Durante a pesquisa, ficou evidente que a dispersão dos órgãos responsáveis pela administração do transporte aéreo dificultou a obtenção de informações. A falta de uma

coordenação eficiente entre essas entidades torna difícil a realização de análises mais precisas e, conseqüentemente, a definição de políticas mais eficazes.

Outro obstáculo importante é a capacidade dos aeroportos e a distribuição de voos. O Aeroporto Santos Dumont (SBRJ) já opera próximo ao seu limite operacional, o que indica a necessidade de uma distribuição mais equilibrada de voos entre os dois grandes aeroportos da cidade. Aparentemente, o Galeão, demonstra maior estrutura para receber grandes quantidades de voos, porém não fica claro como ocorre a distribuição de vagas por aeroporto ou a determinação de SLOTS por horário. Não será possível manter dois grandes aeroportos sem equalizar a distribuição de voos e passageiros e, ao mesmo tempo, objetivar maior eficiência ambiental em suas atividades.

Para que o aeroporto se torne um centro de atração e desenvolvimento de áreas vizinhas, é preciso garantir uma área adequada e suficiente para o seu desenvolvimento e para a implantação de atividades socioculturais, centros de negócios e finanças, centros logísticos, shopping centers, hotéis e áreas de lazer e hospedagem. Também é fundamental ter modos de transporte multimodais, como acesso direto ou conexão com sistemas rodoviários e ferroviários interestaduais, trem expresso e metrô, diferentes rotas para transporte de carga e estacionamento de longa/curta duração.

Atualmente, nenhum dos aeroportos do Rio apresenta opções significativas de transporte de massa, o que é um potencial limitador para o aumento da eficiência ambiental dos aeroportos avaliados. Há, apenas, disponibilidade de ônibus, caso do Galeão com o Sistema BRT, ou o VLT para o Santos Dumont, que dispõe de ambos modais.

A questão da medição e avaliação dos poluentes e controle de GEE no transporte aéreo é uma questão complexa que requer grandes investimentos e esforços. Além disso, a topografia e as áreas de risco presentes na Região Metropolitana do Rio de Janeiro tornam o monitoramento ainda mais difícil e oneroso. É importante que as autoridades públicas e as empresas do setor de transporte aéreo estejam cientes desses desafios e trabalhem juntas para encontrar soluções sustentáveis.

No entanto, a gestão integrada da qualidade do ar nos aeroportos é apenas uma parte do desafio da sustentabilidade no setor de transporte aéreo. Para realmente reduzir as emissões de GEE, é necessário que haja um esforço global que envolva a adoção de tecnologias mais limpas, como a melhoria da eficiência energética das aeronaves, a utilização de combustíveis alternativos e a implementação de políticas públicas que promovam o transporte sustentável em todas as etapas da jornada do viajante.



Além disso, é importante considerar que a indústria de transporte aéreo tem uma grande responsabilidade em relação às emissões de GEE e, por isso, é necessário que haja um esforço contínuo para melhorar a eficiência ambiental do setor. Isso pode incluir investimentos em pesquisas e tecnologias mais avançadas, bem como a implementação de políticas públicas que incentivem a redução das emissões.

No geral, para garantir um futuro mais limpo e sustentável para as próximas gerações, é fundamental que haja uma abordagem integrada e colaborativa em todos os setores, incluindo o transporte aéreo. As empresas do setor, as autoridades públicas e a sociedade em geral precisam se unir para encontrar soluções sustentáveis que atendam às necessidades do presente sem comprometer o futuro do planeta.

## **7 CONCLUSÕES**

A importância de estimar e contabilizar as emissões geradas pela atividade aérea é indiscutível, devido ao rápido e constante crescimento desse setor, bem como a sua relevância econômica para o desenvolvimento do Brasil. Com esse propósito, o objetivo deste trabalho foi elaborar um inventário de emissões atmosféricas abrangendo os principais poluentes e gases de efeito estufa relacionados à atividade aeronáutica na cidade do Rio de Janeiro. Utilizando a metodologia reconhecida pela ICAO e cálculos de estimativa para os custos ambientais, foi possível quantificar o consumo de combustível e as emissões das aeronaves que operaram nos ciclos de pouso e decolagem (LTO) nos aeroportos Santos Dumont e Internacional do Galeão, durante a década de 2009 a 2019 (período pré-pandemia), bem como avaliar o custo relativo de suas emissões em termos financeiros. Para isso, foram determinados os índices de emissão para cada tipo de aeronave e calculada a quantidade dos principais gases emitidos durante os ciclos. A partir disso, foi possível criar um padrão de emissões para cada aeroporto e avaliar a evolução de cada um no período, identificando diferenças e pontos fortes.

