

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA CARBONO-ENERGÉTICA DE
AEROPORTOS BRASILEIROS COM APLICAÇÃO DE
ANÁLISE POR ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA)**

ARTHUR NEIVA FERNANDES

ORIENTADOR: AUGUSTO CESAR DE MENDONÇA BRASIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES

**PUBLICAÇÃO:
BRASÍLIA/DF: ABRIL/2019
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA CARBONO-ENERGÉTICA DE
AEROPORTOS BRASILEIROS COM APLICAÇÃO DE
ANALISE POR ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA)**

ARTHUR NEIVA FERNANDES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TRANSPORTES DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM TRANSPORTES.

APROVADA POR:

**Prof. AUGUSTO CESAR DE MENDONÇA BRASIL, Doutor. (PPGT-UnB)
(ORIENTADOR)**

**Prof. PASTOR WILLY GONZALES TACO, Doutor. (PPGT-UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Prof. MÁRIO BENJAMIN BAPTISTA DE SIQUEIRA, Doutor. (PCMEC-UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

BRASÍLIA/DF, 30 DE ABRIL DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

FERNANDES, ARTHUR NEIVA

Avaliação da Eficiência Carbono-Energética de Aeroportos Brasileiros com Aplicação de Análise por Envoltória de Dados (DEA). [Brasília, Distrito Federal] 2019.

161p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2019).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de engenharia Civil e Ambiental.

1. Aeroportos

2. DEA

3. Emissões Atmosféricas

4. Eficiência carbono-energética

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERNANDES, A. N. (2019). Avaliação da Eficiência Carbono-Energética de Aeroportos Brasileiros com Aplicação de Análise por Envoltória de Dados (DEA), Publicação T.DM-007/2019, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Arthur Neiva Fernandes.

TÍTULO: Avaliação da Eficiência Carbono-Energética de Aeroportos Brasileiros com Aplicação de Análise por Envoltória de Dados (DEA).

GRAU: Mestre

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Arthur Neiva Fernandes
arthurneiva.bsb@gmail.com

Dedicatória

Aos meus pais, Joanna e Aviano, pelo amor e pelo intenso apoio e incentivo aos estudos.

Ao meu querido irmão Vinícius, pela amizade e parceria.

À minha amada Saxa, pelo sorriso que me impulsiona a cada dia.

Agradecimentos

Esta pesquisa é fruto de dois anos de dedicação, comprometimento e esforço. No entanto, nada seria possível sem a colaboração, incentivo e apoio de pessoas e instituições que estiveram presentes durante esse processo.

Primeiramente agradeço aos meus pais pelo amor, dedicação e incentivo ao estudo como premissa fundamental para formação pessoal e profissional. Agradeço também aos amigos que me incentivaram e souberam compreender a minha eventual ausência em alguns momentos.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Transportes (PPGT) e à Universidade de Brasília por concederem o espaço, as oportunidades e as instalações necessárias para o desenvolvimento dessa dissertação. Agradeço também à Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária - Infraero, na figura do Superintendente de Meio Ambiente, Fued Abrão Junior, pelo seu apoio e incentivo para a realização desta pesquisa. Em complemento, aos demais colegas de empresa pelas contribuições e, principalmente, pelo incentivo e apoio nos momentos chave durante minha jornada acadêmica sempre em conjunto com as responsabilidades profissionais.

Ao professor e orientador Dr. Augusto Cesar de Mendonça Brasil, um agradecimento especial, pois, além toda sua competência como pesquisador e docente e por ter aceitado a orientação, foi um mentor fundamental para o delineamento da pesquisa, mostrando caminhos que levaram ao escopo final da mesma e a importantes aprendizados. Agradeço também aos professores membros da banca, Prof. Dr. Pastor Taco e Prof. Dr. Mário Siqueira, pelos ensinamentos em diferentes disciplinas e pela atenção e disponibilidade em participarem da banca de defesa.

Agradeço a todos os colegas de mestrado do PPGT, pelos momentos de apoio, companheirismo e de aprendizado e pelos fundamentais momentos de descontração que fazem parte da jornada. Por fim, agradeço também a todos que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho com seus conhecimentos ou simples palavras de incentivo.

Muito obrigado!

RESUMO

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA CARBONO-ENERGÉTICA DE AEROPORTOS BRASILEIROS COM APLICAÇÃO DE ANÁLISE POR ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA)

Atualmente, a gestão de aeroportos tem se pautado fortemente na avaliação da eficiência, com o compromisso de fornecer serviços eficientes e de alta qualidade para diferentes clientes. Porém, do ponto de vista ambiental, aeroportos são reconhecidos pelo seu alto consumo energético e por produzirem impactos ambientais a nível local e global. Logo, a dimensão ambiental na operação de aeroportos não deve ser negligenciada quando da análise de eficiência dos aeroportos, principalmente frente aos regulamentos e acordos ambientais globais e setoriais cada mais restritivos e impactam na operação dos aeroportos. Neste contexto, a presente pesquisa avaliou e comparou a eficiência de 31 aeroportos brasileiros sob a perspectiva de seu consumo energético total (energia elétrica e combustíveis fósseis) e das suas emissões de CO₂ e de poluentes atmosféricos associadas, considerando, também, os aspectos operacionais e de infraestrutura dos aeroportos. Dessa forma, é proposto um modelo de avaliação de eficiência carbono-energética de aeroportos pelo método não-paramétrico de Análise de Envoltória de Dados (DEA), através do modelo *Slack Based Measure* – SBM, por meio de cenários distintos e tomando-se como parâmetros as relações entre consumo energético total, variáveis de infraestrutura e seus resultantes: processamento de passageiros, aeronaves e as emissões atmosféricas associadas. Os resultados mostraram que 12 (38% da amostra) aeroportos obtiveram escore de 100% de eficiência, sendo observado que aqueles com maiores movimentos de aeronaves e passageiros e com pistas de pouso e decolagem (PPD) mais curtas da amostra tendem a ser os mais eficientes, como é o caso dos aeroportos de Congonhas/SP e Santos Dumont/RJ. Os índices de eficiência foram menores para aeroportos da região Norte (63.73%) e Nordeste (74.21%) quando comparados com aqueles das regiões Sul (88.78%) e Sudeste (100%), indicando que há oportunidades de melhorias nestes grupos. O método proposto de avaliação poderá auxiliar os administradores aeroportuários na definição de aeroportos prioritários para projetos de eficiência energética e redução das emissões, bem como na definição de ações customizadas para as diferentes categorias de aeroportos.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE CARBON-ENERGY EFFICIENCY OF BRAZILIAN AIRPORTS WITH APPLICATION OF DATA ENVELOPMENT ANALYSIS (DEA)

Currently, airport management has relied heavily on efficiency assessment, with a commitment to provide efficient, high-quality services to different customers. However, from an environmental point of view, airports are recognized for their high energy consumption and for producing local and global environmental impacts. Therefore, the environmental dimension in the operation of airports should not be neglected when analyzing the efficiency of airports, especially in relation to global and sectoral environmental regulations and agreements, which are more restrictive and have an impact on the operation of airports. In this context, the present study evaluated and compared the efficiency of 31 Brazilian airports from the perspective of their total energy consumption (electric energy and fossil fuels) and their CO₂ emissions and associated air pollutants, also considering the operational and of airport infrastructure. In this way, a non-parametric method of Data Envelopment Analysis (DEA), using the Slack Based Measure (SBM) model, is proposed by means of different scenarios and taking as a parameters the relationships between total energy consumption, infrastructure variables and their resulting: passenger processing, aircraft and associated atmospheric emissions. The results showed that 12 (38% of the sample) airports had a score of 100% efficiency, and it was observed that those with the largest movements of aircraft and passengers and shorter airstrips (PPD) of the sample tend to be the most efficient, such as the Congonhas / SP and Santos Dumont / RJ airports. Efficiency rates were lower for airports in the North (63.73%) and Northeast (74.21%) when compared to those in the South (88.78%) and Southeast (100%) regions, indicating that there are opportunities for improvement in these groups. The proposed method of evaluation may assist airport administrators in defining priority airports for energy efficiency and emission reduction projects, as well as in the definition of customized actions for different categories of airports.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA.....	17
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
1.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.3	JUSTIFICATIVA.....	21
1.4	METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO	24
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	27
2.1	INTRODUÇÃO	27
2.2	AEROPORTOS E O MEIO AMBIENTE.....	28
2.2.1	INDICADORES DE PERFORMANCE AMBIENTAL DE AEROPORTOS ..	30
2.2.2	EMISSÕES ATMOSFÉRICAS EM AEROPORTOS.....	36
2.2.3	CONSUMO ENERGÉTICO EM AEROPORTOS	39
2.3	EFICIÊNCIA NO CONTEXTO AEROPORTUÁRIO.....	43
2.3.1	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE EFICIÊNCIA	43
2.3.2	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA.....	45
2.3.3	ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS - DEA	47
2.3.4	APLICAÇÃO DE DEA PARA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA EM AEROPORTOS	52
2.3.5	TRATAMENTO DE OUTPUTS INDESEJÁVEIS EM MODELOS DEA	62
3	MÉTODO.....	66
3.1	ETAPA 1 - SELEÇÃO DA AMOSTRA DE AEROPORTOS	69
3.2	ETAPA 1 - SELEÇÃO DE VARIÁVEIS DE AEROPORTOS	70
3.3	ETAPA 2 - COLETA DE DADOS.....	73
3.3.1	AEROPORTOS	73
3.3.2	AERONAVES	79
3.4	CÁLCULO DA ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE CO2 E POLUENTES E DE INDICADORES	83
3.4.1	EMISSÕES DE CO2 DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DOS AEROPORTOS	84
3.4.2	EMISSÕES DE CO2 DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS DOS AEROPROTOS	86
3.4.3	EMISSÕES DE CO2, CO e NOX DAS AERONAVES.....	89
3.4.4	CÁLCULO DOS INDICADORES DE CONSUMO DE ENERGIA E INTENSIDADE DE EMISSÕES DE CO2.....	97
3.5	ETAPA 3 - ANÁLISE POR ENVOLTÓRIA DE DADOS – DEA.....	98
3.5.1	SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO DEA	98
3.5.2	DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS DE MODELAGEM.....	106
3.5.3	CONSTRUÇÃO DOS MODELOS DEA.....	106
3.5.4	EXECUÇÃO DO MODELO DEA	111