É interessante destacar que este trabalho é uma das poucas iniciativas voltadas para a avaliação da atividade aérea em aeroportos brasileiros, especialmente em relação a dois aeroportos de grande relevância para o tráfego aéreo nacional, e que não estão localizados na capital com maior atividade (São Paulo). Embora as avaliações de emissões atmosféricas sejam comuns para outros modais de transporte, elas são menos frequentes para o setor aéreo no mercado brasileiro, o que aumenta a importância deste estudo. Mesmo diante dos desafios envolvidos na coleta de dados sobre o número de voos, tipos de aeronaves e índices de emissão, este trabalho conseguiu avaliar cinco tipos diferentes de poluentes e três tipos de gases do efeito

estufa, todos emitidos durante as operações de dois aeroportos com padrões de operação distintos

As múltiplas barreiras técnicas enfrentadas na medição e verificação da qualidade do ar requerem softwares avançados, comuns em estudos internacionais, mas ainda não amplamente utilizados no Brasil. Por isso, embora os resultados deste trabalho sejam sólidos, ainda há espaço para análises mais aprofundadas sobre as emissões dos complexos aeronáuticos estudados. Existem incertezas geradas pelas premissas básicas adotadas neste tipo de análise, o que sugere a necessidade de outros estudos ou uma nova abordagem. É importante ressaltar que as premissas adotadas neste trabalho são válidas para as metodologias exploradas e cumpriram sua função de simplificar o processo de estimativa. O trabalho avaliou 35 tipos de aeronaves em mais de 1 milhão de ciclos LTO para cada aeroporto, distribuídos ao longo de 11 anos.

### **7.1 Considerações finais**

A avaliação dos resultados do inventário de emissões atmosféricas e gases de efeito estufa dos aeroportos Santos Dumont e Galeão, associados à pesquisa de qualidade do ar em áreas próximas, permitiu concluir que:

- Durante o período de avaliação, apesar de algumas variações, houve um aumento significativo de voos para os dois principais aeroportos do Rio de Janeiro. A aviação doméstica participa significativamente mais das atividades aéreas no estado do que a internacional, ainda que esta última apresente maior estabilidade no período. O Galeão sofria com a baixa demanda ligada à falta de integração intermodal e à concorrência com Santos Dumont.
- O Galeão recebeu maior variedade de tipos de aeronaves e mostrou potencial para ampliar o mix de aeronaves sem grandes restrições, com a ressalva de que o uso de aeronaves pesadas ou antigas deve ser monitorado para manter a eficiência das operações. Por outro lado, as restrições de tamanho no Santos Dumont limitaram a diversidade de aeronaves que ali operavam, e indicaram que está muito próximo do limite da capacidade operacional em termos de número de voos, já que suas taxas de emissão e número de ciclos LTO não diferem significativamente de seu concorrente.
- Durante os ciclos LTO, os poluentes  $\text{NO}_x$  e CO foram os mais emitidos, com destaque para o primeiro. A fase de taxiamento foi responsável pelas maiores quantidades de emissões dentro

dos ciclos. No entanto, as emissões de  $\text{NO}_x$  foram significativamente altas em todas as fases, tornando as fases de decolagem e subida as mais significativas após o taxiamento. A presença mais acentuada das emissões de  $\text{NO}_x$  e CO demonstra que a mitigação direcionada a esses dois poluentes pode ser eficaz na redução do impacto ambiental das operações.

- Ao longo da década, os aeroportos do Galeão e Santos Dumont juntos emitiram um total de 52.732 toneladas de poluentes e mais de 6,5 milhões de toneladas de  $\text{CO}_2$ , somente nos ciclos de pouso e decolagem, na cidade do Rio de Janeiro. Dada a proximidade dos aeroportos e a sobreposição das áreas de impacto, as atividades aéreas podem ser consideradas uma única fonte de poluição. Em termos de contribuição local, a Bacia Aérea III é a mais impactada pelas operações. Os bairros abrangidos por esta bacia já apresentam altas concentrações de poluentes, com valores acima dos recomendados por autoridades internacionais.

- Com exceção de  $\text{NO}_x$  e PM, o comportamento dos poluentes tende a diminuir com o tempo. Da mesma forma, o comportamento dos GEE também está em tendência de queda ao longo do período. Nesse caso, o Galeão se destaca com padrões mais expressivos, com redução acentuada de  $\text{CO}_2$ .

- Em termos de  $\text{CO}_2\text{eq}$ , SBGL tem maior potencial de impacto, com emissões de  $3,98\text{E}+09$  kg de  $\text{CO}_2\text{eq}$  contra  $2,5\text{E}+09$  kg de  $\text{CO}_2\text{eq}$  de SBRJ. No entanto, o Galeão foi mais eficiente no período, com taxas de emissão por passageiro inferiores às do Santos Dumont. Em ambos os aeroportos seria possível evitar de 15 a 20% das emissões de  $\text{CO}_2\text{eq}$  com o máximo aproveitamento do RPK.

- Comparando valores financeiros, SBGL custou em média 42 milhões de euros/ano em termos de carbono e aproximadamente 14,4 milhões de euros/ano para poluição local. Assim, o Galeão ficou em média 40% mais caro que o Santos Dumont, que custou 26,3 milhões de euros/ano e 8 milhões de euros/ano para carbono e poluição, respectivamente.