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	112
4.1	ETAPA 4 - CLASSIFICAÇÃO DE AEROPORTOS SEGUNDO INDICADORES DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES SUGERIDOS NA LITERATURA.....	112
4.2	ETAPA 4 - EFICIÊNCIA CARBONO-ENERGÉTICA DOS AEROPORTOS BRASILEIROS PELA ANÁLISE DEA	114
4.2.1	CENÁRIO DE BASE (MODELO OPERACIONAL).....	114
4.2.2	CENÁRIO 1 – MODELO PRINCIPAL (EFICIÊNCIA CARBONO-ENERGÉTICA).....	119
4.2.3	CENÁRIO 2 – (Poluentes Atmosféricos).....	126
4.2.4	CENÁRIO 3 – (Emissões de CO ₂ + Poluentes Atmosféricos).....	129
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	131
5.1	LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	133
5.2	RECOMENDAÇÕES A FUTURAS PESQUISAS	134
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
	APÊNDICE 1 - Revisão Sistemática da Literatura - RSL.....	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Dimensões de performance de aeroportos.....	22
Tabela 2.1: Principais aspectos ambientais associados à operação e expansão de aeroportos	29
Tabela 2.2: Indicadores de performance ambiental em aeroportos.....	31
Tabela 2.3: Categorias de indicadores de performance de aeroportos selecionados.	32
Tabela 2.4: Indicadores de Performance Ambiental (API) de aeroportos.....	33
Tabela 2.5: Resultados da dimensão de emissões de CO ₂ do SRA.....	34
Tabela 2.6: Consumo de energia por fonte em aeroportos espanhóis.....	40
Tabela 2.7: Panorama histórico de estudos de eficiência de aeroportos.	53
Tabela 2.8: Variáveis input e output referentes às atividades aéreas e serviços de terminal dos aeroportos norte americanos	54
Tabela 2.9: Principais resultados de variáveis e parâmetros em estudos com uso de DEA em aeroportos.....	58
Tabela 2.10: Síntese das variáveis de entrada e saída em estudos com DEA em aeroportos..	60
Tabela 3.1: Aeroportos operados pela Infraero.....	69
Tabela 3.2: Lista final de Aeroportos selecionados como DMUs.	72
Tabela 3.3: Média de movimento de passageiros e aeronaves entre os anos 2016 -2018.....	74
Tabela 3.4: Consumo médio de energia elétrica dos aeroportos no período de 2016 a 2018..	75
Tabela 3.5: Consumo de Combustíveis Fósseis nos aeroportos	77
Tabela 3.6: Variáveis de infraestrutura dos aeroportos da amostra.	78
Tabela 3.7: Modelos de aeronaves para o ano de 2018 do Aeroporto de Vitória – SBVT.	80
Tabela 3.8: Exemplo de identificação de aeronaves.	83
Tabela 3.9: Fatores de emissão de CO ₂ da geração de energia elétrica regionalizados.	85
Tabela 3.10: Fatores de Conversão.	87
Tabela 3.11: Fatores de emissão	88
Tabela 3.12: Fases e Etapas do ciclo de pouso e decolagem das aeronaves (LTO)	89
Tabela 3.13: Tempos por fase do ciclo LTO.	91
Tabela 3.14: Tempos de taxiamento utilizados por aeroporto.....	92
Tabela 3.15: Classificação de aeronaves para cálculo das emissões de APU.	93
Tabela 3.16: Tempos por fase de uso da APU.....	94
Tabela 3.17: Fatores de Emissões de Aeronaves para CO e NO _x	94
Tabela 3.18: Exemplo de fatores de emissão de motores.....	95
Tabela 3.19: Fluxo de Combustível e Fatores de Emissão das APUs.....	96
Tabela 3.20: Propriedades do QAV utilizadas nas estimativas da metodologia Tier 3A.....	97
Tabela 3.21: Banco de dados de variáveis de input e output.	99
Tabela 3.22: Estatística descritiva do banco de dados de variáveis.	100
Tabela 3.23: Matriz de correlação das variáveis consideradas.	101
Tabela 3.24: Variáveis selecionadas do banco de dados.....	102
Tabela 3.25: Características do modelo DEA para o Cenário de base.....	108
Tabela 3.26: Características do modelo DEA para o Cenário 1(modelo principal).	109
Tabela 3.27: Características do modelo DEA para o Cenário 2 (poluentes atmosféricos). ..	110

Tabela 3.28: Características do modelo DEA para o Cenário 3 (Cenário 1 + Cenário 2).....	111
Tabela 4.1: Resultados dos cálculos dos indicadores para aeroportos brasileiros em comparação com indicadores apresentados pelo trabalho de Kilkiş e Kilkiş (2016).....	112
Tabela 4.2: Resultados do cenário de base.	116
Tabela 4.3: Resultados por clusters – Cenário de base.	118
Tabela 4.4: Resultados por clusters – Cenário 1 (eficiência carbono-energética).	121
Tabela 4.5: Folgas (slacks) do modelo do cenário 1.	122
Tabela 4.6: Correlação de variáveis de entrada com eficiência obtida.	124
Tabela 4.7: Folgas (slacks) do cenário 2 (poluentes atmosféricos).....	126
Tabela 4.8: Resultados do cenário 3.....	129

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Fluxo do trabalho e estrutura da dissertação.....	26
Figura 2.1: Limites do aeroporto como um sistema.....	34
Figura 2.2: Fontes de emissões em aeroportos	37
Figura 2.3: Fases do Ciclo LTO.....	38
Figura 2.4: Esquema de subsistemas de aeroportos.....	40
Figura 2.5: Representação gráfica de Eficiência e Produtividade.....	44
Figura 2.6: Representação de Fronteira de eficiência usando DEA.	49
Figura 2.7: Fronteiras de eficiência dos modelos CCR e BCC.	51
Figura 3.1: Etapas da metodologia da dissertação.	69
Figura 3.2: Comparação entre amostras de aeroportos.....	72
Figura 3.3: Consumo de Energia Elétrica dos aeroportos no período de 2016 a 2018.	75
Figura 3.4: Consumo de B20 em relação ao consumo de Diesel.....	78
Figura 3.5: Procedimentos adotados e fontes de informação para estimar as emissões de aeroportos e aeronaves (metodologia Tier 3A).	84
Figura 3.6: Densidade das variáveis selecionadas para construção dos modelos DEA (cenários).....	104
Figura 3.7: Comparação de densidades da variável "Área do Terminal" em outros estudos.	105
Figura 3.8: Processo produtivo de um aeroporto – Cenário de Base (operacional).....	107
Figura 3.9: Processo produtivo de um aeroporto – Cenário 1. Modelo principal de avaliação da eficiência carbono-energética.	108
Figura 3.10: Processo produtivo de um aeroporto – Cenário 2. Modelo considerando poluentes atmosféricos.....	109
Figura 3.11: Processo produtivo de um aeroporto – Cenário 2. Modelo considerando poluentes atmosféricos.....	110
Figura 4.1: Resultados de Escore de Eficiência - Modelo de base.	115
Figura 4.2: Análise de movimentos proporcionais da variável Movimento de Passageiros (MOVPA).....	118
Figura 4.3: Comparação de escores de eficiência: Cenário de Base e Cenário 1 (Eficiência Carbono-Energética).....	120
Figura 4.4: Projeção (metas) das variáveis do cenário 1, em percentual.	125
Figura 4.5: Comparativo de emissões de poluentes: A) do Autor e B) Martini et. al. (2013).	128
Figura 4.6: Comparação entre Cenário 2 (poluentes atm.) com Cenário 3 (CO ₂ + poluentes atm.).....	130

1 INTRODUÇÃO

A demanda por transporte aéreo no mundo tem crescido constantemente ao longo do tempo, em média, mais de 4% a 5% ao ano. Este comportamento de crescimento vem ocorrendo há várias décadas e está previsto que continue em um futuro próximo. Neste cenário, o desenvolvimento do tráfego aéreo tem sido impulsionado pelo crescimento econômico, uma vez que também funciona como o principal contribuinte para a prosperidade da sociedade (MIYOSHI *et. al.*, 2018). Estima-se, também, que haverá mais de 16 bilhões de passageiros globalmente em 2050, e mais de 400 milhões de toneladas de tráfego total de cargas no mundo no mesmo período (IATA, 2011).

No Brasil, no ano de 2018, a elevação no mercado doméstico (passageiros) foi de 3,3% ante o ano anterior, e as empresas aéreas brasileiras transportaram um total de 103.001.087 passageiros pagos em voos domésticos e internacionais, representando um aumento de 4,1% em relação aos 98.984.674 passageiros pagos que usaram o transporte aéreo em 2017, sendo este o maior resultado do indicador nos últimos três anos (ANAC, 2019).

Em termos de movimentação total de passageiros em aeroportos brasileiros, considerando embarque e desembarque, os números são ainda mais expressivos. Segundo dados do sistema Hórus (SAC, 2019), no período de 2004 a 2018, o crescimento do número de movimento total de passageiros nos aeroportos brasileiros foi de 8,2 % ao ano, indo de 74,6 milhões de passageiros em 2004 para aproximadamente 215 milhões em 2018. Este número anual seria ainda maior não fosse a forte recessão econômica do país, fortemente sentida em setores como transportes e turismo.

Frente ao desenvolvimento econômico e consequente aumento da demanda por voos comerciais domésticos e internacionais, os aeroportos estão cada vez mais se tornando grandes complexos aeroportuários, chamados de “aeroportos-cidade”. Nesse contexto, segundo Güller e Güller (2003), o papel dos aeroportos evoluiu de “máquinas de tráfego na periferia” para grandes centros concentradores (*hubs*) de redes de transporte (particularmente de trens na Europa) e polos de desenvolvimento dentro de suas cidades, com potencial de moldar a transformação metropolitana e criar acessibilidade regional.

Outra questão relevante no contexto do crescimento do setor a é a liberalização mundial do setor aéreo, uma vez que este fenômeno aumentou a demanda por um processamento mais eficiente

e rápido de aeronaves, passageiros, carga e bagagem, conforme afirmam Oum *et. al.* (2008) e Curi *et. al.* (2011). Portanto, administradores de aeroportos estão sendo diariamente confrontados com novos desafios gerenciais, em uma era de crescentes pressões comerciais, tornando essencial o fornecimento de serviços de formas cada vez mais eficientes.

Historicamente, a gestão de aeroportos tem passado por uma mudança de paradigma: a visão tradicional na qual o aeroporto era visto unicamente como uma utilidade pública subsidiada pelo governo, evoluiu para uma visão comercial, conforme demonstraram Doganis & Nuutinen (1983) e Caves & Gosling (1999).

Alguns governos, inicialmente na Europa, perceberam a potencialidade comercial dos aeroportos e resolveram criar o conceito de aeroportos empresas, muitas vezes chamados de “Centros de Negócio”. Dessa forma, empresas poderiam gerir aeroportos de forma autônoma, desobrigando os governos de aporte de subsídios. De fato, muitas dessas empresas passaram a ser geridas como verdadeiros empreendimentos comerciais independentes, e até privatizadas. A tendência na direção da privatização aeroportuária se iniciou no Reino Unido, em 1987, cujo objetivo, entre outros, foi a melhoria da eficiência (HUMPHREYS & FRANCIS, 2002).

Com as primeiras privatizações de aeroportos, notou-se um aumento considerável pelo interesse no estudo de suas eficiências e, em complemento, tornou-se cada vez mais importante que sejam identificados os melhores aeroportos e, principalmente, as variáveis que podem originar um aumento de eficiência em virtude do aumento da pressão competitiva (PACHECO & FERNANDES, 2003). Tais estudos muitas vezes têm foco voltado aos administradores aeroportuários, no sentido de permitir-lhes uma melhor visualização do seu aeroporto como um negócio e, conseqüentemente, de tomarem as melhores decisões buscando o aumento da eficiência de aeroportos sob distintos aspectos. Portanto, neste ambiente de negócios, a gestão de aeroportos tem se pautado fortemente na avaliação da eficiência, com o compromisso de fornecer serviços eficientes e de alta qualidade para diferentes clientes, incluindo companhias aéreas, passageiros, varejistas e usuários em geral (JARACH, 2001; GRAHAM, 2009; GILLEN, 2011).

Nesse contexto, o foco da medição de desempenho de aeroporto deve evoluir progressivamente do desempenho operacional e financeiro para uma abordagem mais holística e multidimensional, na qual outras dimensões de desempenho são igualmente relevantes,

incluindo a dimensão ambiental e suas externalidades. (ZAKRZEWSKI, 2008; SKOULLOUDIS *et. al.*, 2012; BEZERRA & GOMES, 2016).

Na mesma linha e seguindo prognóstico similar feito por Humphreys e Francis (2002) de que o futuro da medição de desempenho nos aeroportos seria impulsionado pelas forças com foco nos negócios comerciais e em maior sensibilidade aos padrões ambientais que protegem as comunidades em torno dos aeroportos, alguns aeroportos de fato tem buscado a análise de sua performance nessa dimensão (MONSALUD *et. al.*, 2014). No entanto resta claro que a dimensão ambiental ainda é pouco discutida na literatura em termos de comparação e benchmark entre aeroportos, conforme indica Po-Lin Lai (2012).

Do ponto de vista ambiental, o setor aéreo como um todo exerce um papel dicotômico, pois ao mesmo tempo em que é reconhecido pelo seu alto consumo energético (ALBA & MANANA, 2016) e suas externalidades ambientais, exerce um papel social e econômico fundamental no mundo moderno, pois é tido como a máquina que impulsiona o crescimento da economia, complementando o produto interno bruto (PIB), criando empregos direta e indiretamente, aumentando a produtividade, exportando produtos e serviços e contribuindo com tributos e investimentos.

Primordialmente, os impactos ambientais do setor aéreo devem ser considerados em dois níveis: global e local. Dentro de um contexto global, o papel que a aviação desempenha na contribuição para os problemas mundiais, incluindo o aquecimento global e o esgotamento do ozônio, está cada vez mais em pauta e são questões de longo prazo que a sociedade como um todo deve abordar (GRAHAM, 2018). Já em nível local, as principais preocupações ambientais estão relacionadas diretamente com a operação de aeroportos, a saber: ruído aeronáutico, qualidade do ar, do solo e da água local (seja no solo ou superfície), bem como a geração de resíduos e a gestão de habitats e vida selvagem (CHERRY, 2008; KILKIS & KILKIS, 2016).

No entanto, ao se considerar o consumo energético total (energia elétrica e combustíveis fósseis) em aeroportos, diferentemente do ruído e resíduos, as suas externalidades ambientais vão muito além dos impactos locais, contribuindo diretamente para efeitos globais em função das emissões de CO₂ contabilizadas.

Segundo dados da ACI (2018), o impacto climático das atividades controladas pelos aeroportos é significativamente menor do que o das operadoras de aeronaves. No entanto, com base nos dados do programa de Acreditação de Carbono de Aeroportos da ACI, este impacto ainda é estimado em torno de 2% a 3% das emissões totais de CO₂ da indústria da aviação (equivalente a 15-20 milhões de toneladas de CO₂ por ano), sugerindo que existem oportunidades para novas reduções nos aeroportos.

Como panorama do setor de transportes no mundo, em 2016, o setor representou um quarto do total das emissões globais de CO₂ relativas ao consumo energético (combustíveis fósseis e energia elétrica), com cerca de 8 GtCO₂, sendo a aviação civil responsável pela emissão de 815 Mt, cerca de 10% do total do setor e 2,5% do total das emissões globais de CO₂ relacionadas ao consumo total de energia (IEA, 2017). No comparativo de 1990 a 2016 dentre os modos de transportes, o maior aumento relativo nas emissões de CO₂ foi justamente do setor da aviação, com 115% de aumento no período (IEA, 2017), o que demonstra o forte aumento das externalidades ambientais do setor.

Além disso, a construção e operação de aeroportos são atividades com consumo intensivo de energia (KILKIŞ, 2014) e, nesse sentido, as suas emissões resultantes contribuem para os impactos ao clima e à qualidade do ar local e tais efeitos se toram cada vez mais alarmantes. Embora tais aspectos ambientais da operação de aeroportos tenham crescido em sua relevância ao longo dos últimos anos (SIMIĆ & BABIĆ, 2015), no contexto atual o foco dos operadores aeroportuários é a busca pelo aumento da eficiência financeira e operacional, buscando novos negócios aeroportuários em fontes de receitas não aeronáuticas, como, por exemplo, a comercialização de áreas internas para exploração de diversas atividades comerciais.

Na literatura, há poucos trabalhos que adotaram a eficiência ambiental de aeroportos como objeto de estudo. No entanto, a dimensão ambiental na operação de aeroportos não deve ser negligenciada, devendo estar integrada à análise da eficiência de aeroportos, principalmente frente aos regulamentos e acordos ambientais globais e setoriais, cada mais restritivos e que impactam diretamente nas estratégias de investimento e desenvolvimento dos aeroportos.

Dentre os poucos estudos existentes, todos eles trazem uma abordagem de avaliação da eficiência operacional de aeroportos considerando externalidades ambientais e nenhum deles, até o momento da realização da revisão bibliográfica deste trabalho, abordou o aeroporto como

sistema consumidor de energia e produtor de emissões de CO₂, integrando o consumo energético com a produção de emissões.