Com base nos resultados obtidos, fica evidente a necessidade de maiores estudos sobre o comportamento das emissões dos aeroportos localizados próximos e dentro do Rio de Janeiro. Ademais, é fundamental aprofundar a análise dos custos sociais de cada aeroporto, a fim de verificar as questões relacionadas à saúde local e os custos marginais das operações conjuntamente com a cidade.

Como estratégia de curto prazo, recomenda-se o melhor gerenciamento de tráfego aéreo, o que pode reduzir o tempo gasto em cada fase do ciclo LTO. Medidas operacionais que visem o alto aproveitamento das taxas de ocupação também são uma boa opção de mitigação de curto prazo. A adoção de medidas técnicas e operacionais que estejam em conformidade com os padrões do mercado europeu pode trazer boas soluções, que além de mitigar as emissões, não limitem o crescimento do mercado nacional. A distribuição e equalização de voos podem ser estudadas para melhor aproveitamento dos pontos fortes de cada aeroporto ou minimização dos impactos em uma área específica.

Além disso, é importante que haja o levantamento e disponibilidade de dados técnicos por parte dos envolvidos nas operações para fomentar o setor de pesquisa e desenvolvimento. Isso permitirá que se busque novas oportunidades para o setor e se mantenham avaliações constantes referentes à eficiência. Através da pesquisa e monitoramento associado aos métodos científicos, será possível reduzir os custos e determinar os melhores meios para mitigar as emissões atmosféricas. Essas medidas são essenciais para garantir uma operação aérea mais sustentável e responsável com o meio ambiente.

Devido à complexidade da questão ambiental, é necessário abordar os problemas locais relacionados à infraestrutura dos terminais de voo e trânsito, coexistência próxima ao polo industrial e expansão urbana, para construir políticas públicas baseadas em formas de planejamento que incorporem o pluralismo de ideias e interesses, além de múltiplas abordagens. Para solucionar essa relação, é necessário articular entre os diferentes níveis de governo, agências reguladoras e militares.

É importante ressaltar que a poluição do ar não afeta apenas a saúde pública, mas também pode ter impactos econômicos significativos. A redução das emissões de poluentes pode gerar economias de recursos financeiros, como a redução de gastos com saúde e a diminuição dos custos associados às mudanças climáticas.

Por fim, acredita-se que este estudo seja importante para a obtenção e divulgação de dados relevantes que possam auxiliar na avaliação dos impactos da aviação sobre o ambiente e sua contribuição para as áreas vizinhas. Esta pesquisa se destaca por analisar dois dos principais aeroportos do país e realizar um levantamento com poucos semelhantes em sua área, além de fomentar o debate sobre a atividade do transporte aéreo. É fundamental que essas informações sejam utilizadas para incentivar o desenvolvimento de políticas e práticas mais sustentáveis no setor da aviação, a fim de minimizar seu impacto ambiental e garantir a sustentabilidade a longo prazo.

## **7.2 Sugestões de trabalhos futuros**

A continuidade dos estudos sobre a emissão de poluentes nos aeroportos do Rio de Janeiro é essencial para o avanço na compreensão dos impactos ambientais gerados pela atividade aérea. Para tanto, é necessário aprofundar a análise de diversos fatores, como as variações sazonais do tempo e as condições meteorológicas, que podem influenciar no comportamento das emissões.

Outro tema importante para futuros estudos seria a análise das amostras de compostos captados em determinados sítios, tanto dentro como nas áreas adjacentes aos aeroportos. Essa análise poderia ajudar a identificar as áreas mais afetadas pela emissão de poluentes e, assim, direcionar medidas de mitigação específicas para essas áreas.

Além disso, seria interessante incluir dados operacionais das principais empresas que operam no estado, para uma análise mais detalhada dos principais atores da atividade aérea nos dois aeroportos e do mercado doméstico.

Por fim, outra possibilidade seria adotar métodos de cálculo e análise distintos daqueles recomendados pela ICAO, para fins de comparação das estimativas obtidas. Isso pode proporcionar uma visão mais ampla e completa dos impactos ambientais da atividade aérea.

Em resumo, o aprofundamento dos estudos sobre as emissões dos aeroportos do Rio de Janeiro é fundamental para aprimorar as políticas públicas e medidas de mitigação de impactos ambientais. Para isso, é importante explorar diferentes fatores que podem influenciar o comportamento das emissões e adotar métodos de análise e comparação diversos.

## REFERÊNCIAS

ABE, K. C.; EL KHOURI MIRAGLIA, S. G. Health impact assessment of air pollution in São Paulo, Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 13, n. 7, 2016.

ABEAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS AÉREAS. O Setor Aéreo em Dados e Análises - Panorama 2019. Brasil, 2019. Disponível em [https://www.abear.com.br/wp-content/uploads/2019/12/Panorama2018.pdf?utm\\_source=Site Panorama](https://www.abear.com.br/wp-content/uploads/2019/12/Panorama2018.pdf?utm_source=Site+Panorama)

AGRAWAL, H., SAWANT, A., JANSEN, K., MILLER, J. W., COCKER, D. R. Characterization of chemical and particulate emissions from aircraft engines. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 18, p. 4380–4392, 2008.

AKDENIZ, H. Y. Estimation of aircraft turbofan engine exhaust emissions with environmental and economic aspects at a small-scale airport. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 94, n. 2, p. 176–186, 2022.

AKYUZ, M. K. Environmental and enviroeconomic impacts of COVID-19 pandemic on commercial flights. **AIRCRAFT ENGINEERING AND AEROSPACE TECHNOLOGY**, v. 94, n. 8, p. 1449–1457, 2022.

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Metodologia de Cálculo: Inventário de Emissões Atmosféricas. ed. 1, 2019. Disponível em <https://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/meio-ambiente/arquivos/MetodologiadeCalculov1agosto2019.pdf>

ANAC – AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. Painel de Indicadores do Transporte Aéreo. 2021. Disponível em <https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-do-transporte-aereo/painel-de-indicadores-do-transporte-aereo>

ARTER, C. A., BUONOCORE, J. J., MONIRUZZAMAN, C., YANG, D., HUANG, J., ARANACHALAM, S. Air quality and health-related impacts of traditional and alternate jet

fuels from airport aircraft operations in the U.S. **Environment International**, v. 158, p. 106958, 2022.

ARUNACHALAM, S., WANGA, B., DAVIS, N., BAEK, B. H., LEVY, J. I. Effect of chemistry-transport model scale and resolution on population exposure to PM<sub>2.5</sub> from aircraft emissions during landing and takeoff. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 19, p. 3294–3300, 2011.

ASEEL, S., AL-YAFEI, H., KUCUKVAR, M., ONAT, N. C. Life cycle air emissions and social human health impact assessment of liquified natural gas maritime transport. **Energies**, v. 14, n. 19, p. 1–19, 2021.

ASHOK, A.; BALAKRISHNAN, H.; BARRETT, S. R. H. Reducing the air quality and CO<sub>2</sub> climate impacts of taxi and takeoff operations at airports. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 54, p. 287–303, 2017.

AYGUN, H.; CALISKAN, H. Environmental and enviroeconomic analyses of two different turbofan engine families considering landing and take-off (LTO) cycle and global warming potential (GWP) approach. **Energy Conversion and Management**, v. 248, n. x, p. 114797, 2021.

BENOSA, G., ZHU, S., KINNON, M. M., DABDUB, D. Air quality impacts of implementing emission reduction strategies at southern California airports. **Atmospheric Environment**, v. 185, p. 121–127, 2018.

BRANDER, M. GHGs CO<sub>2</sub> CO<sub>2e</sub> and Carbon What Do These Mean? v2.1. **Ecometrica**, n. August, p. 2–4, 2012.

BRASSEUR, G. P.; COX, R. A.; HAUGLUSTAINE, D.; ISAKSEN, I.; LELIEVELD, J.; LISTER, D. H.; SAUSEN, R.; SCHUMANN, U.; WAHNER, A.; WIESEN, P. European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 13, p. 2329–2418, 1998.

BRUNELLE-YEUNG, E.; MASEK, T.; ROJO, J. J.; LEVY, J. I.; ARUNACHALAM, S.; MILLER, S. M.; BARRETT, S. R. H.; KUHN, S. R.; WAITZ, I. A. Assessing the impact of aviation environmental policies on public health. **Transport Policy**, v. 34, n. SI, p. 21–28, Jul. 2014.

CALISKAN, H. Novel approaches to exergy and economy based enhanced environmental analyses for energy systems. **Energy Conversion and Management**, v. 89, p. 156–161, 2015.

CENTRACCHIO, F.; ROSSETTI, M.; IEMMA, U. Approach to the Weight Estimation in the Conceptual Design of Hybrid-Electric-Powered Unconventional Regional Aircraft. v. 2018, 2018.

DAVID C. CARSLAW, KARL ROPKINS, DUNCAN LAXEN, STEPHEN MOORCROFT, BEN MARNER, M. L. W. Near-Field Commercial Aircraft Contribution to Nitrogen Oxides by Engine, Aircraft Type, and Airline by Individual Plume Sampling. **Environ. Sci. Technol.**, v. 42, n. 6, p. 1871–1876, 2008.

DE FARIAS, H. S. Análise De Qualidade Do Ar Da Bacia Aérea 1 Da Região Metropolitana Do Rio De Janeiro Air Quality Analysis Of Air Condition 1 Of The Metropolitan Region Of Rio De Janeiro magnitude de geração de resíduos e armazenamento de calor são profundamente alterado. v. 3, n. 3, p. 101–113, 2018.