Neste contexto, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar e comparar a eficiência de aeroportos brasileiros sob a perspectiva de seu consumo energético total (energia elétrica e combustíveis fósseis) e das suas emissões de CO₂ associadas, considerando aspectos de infraestrutura dos aeroportos. Dessa forma é proposto um modelo de avaliação de eficiência carbono-energética de aeroportos brasileiros com aplicação do método não-paramétrico de Análise de Envoltória de Dados (DEA).

1.1 DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

O estudo de avaliação de desempenho em termos de eficiência é um problema clássico em todos os tipos de negócios. Esse tipo de avaliação tem por objetivo medir e comparar a condição de eficiência em determinada instituição, permitindo a elaboração de planos para buscar o aumento de sua eficiência e, conseqüentemente, melhoria de seus resultados como um negócio. Tradicionalmente, em estudos com aplicação de DEA na avaliação de eficiência aeroportuária, os insumos (*inputs*) considerados são fatores de produção (por exemplo: mão de obra e bens de capital, como pistas de pouso e decolagem e áreas de terminais de passageiros), com as saídas (*outputs*) sendo o número de movimentos de aeronaves, passageiros e cargas (LOZANO & GUTIÉRREZ, 2011; MARTINI *et. al.*, 2013).

Aeroportos eficientes são aqueles que maximizam a relação entre suas entradas e saídas. Sob essa perspectiva, a busca pela eficiência visa aumentar o número de operações de aeronaves, bem como o número de passageiros transportados e a carga movimentada para um dado nível de entradas, que no caso de aeroportos podem ser, por exemplo, a sua infraestrutura construída ou seu custo operacional, a depender da abordagem que se pretenda avaliar. No entanto, essa abordagem tradicional de estimar a eficiência aeroportuária não considera as externalidades ambientais importantes associadas às atividades aeroportuárias.

Nesse sentido, ao não considerar estas variáveis, pode-se incorrer em estimativas enviesadas de eficiência e *benchmarking* de aeroportos (LOZANO & GUTIÉRREZ, 2011) bem como na superestimação dos benefícios econômicos resultantes das atividades aeroportuárias (LU & MORRELL, 2006).

De maneira geral, aeroportos são estruturas complexas cuja operação necessita da interação e cooperação entre diversos setores do aeroporto, que muitas vezes são representados por diferentes empresas/organizações que podem ter diferentes interesses. Do ponto de vista operacional, portanto, é muito importante que os setores estejam alinhados e que exista entendimento claro dos fluxos de atividades de cada um, para que o aeroporto preste um serviço eficiente e de qualidade aos seus clientes. Da mesma forma, os impactos ambientais da operação aeroportuária devem ser vistos como resultantes da complexa operação de um aeroporto, onde diferentes atores possuem diferentes responsabilidades sob tais impactos.

Uma avaliação que passa diretamente pela cooperação entre diferentes empresas/órgãos dentro da operação de um aeroporto é a da estimativa quantitativa das emissões atmosféricas de um aeroporto, onde são necessários dados de consumo de combustível e de fontes de emissões que estão sob gestão de diferentes empresas. Estes estudos seguem metodologias consagradas como, por exemplo, o “*Greenhouse Gas Protocol*” e a “ISO 14.064” para as emissões de Gases de Efeito Estufa - GEE (escala global) e o documento “2006 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*” para emissões de poluentes atmosféricos (escala local). Essa divisão acontece em função das diferentes abrangências das emissões de cada gás e poluente, das diferentes fontes de emissão, fatores de emissão e dos diferentes objetivos dos estudos. Devido às citadas diferenças, não se adota uma avaliação conjunta das duas escalas de emissões. Comumente, tanto operadores aeroportuários quanto empresas aéreas e até outros concessionários que operaram no aeroporto realizam seus estudos de quantificação das emissões de forma independente, sem considerar as relações entre as empresas envolvidas no mesmo contexto da operação aeroportuária.

Isso acontece em função das organizações precisarem definir seus limites organizacionais em termos de fontes de emissão para realizar um inventário de GEE, por exemplo. Em sua maioria, tais estudos são incluídos em indicadores gerais que informam o nível de sustentabilidade da empresa de acordo com sua governança, em relatórios como o GRI (*Global Report Initiative*) ou de forma voluntária em seus programas de sustentabilidade, como, por exemplo, no caso dos aeroportos que fazem parte do Programa de Acreditação de Carbono (ACA) da *Airport Council International* (ACI).

Nesse sentido, o trabalho de Cohen (2015) mostra que, dentre os 100 mais movimentados aeroportos do mundo no ano de 2011, apenas 31 realizaram a contabilização das suas emissões de CO₂. Destes 31 totais, apenas 8 aeroportos relataram as emissões do escopo 1 e 2 (emissões de controle direto da organização e emissões relativas ao consumo de energia elétrica da organização, respectivamente), 14 aeroportos relataram suas emissões de escopo 1, 2 e 3 (emissões de controle indireto da organização), e 9 aeroportos relataram apenas o total de emissões de GEE sem fornecer uma discriminação por escopo. Nota-se, portanto, que as emissões de escopo 3 (as quais incluem o movimento de aeronaves) são flexíveis, podendo tanto operadores aeroportuários como outras empresas definirem os seus próprios entendimentos acerca de quais fontes considerar como escopo 3.

Muitas vezes este cenário torna difícil a comparação da performance ambiental de aeroportos, pois, além de comparar indicadores que podem não possuir a mesma base de cálculo (escopos distintos considerados) não se consegue ter uma visão do aeroporto como um todo, uma visão que independa de limites e responsabilidades das emissões atmosféricas causadas por sua operação, mas que considere o consumo energético total (energia elétrica e combustíveis fósseis) e as emissões associadas, que é a abordagem proposta pelo presente trabalho.

No contexto do consumo de energia elétrica, usualmente, os terminais de aeroportos são tratados como edifícios autônomos e poucos estudos na literatura exploram as relações funcionais e físicas de edifícios terminais com as operações aeroportuárias terrestres e aéreas. Num contexto mais amplo, o verdadeiro impacto de um edifício terminal no consumo de energia deve incluir as suas emissões combinadas (KILKIŞ, 2014). Segundo Bezerra e Gomes (2018), que realizaram estudo visando identificar parâmetros de comparação de performance e medição de desempenho nos aeroportos brasileiros, os aspectos operacionais, incluindo as dimensões Segurança, Econômica e Financeira, Operacional e Qualidade de Serviço ainda são dominantes neste tipo de análise. No entanto, segundo os mesmos autores, os executivos de aeroportos brasileiros parecem estar cientes da relevância de se medir a qualidade do serviço e os aspectos ambientais associados ao uso de recursos naturais, mesmo que as informações sobre esses problemas possam não estar facilmente disponíveis.

Ainda no contexto energético, os terminais aeroportuários utilizam grandes quantidades de energia para iluminação, aquecimento, ventilação, ar condicionado e sistemas de transporte interno (ACRP, 2012). Em complemento, os aeroportos são, cumulativamente, consumidores

maciços de energia e produtores de emissões, sendo comparados, de fato, com as pequenas cidades (COSTA *et al.*, 2012) e na sua operação geram externalidades ao meio ambiente.

Nesse sentido, o problema do presente trabalho se caracteriza no seguinte questionamento: É possível avaliar e comparar a eficiência de aeroportos brasileiros considerando, além de sua infraestrutura e processamento de passageiros e aeronaves, o seu consumo energético total e as suas externalidades ambientais (emissões atmosféricas de CO₂ e poluentes) como variáveis de seu processo produtivo?

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos do presente estudo são:

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar e comparar a eficiência carbono-energética de aeroportos brasileiros associando o seu consumo energético total e as respectivas emissões atmosféricas (CO₂ e poluentes) com a sua infraestrutura e movimento de passageiros e aeronaves processados.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, tem-se:

- i. Classificar os aeroportos brasileiros em relação à sua eficiência carbono-energética por meio do método Análise de Envoltória de Dados (*Data Envelopment Analysis - DEA*).
- ii. Incluir as emissões de poluentes atmosféricos CO e NO_x oriundos do movimento das aeronaves em cenário de avaliação (modelagem DEA) de eficiência proposto e verificar as diferenças com relação aos demais cenários considerados;
- iii. Identificar, dentre os aeroportos ineficientes, as variáveis de entrada (*inputs*) e saída (*outputs*) que comprometem o desempenho do aeroporto avaliado;
- iv. Comparar indicadores ambientais de consumo energético e emissões atmosféricas específicos de aeroportos com valores encontrados na literatura referentes a grandes aeroportos internacionais.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com o processo de privatização de aeroportos, iniciado nos anos 80 na Europa e EUA, e desde 2012 no Brasil, as operadoras de aeroportos tem buscado cada vez mais se adequarem ao cenário de eficiência operacional que o mercado competitivo requer. No contexto de um sistema, os aeroportos são tidos como sistemas complexos, nos quais diversos processos produtivos são realizados concomitantemente (LIU, 2016).

Portanto, como um sistema, o objetivo de um aeroporto é mover aeronaves, passageiros, carga e bagagem para um determinado local no horário planejado e diversas organizações fornecem diferentes serviços para alcançar tais objetivos. Para administrar um aeroporto na perspectiva de um negócio, torna-se necessário ter as medidas de sua eficiência bastante claras e isto não é uma tarefa simples no estudo de aeroportos devido à complexidade de sua operação e das relações entre empresas e entidades envolvidas. Nesse sentido, não há consenso na literatura acerca da eficiência aeroportuária, mais especificamente sobre uma definição precisa de como deve ser mensurada a eficiência de um aeroporto (WANKE, 2012; PERELMAN & SEREBRISKY, 2012).

Nesse contexto, é importante destacar que a criação de um modelo padrão de eficiência, que se adapte a toda e qualquer situação, constitui tarefa árdua e que, ainda assim, resultará em um modelo relativo de eficiência. Dessa forma, diversos autores (vide Tabela 2.7) utilizam abordagens distintas, com variáveis que ora se repetem, ora não. No entanto, a análise de eficiência se apresenta como uma ferramenta bastante útil para gestores e autoridades aeroportuárias, constituindo-se uma fonte importante de informações para o planejamento de políticas regionais e nacionais. Os aspectos de eficiência de aeroportos tem sido objeto de pesquisas sob diferentes perspectivas, como financeira, operacional, de gestão e de níveis de serviço. Notadamente, a técnica de Análise de Envoltória de Dados (DEA) predomina nas avaliações não paramétricas de eficiência, devido a sua capacidade de avaliar diferentes aspectos através das variáveis selecionadas como entrada (*inputs*) e saídas (*outputs*) com o pressuposto de que os *inputs* sejam minimizados ou *outputs* maximizados.

Segundo Wanke (2012), a utilização da técnica de DEA tem como objetivos gerais: estimar a eficiência operacional; ilustrar como esta medida de eficiência pode ser útil para monitorar as operações dos aeroportos; identificar características ou variáveis contextuais que expliquem as

diferenças entre os níveis de eficiência encontrados; avaliar o impacto do tamanho da unidade nos níveis de eficiência; e medir as folgas (*slacks*). Em adição, Iftikhar *et. al.* (2018) evidenciam que a DEA é uma abordagem muito útil para avaliação de desempenho e *benchmarking* em estudos de eficiência de emissões de CO₂ e estudos de eficiência ambiental.

No entanto, poucos são os estudos que incluem as externalidades ambientais ao se avaliar a eficiência de aeroportos. Nesse sentido, em que pese as operações de aeronaves representarem cerca de 95% das emissões de CO₂ da aviação e estarem fora do controle direto de qualquer aeroporto individual (BAA, 2010), as operações aeroportuárias mais sustentáveis são fundamentais para redução do impacto no clima das viagens aéreas (MONSALUD, *et. al.*, 2014). Em complemento, os tradicionais modelos DEA falham em avaliar o desempenho por não representar a real situação dos aeroportos, isto é, os *outputs* indesejáveis (por exemplo: emissões atmosféricas) são ignorados porque apenas os produtos com valores positivos estão incluídos nos cálculos.

Considerando as emissões associadas à operação aeroportuária, recentemente, Bezerra e Gomes (2018) analisaram 369 publicações de avaliação de performance em aeroportos, de onde foram selecionadas um conjunto de 77 medidas de desempenho, classificadas de acordo com a estrutura das dimensões de desempenho aeroportuário proposto por Bezerra e Gomes (2016), conforme Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Dimensões de performance de aeroportos.

Dimensão de Performance	Descrição
Eficiência / Produtividade (EFF)	Compreende as proporções físicas e entradas e saídas financeiras relacionadas com o processamento de serviços aeroportuários
Qualidade do serviço (ASQ)	Medidas relacionadas às instalações do aeroporto e aos atributos do serviço, incluindo medidas baseadas no cliente e medidas quantitativas associadas ao terminal de passageiros
Segurança (<i>Safety</i>) (SAF)	Considera-se a ocorrência de eventos indesejáveis e indicadores típicos associados aos Sistemas de Gestão da Segurança
Segurança (<i>Security</i>) (SEC)	Medidas relacionadas à ocorrência de eventos de segurança
Comercial (COM)	Medidas refletem o desempenho de atividades não aeronáuticas

Ambiental (ENV)	Medidas relacionadas às atividades aeroportuárias com impacto no meio ambiente
Social (SOC)	Relaciona-se com os efeitos das atividades aeroportuárias nas comunidades locais
Concorrência (COP)	Compreende medidas associadas ao mercado de transporte aéreo
Econômico / Financeiro (EFN)	Medidas econômicas e financeiras tradicionais estão representadas
Dimensão Operacional (OPE)	Medidas relacionadas aos serviços de processamento aeroportuário

Fonte: Adaptado de (Bezerra e Gomes 2018)

No estudo, cada medida foi enviada a três executivos de aeroportos e dois especialistas da Agência Brasileira de Aviação Civil (ANAC) para julgamento acerca de: frequência de utilização da medida durante o processo de avaliação do desempenho do aeroporto (FU), a relevância percebida da medida para prever o desempenho do aeroporto (PR) e a facilidade de aquisição da informação necessária para utilizar o desempenho medida (EA).

Como resultado, o estudo mostrou que medidas de desempenho ambientais estão entre as medidas com os valores mais baixos para o quesito de facilidade de aquisição (EA), sendo a pior colocada a medida “emissões de poluentes gasosos” identificada como de maior dificuldade para aquisição de dados, sendo mais um indicador de que esta dimensão carece de maior detalhamento em estudos científicos, principalmente ao considerar a crescente relevância do tema.

Ante ao exposto, o presente estudo visa contribuir na área de avaliação de eficiência ambiental de aeroportos ao desenvolver uma abordagem utilizando a técnica DEA para avaliar e comparar a eficiência de aeroportos do ponto de vista do seu consumo energético total e emissões associadas, ou seja, considerando esta importante dimensão de externalidade ambiental da operação aeroportuária. Nesse sentido, a originalidade deste trabalho consiste em apresentar um método para a avaliação da eficiência carbono-energética em aeroportos que considere distintos cenários, a fim de compara-los e avaliar as influências das variáveis na eficiência dos aeroportos.

A presente pesquisa faz uso de dados primários obtidos da empresa administradora dos aeroportos brasileiros em análise (Infraero) e, para avaliar a eficiência sob a abordagem

proposta, é necessário definir quais as variáveis de entrada e saída, ao considerar o aeroporto como um sistema único consumidor de energia e produtor de emissões. Para isso, é possível seguir uma linha de estudos na literatura para selecionar tais variáveis e, posteriormente, proceder com a sua coleta, análise, tratamento e inserção no modelo DEA.

Nesse sentido, outra contribuição do presente trabalho é a formação dos indicadores ambientais sugeridos pela literatura para uma amostra representativa de aeroportos brasileiros (31 aeroportos), algo que até o presente momento não fora apresentado em trabalhos acadêmicos e que mostra lacuna do ponto de vista de avaliação de aeroportos brasileiros por meio de indicadores de performance ambiental específicos do setor.

Em termos práticos, os resultados da pesquisa podem oferecer subsídios para tomadas de decisões em termos gerenciais e operacionais relacionadas às ações de eficiência energética e gerenciamento das emissões de aeroportuários, pois é apresentada uma abordagem estruturada e sistemática para a identificação do real desempenho carbono-energético de aeroportos.

1.4 METODOLOGIA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação será realizada utilizando diversos métodos conjugados e, de forma mais sistematizada e para atingir os objetivos propostos, está dividida em seis etapas conforme detalhamento seguir.

Etapa 1: descrição do tema, com apresentação dos objetivos e justificativa.

Método: revisão bibliografia;

Etapa 2: Revisão da Literatura. Pesquisa e apresentação dos estudos e abordagens disponíveis na literatura, acerca de: eficiência técnica de aeroportos, aplicação de DEA para avaliação de eficiência de aeroportos, estudos sobre indicadores de performance ambiental em aeroportos e estudos com foco nas emissões atmosféricas no contexto aeroportuário. Para a elaboração da revisão da literatura foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura – RSL (Apêndice 1) bem como pesquisa exploratória nas bases de dados disponíveis no portal Periódicos CAPES.

Método: Revisão Sistemática da Bibliografia – RSL e revisão bibliográfica;

Etapa 3: definição e coleta de dados de aeroportos para aplicação do método proposto.
Método: Variáveis sugeridas na literatura e consulta ao banco de dados da Infraero, empresa operadora dos aeroportos considerados.

Etapa 4: definição de cenários e desenvolvimento do método proposto para avaliação da eficiência carbono-energética de aeroportos.

Etapa 5: execução do modelo com os dados levantados para os cenários definidos.
Método: Modelos DEA-BCC e SBM-DEA utilizados através da inserção de dados levantados no software MaxDEA 7 Ultra de Análise de Envoltória de Dados (DEA);

Etapa 6: análises dos resultados e avaliação das relações entre o consumo energético e a operação dos aeroportos avaliados.

Método: análise comparativa entre eficiências relativas obtidas e de indicadores de desempenho selecionados a partir da revisão da literatura;

Etapa 7: conclusão do trabalho, com apresentação das considerações finais.