DECEA - DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. Operações De Pista De Alta Intensidade (Hiro) No Aeroporto Internacional De Porto Alegre (SBPA). **AIC N 12/22**. Divisão de Gerenciamento de Navegação Aérea. Mai, 2012.

DELLAERT, S. N. C.; HULSKOTTE, IR. J. H. J. Emissions of air pollutants from civil aviation in the Netherlands. **TNO Report R10055**, p. 22, 2017.

DESSENS, O., KÖHLER, M. O., ROGERS, H. L., JONES, R. L., PYLE, J. A. Aviation and climate change. **Transport Policy**, v. 34, p. 14–20, 1 Jul. 2014.



DIEZ, D. M.; DOMINICI, F.; ZARUBIAK, D.; LEVY, J. I. Statistical approaches for identifying air pollutant mixtures associated with aircraft departures at Los Angeles International Airport. **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 15, p. 8229–8235, 2012.

DODSON, R. E.; ANDRES HOUSEMAN, E.; MORIN, B.; LEVY, J. I. An analysis of continuous black carbon concentrations in proximity to an airport and major roadways. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 24, p. 3764–3773, 2009.

DORBIAN, C. S.; WOLFE, P. J.; WAITZ, I. A. Estimating the climate and air quality benefits of aviation fuel and emissions reductions. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 16, p. 2750–2759, 2011.

EKICI, S.; YALIN, G.; ALTUNTAS, O.; KARAKOC, T. H. Calculation of HC, CO, and NO<sub>x</sub> from civil aviation in Turkey in 2012. **International Journal of Environment and Pollution**, v. 53, n. 3–4, p. 232–244, 2013.

EKICI, S.; YASIN, Ş. A study on the environmental and economic aspects of aircraft emissions at the Antalya International Airport. **Environmental Science and Pollution Research volume**, v. 28, p. 10847–10859, 2021.

ELBIR, T. Estimation of Engine Emissions from Commercial Aircraft at a Midsized Turkish Airport. **Journal of Environmental Engineering**, v. 134, n. 3 (March 2008), p. 210–215, 2008.

EVANS, A.; SCHÄFER, A. W. Simulating airline operational responses to airport capacity constraints. **Transport Policy**, v. 34, p. 5–13, 1 Jul. 2014.

FAN, W.; SUN, Y.; ZHU, T.; WEN, Y. Emissions of HC, CO, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> from civil aviation in China in 2010. **Atmospheric Environment**, v. 56, p. 52–57, 2012.

FARIAS, H. S. DE; DE OLIVEIRA, J. L. F. Bacias Aéreas: Uma Proposta Metodológica Para O Estudo Da Qualidade Do Ar Em Áreas Influenciadas Pelo Relevo. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 12, n. 1, 2013.

FERREIRA, A. P. A qualidade do ar na RMRJ - a saúde pública como elo central de articulação e suas implicações na gestão integrada saúde e ambiente. **Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca**, Rio de Janeiro, 2008.

FILIPPONE, A.; BOJDO, N. Statistical model for gas turbine engines exhaust emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 59, n. February, p. 451–463, 2018.

GARDNER, R. M.; ADAMS, K; COOK, T; DEIDEWIG, F; ERNEDAL, S; FALK, R; FLEUTI, E; HERMS, E; JOHNSON, C. E. The ANCAT/EC global inventory of NO<sub>x</sub> emissions from aircraft. **ATMOSPHERIC ENVIRONMENT**, v. 31, n. 12, p. 1751–1766, jun. 1997.

GŁOWACKI, P.; KALINA, P.; KAWALEC, M. Estimating Emissions of Harmful Exhaust Components by Aircraft Engines During the Takeoff and Landing Cycle in Airport Space. **Transactions on Aerospace Research**, v. 2021, n. 2, p. 63–70, 2021.

GONZÁLEZ, R.; HOSODA, E. B. Environmental impact of aircraft emissions and aviation fuel tax in Japan. **Journal of Air Transport Management**, v. 57, p. 234–240, 1 out. 2016.

GRAMPELLA, M., MARTINI, G., SCOTTI, D., TASSAN, F., & ZAMBON, G. A Simplified Method for Airport Environmental Impacts Assessment. **University of Bergamo. mimeo**, 2012.

GREWE, V.; DAHLMANN, K. How ambiguous are climate metrics? And are we prepared to assess and compare the climate impact of new air traffic technologies? **Atmospheric Environment**, v. 106, p. 373–374, 1 abr. 2015.

GREWE, V.; LINKE, F. Eco-efficiency in aviation. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 26, n. 6, p. 689–696, 2017.

GROBLER, C.; WOLFE, P. J.; DASADHIKARI, K.; DEDOUSSI, I. C.; ALLROGGEN, F.; SPETH, R. L.; EASTHAM, S. D.; AGARWAL, A.; STAPLES, M. D.; SABNIS, J.; BARRETT, S. R. H. Marginal climate and air quality costs of aviation emissions. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 11, Nov. 2019.