Método: descrição textual.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação estrutura-se em cinco capítulos, organizados da seguinte forma:

Capítulo 1 - Este é o capítulo introdutório do trabalho, onde apresenta-se a Introdução bem como os elementos: Delimitação do Problema, Objetivos, Justificativa, Metodologia e Estrutura da Dissertação;

Capítulo 2 - Este capítulo traz a Revisão da Literatura, onde serão discutidos os principais tópicos encontrados na literatura científica relacionados aos dois eixos temáticos centrais da pesquisa: aspectos ambientais e análise de eficiência de aeroportos. Estes temas formam a base de conhecimentos que fundamentaram o desenvolvimento da pesquisa e proposição do modelo de análise da eficiência carbono-energética em aeroportos por meio da aplicação de modelo DEA, incluindo o seu arcabouço teórico, contendo as teorias referentes método de programação matemática para análise da eficiência.

Capítulo 3 - Este capítulo apresenta a metodologia e desenvolvimento do modelo proposto para avaliação da eficiência carbono-energética de aeroportos. Assim, é composto pelos seguintes tópicos: seleção da amostra de aeroportos; coleta de dados, cálculo de indicadores ambientais; cálculo da estimativa das emissões de aeroportos e aeronaves, definição de cenários de modelagem DEA e execução dos modelos definidos.

Capítulo 4 - Este capítulo apresenta os resultados obtidos da pesquisa e sua análise crítica, além de comparações entre os indicadores de aeroportos nacionais e internacionais. Também neste capítulo será apresentada a avaliação dos cenários de modelagem definidos no capítulo anterior, evidenciando as diferenças entre os cenários e as variáveis a serem melhoradas para que um aeroporto seja considerado eficiente sob a abordagem da pesquisa.

Capítulo 5 - Este capítulo apresentara a conclusão e recomendações do trabalho, contendo os resultados da pesquisa, considerações e as limitações do estudo, bem como recomendações de tópicos a serem objeto de estudos complementares sobre o tema.

Para demonstrar a ligação entre as Etapas e Capítulos, apresenta-se na Figura 1.1 o fluxo de trabalho e estrutura da dissertação, além da distinção do presente trabalho em 3 grandes fases:

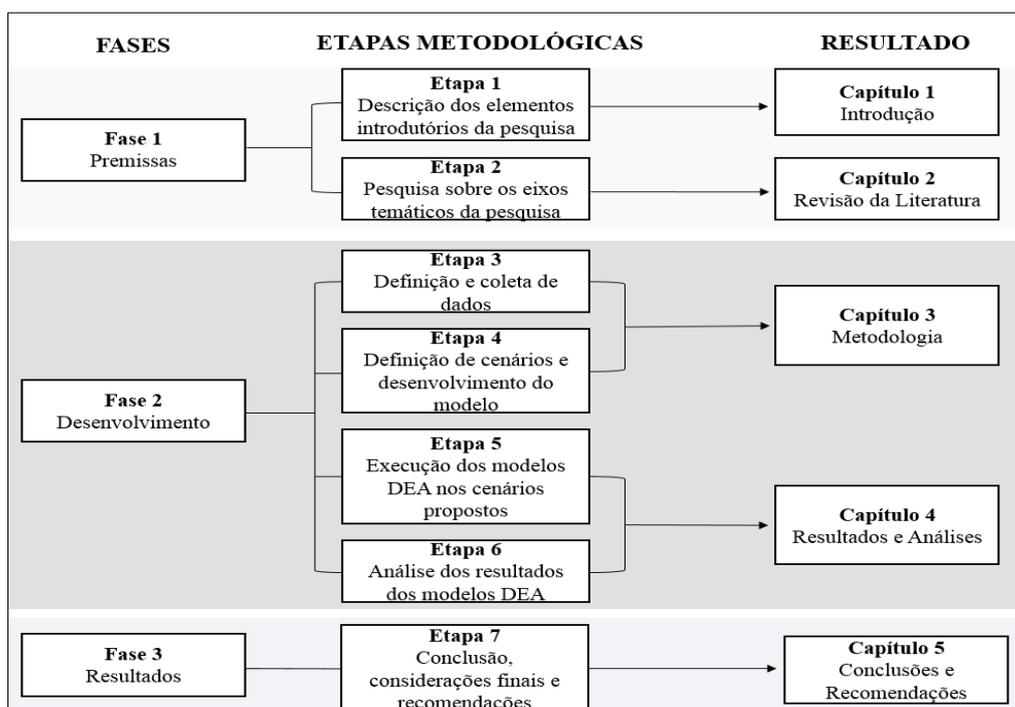


Figura 1.1: Fluxo do trabalho e estrutura da dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica realizada. Optou-se por realizar a revisão da literatura com foco nos dois eixos temáticos balizadores da pesquisa e, ao final de cada um deles, um tópico conclusivo apresentando uma síntese das discussões.

O primeiro tema, apresentado na seção 2.2, trata dos aspectos ambientais em aeroportos, com foco nos temas: indicadores de performance ambiental em aeroportos (item 2.2.1), emissões atmosféricas em aeroportos (item 2.2.2) e eficiência energética em aeroportos (item 2.2.3). O objetivo deste eixo é identificar os principais aspectos ambientais de sua operação, com foco no consumo energético e suas emissões resultantes. Em complemento, buscou-se identificar os indicadores de desempenho ambiental mais utilizados por estudos bem como caracterizar um aeroporto como um sistema consumidor de energia.

O segundo tema, apresentado na seção 2.3, trata dos conceitos de eficiência e sua aplicação no contexto aeroportuário, com os subtemas: conceitos básicos de eficiência (item 2.3.1), métodos de avaliação de eficiência (item 2.3.2), Análise Envoltória de Dados (DEA) (item 2.3.3) e aplicação de DEA em aeroportos (item 2.3.4). O objetivo deste eixo é discutir os conceitos de eficiência e identificar as principais abordagens na literatura de eficiência no contexto aeroportuário. Ainda, este tópico trará uma abordagem acerca das formulações e aplicação da DEA, método que será utilizado nessa pesquisa.

Para a análise da literatura acerca do eixo temático sobre aspectos ambientais em aeroporto, foi realizada inicialmente uma Revisão Sistemática da Literatura – RSL (Apêndice 1), a fim de definir o perfil histórico e evolutivo do tema e identificar os trabalhos de maior relevância, para que, posteriormente, fosse realizada uma revisão exploratória na literatura já direcionada. A pesquisa exploratória foi realizada para ambos os eixos temáticos, utilizando o acesso ao site Periódicos CAPES e suas bases de dados disponíveis.

2.2 AEROPORTOS E O MEIO AMBIENTE

Ao longo dos anos, tem havido crescente interesse em estudos focando nos aspectos ambientais em aeroportos. A atividade aeroportuária causa externalidades ambientais semelhante às de muitas indústrias, embora as suas operações possam se expandir por uma área extensa. Ainda antes de sua operação, as complexas obras aeroportuárias podem gerar impactos ambientais devido às atividades decorrentes de eventuais desapropriações, serviços preliminares, terraplenagem e das construções civis. Do ponto de vista operacional, os impactos negativos de um determinado aeroporto geralmente incluem, no âmbito local: ruído aeronáutico e aeroportuário, poluição do ar, congestionamentos e atrasos, uso e ocupação do solo e gerenciamento de resíduos (JANIC, 2010).

Já Dimitriou *et. al.*(2014) afirmam que os impactos ambientais das atividades dos aeroportos têm o potencial para restringir a capacidade operacional ou de potencial crescimento, especialmente quando o ruído ou emissões atmosféricas excederem os limites regulamentares. Em complemento e em consonância com Lu e Morrell (2006) afirmam, ainda, que o desafio para os operadores dos aeroportos será equilibrar os benefícios sociais e económicos de um aeroporto para uma região ou cidade, com a perturbação do ambiente e da saúde humana.

Jordão (2009) revisou questões de desenvolvimento sustentável por alguns aeroportos que têm sido considerados como os melhores do mundo na perspectiva de seus clientes, utilizando como base de medição de desempenho os indicadores de desempenho GRI (*Global Reporting Initiative*). O autor aponta diversos aspectos e impactos causados pela operação e expansão de aeroportos, elencados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Principais aspectos ambientais associados à operação e expansão de aeroportos.

Aspectos Ambientais	Impactos Ambientais
Consumo de Água	Degradação da saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos naturais
Consumo de energia e combustíveis fósseis	Poluição do ar e aquecimento global
Emissões de CO ₂	Aquecimento global
Emissões de VOC	Poluição atmosférica fotoquímica (aumento do ozono ao nível do solo)
Emissões de NOx e SOx	Acidificação e eutrofização
Geração de Resíduos	Odor (se aplicável), aquecimento global (se biodegradável), poluição do ar (se incinerado), impacto estético / visual, degradação de saúde e ecossistema (se indevidamente descartado).
Efluentes líquidos (nitratos, fosfatos)	Acidificação e eutrofização, degradação de habitat aquático, contaminação do solo e da água subterrânea
Metais Pesados (Cr, Cd, Ni, Cu, Pb)	Doenças de saúde e degradação do solo
Geração de ruído	Degradação da saúde humana e da biota nos arredores
Distúrbios luminosos	Impacto visual na comunidade circundante e perturbação da biota local, principalmente aves.

Fonte: Adaptado de Jordão (2009).