HENKES, J. A.; PÁDUA, A. D. B. DE. Desenvolvimento Sustentável Na Aviação Brasileira: **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 6, n. 2, p. 534, 2017.

HSU, H. H.; ADAMKIEWICZ, G.; ANDRES HOUSEMAN, E.; VALLARINO, J.; MELLY, S. J.; WAYSON, R. L.; SPENGLER, J. D.; LEVY, J. I. The relationship between aviation activities and ultrafine particulate matter concentrations near a mid-sized airport. **Atmospheric Environment**, v. 50, p. 328–337, 2012.

HSU, H.-H.; ADAMKIEWICZ, G.; HOUSEMAN, E. A.; ZARUBIAK, D.; SPENGLER, J. D.; LEVY, J. I. Contributions of aircraft arrivals and departures to ultrafine particle counts near Los Angeles International Airport. **Science Of the Total Environment**, v. 444, p. 347–355, 2013.

HUDDA, N.; GOULD, T.; HARTIN, K.; LARSON, T. V.; FRUIN, S. A. Aviation Emissions Impact Ambient Ultrafine Particle Concentrations in the Greater Boston Area. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 16, p. 8514–8521, 2016.

HUDDA, N.; DURANT, L. W.; FRUIN, S. A.; DURANT, J. L. Impacts of Aviation Emissions on Near-Airport Residential Air Quality. **ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY**, v. 54, n. 14, p. 8580–8588, jul. 2020.

IATA - ASSOCIAÇÃO INTERNACIONAL DE TRANSPORTES AÉREOS. O Valor Do Transporte Aéreo No Brasil. 2019. Disponível em <  
<https://www.iata.org/contentassets/bc041f5b6b96476a80db109f220f8904/brazil-o-valor-do-transporte-aereo.pdf>>

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2010: Aglomerados subnormais - informações territoriais. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em

[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/aglomerados\\_subnormais/default\\_aglomerados\\_subnormais.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/aglomerados_subnormais/default_aglomerados_subnormais.shtm)

ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. ICAO Long-Term Traffic Forecasts Passenger and Cargo. 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7 July, 2016a.

ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Environmental Technical Manual - Volume II Procedures for the Emissions Certification of Aircraft Engines. 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7, v. II, 2016b

ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. Doc 9889 Airport Air Quality Manual. 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7, 2020.

ICAO - INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. ICAO Databank on Aircraft Engine Emissions. 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7, 2021. Disponível em: <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>

ILKER YILMAZ. Journal of Air Transport Management Emissions from passenger aircraft at Kayseri Airport, Turkey. **Journal of Air Transport Management**, v. 58, p. 176–182, 2017.

INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Relatório Anual de Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro – Ano Base 2014. Rio de Janeiro, 2014.

INEA - INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Relatório Anual de Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro 2019. Rio de Janeiro, 2020.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Chapter 2.3: Mobile Combustion. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**, IPCC, Geneva, Switzerland, p. 1–78, 2006.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri, and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp, 2014.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Projeto Governança Metropolitana No Brasil Oficina 1 - Arranjos Institucionais De Gestão Metropolitana. Fundação Centro Estadual de Estatísticas Pesquisas do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

IRVINE, D.; BUDD, L.; ISON, S.; KITCHING, G. The environmental effects of peak hour air traffic congestion: The case of London Heathrow Airport. **Research In Transportation Economics**, v. 55, n. SI, p. 67–73, jun. 2016.

JANIĆ, M. Aviation and externalities: the accomplishments and problems. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 4, n. 3, p. 159–180, 1999.

KAMMOUN, M. A.; TURKI, S.; REZG, N. Optimization of Flight Rescheduling Problem under Carbon Tax. **Sustainability**, v. 12, n. 14, 2020.

LEE, D. S; PITARI, G; GREWEC, V; GIERENS, K; PENNER, J. E; PETZOLD, A; PRATHER, M. J; SCHUMANN, U; BAIS, A; BERNTSEN, T. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. **Atmospheric Environment**, v. 44, n. 37, SI, p. 4678–4734, 2010.

LEI Nº 5.248, DE 27 DE JANEIRO DE 2011. Política Municipal sobre Mudança do Clima e Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro, 28 jan. 2011.

LEI Nº 7.315, DE 26 DE ABRIL DE 2022. **Estado de Emergência Climática**. Rio de Janeiro, 27 abr. 2011.

LEURS, B. A.; BRUYN, S. M. DE; DAVIDSON, M. D. External costs of aviation Background report. CE, Solutions for environment, economy, and technology - Delft. February 2002.

LOBO, P.; HAGEN, D. E.; WHITEFIELD, P. D. Measurement, and analysis of aircraft engine PM emissions downwind of an active runway at the Oakland International Airport. **Atmospheric Environment**, v. 61, p. 114–123, 2012.

MARTINI, G.; SCOTTI, D.; VOLTA, N. Including local air pollution in airport efficiency assessment: A hyperbolic-stochastic approach. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 24, p. 27–36, 2013.

MASIOL, M.; HARRISON, R. M. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: A review. **Atmospheric Environment**, v. 95, p. 409–455, 2014.

MAZAHERI, M.; JOHNSON, G. R.; MORAWSKA, L. Particle and gaseous emissions from commercial aircraft at each stage of the landing and takeoff cycle. **Environmental Science and Technology**, v. 43, n. 2, p. 441–446, 2009.

MOKALLED, T. et al. Identifying the impact of Beirut Airport's activities on local air quality - Part I: Emissions inventory of NO<sub>2</sub> and VOCs. **Atmospheric Environment**, v. 187, n. May, p. 435–444, 2018.

MONTEIRO, M. F. M. Avaliação da Influência do Microclima Urbano em Projeto de Climatização no Município do Rio de Janeiro. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, 2017.

OCDE - ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. Evaluating Brazil's progress in implementing Environmental Performance Review: recommendations and promoting its alignment with OECD core acquis on the environment. OECD Publishing, Paris, 2021. Disponível em <https://www.oecd.org/environment/country-reviews/Brazils-progress-in-implementing-Environmental-Performance-Review-recommendations-and-alignment-with-OECD-environment-acquis.pdf>

OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; TERASSI, P. M. DE B.; GOIS, G. DE. Estudo Da Circulação Dos Ventos Na Baía De Guanabara/Rj, Entre 2003 E 2013. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 59–80, 2017.

OLSTHOORN, X. Carbon dioxide emissions from international aviation: 1950–2050. **Journal of Air Transport Management**, v. 7, n. 2, p. 87–93, 1 mar. 2001.

ORHAN, I. Passenger aircraft emissions analysis at Ordu-Giresun International Airport, Turkey in 2017. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 93, n. 4, p. 682–689, 2021.

PAMPLONA, D. A.; PINTO ALVES, C. J. Civil Aircraft Emissions Study and Pollutant Forecasting at a Brazilian Airport. **Engineering Technology & Applied Science Research**, v. 10, n. 1, p. 5217–5220, 2020.

PIRES, D. O. Inventário de Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias e sua Contribuição para a Poluição do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. 2005. 188 f. Tese (doutorado) - Curso de Ciências em Planejamento Energético. 2005.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, COPPE/CLIMA. Plano de ação para redução de emissões de gases de efeito estufa da Cidade do Rio de Janeiro. **Coleção Estudos Cariocas**, p. 1–48, 2011.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981. Brasil - Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos, 2015. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/Ccivil\\_03/Leis/L6938compilada.htm](http://www.planalto.gov.br/Ccivil_03/Leis/L6938compilada.htm)

RAPER, D. W.; LONGLMRST, J. W. S.; CONLAN, D. E. The Impact of Airport Operations on Urban Air Quality. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 4, 1, 1970.

RIBEIRO, D. Avaliação dos Impactos da Externalidades Associados ao Transporte Aéreo. Universidade Da Beira Interior, Portugal, 2008.

ROCHA, A. C. Estimativa Simulada Das Emissões Atmosféricas Provenientes Da Aviação Civil Regular No Brasil Em Um Dia Específico. [s.l.] INPE, 2012.

ROY, R.; BRAATHEN, N. A. The Rising Cost of Ambient Air Pollution Thus Far in the 21st Century: Results from The BRICS And the OECD Countries - Environment Working Paper No. 124. **OECD Working Papers**, n. 124, 2017.

SABATIER, T. et al. Quantification of the airport-related pollution under wintertime anticyclonic conditions from idealized large-eddy simulations. **Atmospheric Environment**, v. 262, n. December 2020, 2021.

SALDIRANER, Y. The new airport in Istanbul; expectations and opportunities. **Journal of Case Research in Business and Economics**, v. 5, p. 1–11, 2013.

SCHÄFER, A. W.; WAITZ, I. A. Air transportation and the environment. **Transport Policy**, v. 34, p. 1–4, 2014.

SCHLENKER, W.; WALKER, W. R. Airports, Air Pollution, and Contemporaneous Health. **The Review of Economic Studies**, v. 83, n. 2, p. 768–809, 2015.

SCHLENKER, W.; WALKER, W. R. Airports, air pollution, and contemporaneous health. **Review of Economic Studies**, v. 83, n. 2, p. 768–809, 2016.

SCHUMANN, U. On The Effect of Emissions from Aircraft Engines on The State of The Atmosphere. **Annales Geophysicae-Atmospheres Hydrosphere and Space Sciences**, v. 12, n. 5, p. 365–384, jun. 1994.

SCHUMANN, U.; HUNTRIESER, H. The global lightning-induced nitrogen oxides source. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 7, n. 14, p. 3823–3907, 2007.

SCHÜRMAN, G. et al. The impact of NO<sub>x</sub>, CO, and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 1, p. 103–118, 2007.