Na literatura, diversos autores (NUNES *et. al.*, 2011; MARTINI *et. al.*, 2013; TEOH & KHOO, 2016) reforçam que tanto as emissões de poluentes atmosféricos de aeronaves quanto a poluição sonora emergem para ser as duas principais preocupações ambientais com impacto direto sobre a comunidade que vive ao redor dos aeroportos. Em particular, as emissões atmosféricas associadas à operação aeroportuária podem ser tratadas tanto em escala local e global, o que faz com que gestores de aeroportos tenham que buscar soluções de redução destes impactos sob diferentes perspectivas e motivações.

Do ponto de vista dos órgãos operadores de aeroportos, o *Airports Council International (ACI)*, órgão que possui 573 membros responsáveis pela operação de 1751 aeroportos em 179 países, entende que os aspectos ambientais têm se tornado tão importantes quanto aspectos de segurança nos aeroportos. Com a missão de promover melhores práticas e compartilhar conhecimento sobre a operação de aeroportos, a ACI tem indicado as seguintes diretrizes ambientais para seus associados (ACI, 2010):

- Minimizar ou mitigar os efeitos adversos do ruído aeronáutico nas comunidades;
- Minimizar ou mitigar os efeitos adversos da aviação referentes à poluição do ar;
- Minimizar ou mitigar os impactos da aviação na mudança climática;

- Promover sustentabilidade através da melhoria do desempenho ambiental durante o desenvolvimento e operação de aeroportos;
- Melhorar a consciência ambiental, treinando e compartilhando informações entre aeroportos do mundo;
- Promover cooperação, entendimento e colaboração com os atores envolvidos.

2.2.1 INDICADORES DE PERFORMANCE AMBIENTAL DE AEROPORTOS

Segundo a Organização Internacional de Normalização (ISO, 1999), o relatório e desempenho ambientais de uma organização são definidos como sendo “o resultado da gestão dos aspectos ambientais de uma organização” (ISO, 1999). O Relatório aborda as influências de uma empresa em “sistemas naturais vivos e não vivos, incluindo ecossistemas, solo, ar e água” (GRI, 2006).

Do ponto de vista da visão e estratégias para a sustentabilidade, os indicadores de desempenho ambiental informados em relatórios de sustentabilidade de aeroportos podem ajudar a pesquisadores a facilmente compreender as estratégias de sustentabilidade dos aeroportos, bem como a entender o verdadeiro foco de sustentabilidade das administrações aeroportuárias (JORDÃO, 2009). Em complemento, na literatura há poucos estudos que fazem um comparativo de múltiplos critérios ambientais para avaliar a performance de aeroportos sob este ponto de vista (KILKIŞ & KILKIŞ, 2016).

Em relação à performance ambiental de aeroportos, alguns autores empregaram esforços em avaliar a dimensão ambiental e comparar performances entre aeroportos. O estudo de Koç e Durmaz (2015) avaliou os 10 melhores aeroportos do mundo de acordo com pesquisas de passageiros realizadas pela empresa Skytrax e pelo programa de *benchmarking* da *Airports Council International* (ACI), utilizando informações dos relatórios GRI disponibilizados pelos aeroportos. No estudo, os principais indicadores de performance ambiental informados pelos aeroportos foram:

- Materiais usados por peso ou volume;
- Porcentagem de materiais usados reciclados;
- Consumo de energia direta por fonte de energia primária;
- Energia economizada devido a melhorias em conservação e eficiência;

- Iniciativas para fornecer produtos e produtos com baixo consumo de energia ou de energia renovável;
- Uso total de água por qualidade e destino; e
- Peso total de resíduos por tipo e método de disposição.

Neste estudo, os autores afirmam que nem sempre uma boa avaliação por pesquisas de passageiros é refletida em bons indicadores de desempenho ambientais, e que embora a maioria dos aeroportos da amostra falhou em desenvolver visão e estratégias voltadas para a sustentabilidade, os indicadores de desempenho mais usados nos relatórios ajudarão os pesquisadores a melhor entender as estratégias de sustentabilidade dos aeroportos (KOÇ & DURMAZ, 2015).

Tradicionalmente, o consumo de energia, as emissões de gases de efeito estufa (poluição atmosférica), ruído, uso da terra e eficiência de resíduos são todos considerados como dimensões para elaboração de indicadores desempenho ambientais do aeroporto. Nesse sentido, alguns métodos e abordagens de indicadores de performance ambiental de aeroportos foram propostos, ainda que poucos estudos tenham de fato realizado estudos comparativos com dados reais de aeroportos.

Janic (2011) discutiu a necessidade de se monitorar, analisar e avaliar o processo de efficientização ambiental de aeroportos, tais como poluição do ar, ruído, atrasos no tráfego aéreo, uso da terra e resíduos. Ainda, o autor sugere que a performance ambiental de aeroportos pode ser aferida através de indicadores específicos para o setor, conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Indicadores de performance ambiental em aeroportos.

Dimensão	Indicador	Orientação do indicador
Eficiência Energética	Energia consumida por unidade de produção aeroportuária, ou seja, atm, passageiro, unidade de carga e / ou WLU, acomodada durante um determinado período de tempo (ano).	Esta medida é preferida a ser tão baixa quanto possível e diminuir com o volume de saída do aeroporto.
Eficiência das Emissões Atmosféricas (poluentes atmosféricos ou gases de efeito estufa)	Emissões (em massa) por unidade de produção aeroportuária, ou seja, atm, passageiro, unidade de carga e / ou WLU, acomodada durante um determinado período de tempo (ano).	É preferível que esta medida seja tão baixa quanto possível e diminua com a introdução das medidas atenuantes supramencionadas.

Eficiência do Ruído	Área afetada (km ²), população e/ou número de domicílios expostos por nível de ruído de longo prazo equivalente (Leq) em decibel (dB).	Este indicador é preferido para ser tão baixo quanto possível e diminuir com o número de voos
Eficiência do Uso do solo	Volume de WLUs acomodados durante um determinado período de tempo (ano) por unidade de terra adquirida.	Esta medida é preferida para ser o mais alto possível e aumentar com a área de terra ocupada pelo aeroporto.
Eficiência de Resíduos	Total de resíduos gerados pelo aeroporto durante determinado período de tempo e/ou a quantidade de resíduos gerados por unidade de produção do aeroporto (por passageiro e/ou WLU).	Estas medidas são preferíveis a serem tão baixas quanto possível e a diminuir com a produção do aeroporto durante um determinado período de tempo (ano).

Fonte: Adaptado de Janic (2011).

O Relatório 19A denominado “*Resource Guide to Airport Performance Indicators*” publicado pelo “*Airport Cooperative Research Program – ACRP*” (ACRP, 2011) propõe indicadores de performance de aeroportos, denominados de API (*Airports Performance Indicators*), para uso em *benchmarking* e medição de desempenho. O estudo foi realizado por mais de 120 profissionais de aeroportos, incluindo diversos especialistas na medição dos APIs. O trabalho produziu indicadores (APIs) em três níveis, conforme Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Categorias de indicadores de performance de aeroportos selecionados.

Categoria APIs	Quantidade APIs	Descrição de Categoria
Indicadores Centrais (<i>Core</i>)	29	Importantes para a operação global do aeroporto ou para o nível executivo do aeroporto (diretor executivo e diretor de aviação) e/ou diretoria do aeroporto
Indicadores Chave (<i>Key</i>)	132	Importantes para as operações dos principais departamentos ou funções do aeroporto (por exemplo: Finanças, Manutenção e Meio Ambiente) Não considerados úteis para a operação geral do aeroporto, para o nível executivo ou para departamentos/funções-chave do aeroporto.
Outros indicadores Centrais (<i>Other Core</i>)	679	No entanto, podem ser úteis como APIs de unidade departamental secundária, no nível do gerente ou abaixo dele.

Fonte: Adaptado de ACRP, 2011.

Nesse estudo, os indicadores ambientais foram categorizados como “Indicadores Chave”, com um total de 11 APIs, conforme Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Indicadores de Performance Ambiental (API) de aeroportos.

Indicadores (APIs)	Dimensão Ambiental
Pegada de carbono	Emissões (mudanças climáticas)
% de recuperação de fluído para degelo de aeronaves	Resíduos e Efluentes líquidos
% de novos Projetos de Construção com padrão LEED;	Eficiência Energética
Revisões Ambientais - Oportunidade de Conclusão	Licenciamento Ambiental
Número de Violações Ambientais	Múltiplos aspectos
% de operações noturnas usando pistas preferenciais (redução do ruído)	Ruído aeronáutico
% de Conformidade de Procedimentos de Redução de Ruído	Ruído aeronáutico
Número de residências dentro da faixa de 65 dBA DNL(métrica de ruído)	Ruído aeronáutico
Número de Descartes de produtos perigosos	Resíduos
Operações de aeronaves de estágio 2 (peso menor que 75.000 libras)	Ruído aeronáutico
Reciclagem de lixo	Resíduos

Fonte: Adaptado de ACRP,2011.

Cabe ressaltar que a proposta de ACRP (2011) não considerou as emissões de poluentes atmosféricos como indicadores chave, embora o estudo tenha indicado que, até a data de sua elaboração (ano de 2011) o forte interesse na responsabilidade ambiental não resultou em um conjunto de indicadores de desempenho ambiental comumente aceitos (ACRP, 2011). Em um aspecto de governança, Skouloudis *et. al.* (2012) analisaram o escopo dos Relatórios de Sustentabilidade Corporativa (GRI) em 13 aeroportos diferentes e encontraram no máximo 52% de taxa de completude das divulgações, também sugerindo que os aeroportos falham ao medir e reportar seus indicadores de dimensão ambiental.