SCOTT C. HERNDON, JOANNE H. SHORTER, MARK S. ZAHNISER, DAVID D. NELSON, JOHN JAYNE, ROBERT C. BROWN, RICHARD C. MIAKE-LYE, IAN WAITZ, FELIPE SILVA, THOMAS LANNI, KEN DEMERJIAN, C. E. K. NO and NO 2 Emission Ratios Measured from In-Use Commercial Aircraft during Taxi and Takeoff. **Environ. Sci. Technol**, v. 38, n. 2, p. 6078–6084, 2004.

SHIRMOHAMMADI, F. et al. Chemical composition and redox activity of PM<sub>0.25</sub> near Los Angeles International Airport and comparisons to an urban traffic site. **Science of the Total Environment**, v. 610–611, p. 1336–1346, 2018.

SILVA, R. A. DA. Poluição Atmosférica E Saúde Humana: uma revisão dos artigos publicados em periódicos científicos brasileiros entre 2007 e 2017. Universidade de Juiz de Fora, 2018.

SIMONE, N. W.; STETTLER, M. E. J.; BARRETT, S. R. H. Rapid estimation of global civil aviation emissions with uncertainty quantification. **Transportation Research Part D-Transport and Environment**, v. 25, p. 33–41, 2013.

SIMONETTI, I.; MALTAGLIATI, S.; MANFRIDA, G. Air quality impact of a middle size airport within an urban context through EDMS simulation. **Transportation Research Part D-Transport and Environment**, v. 40, p. 144–154, 2015.

STETTLER, M. E. J.; EASTHAM, S.; BARRETT, S. R. H. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 31, p. 5415–5424, 2011.

TEOH, L. E.; KHOO, H. L. Green Air Transport System: An Overview of Issues, Strategies and Challenges. **Journal of Civil Engineering**, v. 20, p. 1040–1052, 2016.

TIAN, Y.; WAN, L.; HAN, K.; YE, B. Optimization of terminal airspace operation with environmental considerations. **Transportation Research Part D-Transport and Environment**, v. 63, p. 872–889, 2018.

TOKUSLU, A. Estimation of aircraft emissions at Georgian international airport. **Energy**, v. 206, 2020.

UNAL, A.; HU, Y.; CHANG, M. E.; ODMAN, M. T.; RUSSELL, A. G. Airport related emissions and impacts on air quality: Application to the Atlanta International Airport. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 32, p. 5787–5798, 1 out. 2005.

VALLERO, D. A. Fundamentals of Air Pollution. Civil and Environmental Engineering Department Pratt School of Engineering Duke University Durham, North Carolina. Fourth Edition, 2007.

VUJOVIĆ, D.; TODOROVIĆ, N. An assessment of pollutant emissions due to air traffic at Nikola Tesla International Airport, Belgrade, and the link between local air quality and weather types. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 56, n. August, p. 85–94, 2017.

WAYSON, R. L.; FLEMING, G. G.; IOVINELLI, R. Methodology to estimate particulate matter emissions from certified commercial aircraft engines. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 59, n. 1, p. 91–100, 2009.

WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021

WINTHER, M.; KOUSGAARD, U.; ELLERMANN, T.; MASSLING, A.; NØJGAARD, J. K.; KETZEL, M. Emissions of NO<sub>x</sub>, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport. **Atmospheric Environment**, v. 100, n. x, p. 218–229, 2015.

WOOD, E. C.; HERNDON, S. C.; TIMKO, M. T.; YELVINGTON, P. E.; MIAKE-LYE, R. C. Speciation, and chemical evolution of nitrogen oxides in aircraft exhaust near airports. **Environmental Science and Technology**, v. 42, n. 6, p. 1884–1891, 2008.

XU, H.; FU, Q.; YU, Y.; LIU, Q.; PAN, J.; CHENG, J.; WANG, Z.; LIU, L. Quantifying aircraft emissions of Shanghai Pudong International Airport with aircraft ground operational data. **Environmental Pollution**, v. 261, jun. 2020.

YIM, S. H. L.; LEE, G. L.; LEE, I. H.; ALLROGGEN, F.; ASHOK, A.; CAIAZZO, F.; EASTHAM, S. D.; MALINA, R.; BARRETT, S. R. H. Global, regional and local health impacts of civil aviation emissions. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 3, mar. 2015.

YOON, S.; JEONG, S. Carbon Emission Mitigation Potentials of Different Policy Scenarios and Their Effects on International Aviation in the Korean Context. **Sustainability**, v. 8, n. November 2016, 2018.

ZHANG, C.; CHEN, L.; DING, S.; ZHOU, X.; CHEN, R.; ZHANG, X.; YU, Z.; WANG, J. Mitigation effects of alternative aviation fuels on non-volatile particulate matter emissions from aircraft gas turbine engines: A review. **Science of The Total Environment**, v. 820, p. 153233, 10 May 2022.

ZHU, Y.; FANNING, E.; YU, R. C.; ZHANG, Q.; FROINES, J. R. Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large International Airport. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 36, p. 6526–6533, 2011.