Com relação a estudos que de fato tenham realizado uma abordagem comparativa da performance ambiental em aeroportos, poucos são os trabalhos disponíveis na literatura. O principal deles é o trabalho de Kilkış e Kilkış (2016) que desenvolveu e aplicou um índice de sustentabilidade a 9 aeroportos e criou um ranking entre os mesmos para avaliar o seu desempenho ambiental através de múltiplos fatores, denominado Ranking de Sustentabilidade de Aeroportos (SRA). O SRA é um indicador composto com 5 dimensões (D1 a D5) e 25 indicadores, sendo consideradas como dimensões: serviços aeroportuários e qualidade (D1), consumo e geração de energia (D2), emissões de dióxido de carbono e mitigação (D3), gestão ambiental e biodiversidade (D4) e, por fim, atmosfera e transportes de baixa emissão (D5).

O trabalho abordou o aeroporto como um sistema ao considerar entradas e saídas ao mesmo, com seus limites definidos de acordo com a Figura 2.1.

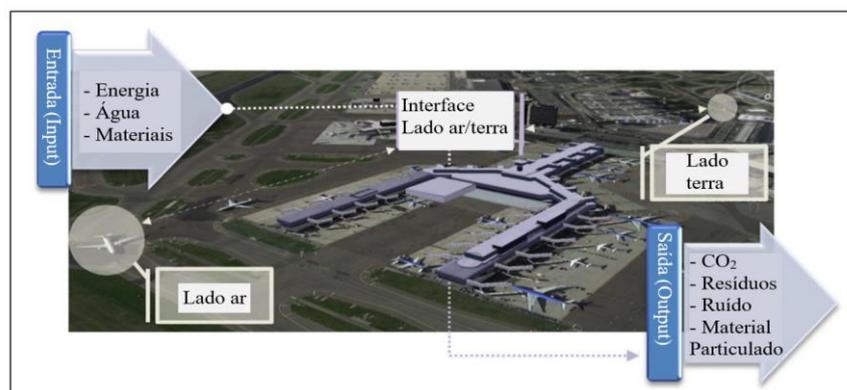


Figura 2.1: Limites do aeroporto como um sistema.

Fonte: Adaptado de Kilkiş e Kilkiş (2016).

Importante ressaltar que esta abordagem sistêmica de um aeroporto apresentada por Kilkiş e Kilkiş (2016) (Figura 2.1) é similar à abordagem que será adotada na presente pesquisa para avaliação da eficiência carbono-energética de aeroportos em função de, majoritariamente, considerar como entrada (*input*) do processo produtivo de um aeroporto o consumo total de energia e como saída (*output*) as emissões atmosféricas. Essa abordagem será detalhada no Capítulo 3 do presente trabalho, que desenvolverá o modelo de avaliação e comparação de eficiência proposto.

Os dados da pesquisa de Kilkiş e Kilkiş (2016) foram extraídos majoritariamente de relatórios de sustentabilidade corporativa dos aeroportos, e na dimensão que trata das emissões de CO₂ (D3) foram consideradas apenas as emissões totais de Escopo 1 (emissões controladas pelo administrador aeroportuário) e de Escopo 2 (emissões por consumo ou produção de energia elétrica), não contabilizando emissões de Escopo 3 (emissões indiretas com, por exemplo, o ciclo LTO de aeronaves) em função do foco principal no limite do sistema e na falta de dados sobre as emissões relacionadas ao ciclo LTO (aeronaves). Os indicadores desta dimensão estão representados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Resultados da dimensão de emissões de CO₂ do SRA.

Aeroportos	Emissões de CO ₂ (ton)	Emissão de CO ₂ por passageiro (ton)	Emissão de CO ₂ por unidade de energia (tCO ₂ /tep ¹)
Amsterdam (AMS)	104,948	0.002	3.94
Instambul (IST)	46,080	0.001	1.23
Barcelona (BCN)	87,718	0.003	4.47
Frankfurt (FRA)	175,032	0.003	3.36
Gatwick (LGW)	59,380	0.0017	3.12

Heathrow (LHR)	284,000	0.0039	4.44
Munique (MUC)	101,968	0.0027	2.29
São Francisco (SFO)	42,236	0.0011	1.18
Seul (ICN)	190,327	0.0039	2.2

Fonte: Adaptado de (KILKIŞ & KILKIŞ, 2016)

¹ Convertido das unidades originais para tep - tonelada equivalente de petróleo (1 GWh = 85.98 tep).

O indicador de Emissão de CO₂ por passageiro mostrou que os aeroportos de São Francisco (SFO) e de Istambul (IST) foram os mais eficientes, ao passo que os aeroportos de Heathrow (LHR) e Seul (ICN) foram menos eficientes. Da mesma forma, os aeroportos de São Francisco (SFO) e Istambul (IST) se mostraram os mais eficientes pelo indicador de Emissão de CO₂ por unidade de energia (tep - tonelada de petróleo equivalente). As emissões de CO₂ também são afetadas pelo fator de capacidade do aeroporto e mix energético que é usado para satisfazer as necessidades de energia dos aeroportos. No entanto, medidas como a instalação de painéis solares com geração de 747 MWh por ano no aeroporto de São Francisco e o alto percentual de fonte hídrica na matrix de geração de energia para o aeroporto de Istambul foram determinantes para seus índices de eficiência de emissões frente aos demais aeroportos.

Os indicadores de relação direta de emissões de CO₂ por unidade de energia e pelo número de passageiros (Tabela 6) além do indicador de consumo energético por passageiro, sugeridos por Janic (2010) e calculados por Kilkış e Kilkış (2016) para aeroportos de grande porte, foram utilizados como indicadores ambientais para estimativa da performance carbono-energética dos aeroportos amostrados pela presente pesquisa. Dessa forma foi possível relacionar os aeroportos brasileiros operados pela Infraero (amostra do presente estudo) e compará-los, sob estes indicadores, aos demais aeroportos apontados na Tabela 6.

Mais recentemente, o estudo realizado por Chao *et. al.* (2017) desenvolveu um modelo de avaliação do desempenho ambiental de aeroportos, baseado em 4 dimensões e 18 indicadores, identificados a partir das medidas atualmente implementadas pelos aeroportos para proteção ambiental, conservação de energia e redução de carbono. As quatro dimensões de indicadores identificados foram: projeto de aeroportos sustentáveis, conservação de energia e redução de carbono em operações aeroportuárias, uso de recursos renováveis e gestão da sustentabilidade ambiental nos aeroportos. Neste estudo, Chao *et. al.* (2017) utilizam opiniões de especialistas coletadas a partir de questionários, que por sua vez foram convertidos em números fuzzy triangulares (método Fuzzi Delphi) para identificação dos indicadores mais relevantes e, em seguida, dos quais uma média geométrica foi obtida para posteriormente servirem de input a

um modelo de Processo Hierárquico Analítico (AHP) para determinação dos pesos dos indicadores.

Para validação do modelo, os autores aplicaram os 16 indicadores do desempenho ambiental para cinco aeroportos internacionais: Narita (NRT), Incheon (ICN), Kaohsiung (KHH), Istambul (IST) e Miami (MIA), classificados aleatoriamente como aeroportos A, B, C, D e E. Como resultado, a pesquisa mostrou que a dimensão com maior peso em ordem decrescente foi a de “conservação de energia e redução de carbono nas operações aeroportuárias”, reforçando a importância desta dimensão ambiental nos processos de planejamento, operação e governança dos aeroportos (CHAO *et. al.*, 2017).

2.2.2 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS EM AEROPORTOS

As emissões de aeronaves têm sido estudadas extensivamente desde o final da década de 1960 e inicialmente o interesse foi impulsionado principalmente por seus efeitos diretos e indiretos sobre o clima e a geração de trilhas. Por este motivo, muitos estudos iniciais incidiram sobre as emissões em altas altitudes de cruzeiro. Igualmente, o interesse nas emissões de aviação nos aeroportos também remonta a muitos anos (DALEY & NAUGLE, 1979; NAUGLE & FOX, 1981), mas apenas recentemente houve uma crescente conscientização sobre os efeitos das aeronaves no nível do solo, ou pelo menos dentro da camada limite planetária (camada com altura típica de 1 km situada na baixa troposfera e que sofre diretamente a influência da superfície).

Mais precisamente, a partir da criação das aeronaves com turbinas na década de 1970, a preocupação com as emissões de poluentes atmosféricas em aeroportos aumentou significativamente (ICAO, 2011). Desde então, medidas de controle e políticas vêm sendo adotadas no mundo a fim de mitigar tal problema. A ICAO reconhece que as fontes de emissão de poluentes atmosféricos relacionadas a aeroportos contribuem com a degradação da qualidade do ar das comunidades vizinhas, além de possuir potencial de causar impactos de níveis regionais e globais. Apesar disso, como a maioria dos aeroportos estão localizados nas proximidades de grandes cidades, a contribuição das emissões relacionadas ao aeroporto é de difícil quantificação devido à grande influência de outras fontes de emissões próximas, tais como a indústria e tráfego intenso das regiões urbanizadas no entorno dos aeroportos (MASIOL & HARRISON, 2014).

De maneira geral, as emissões de aeronaves contêm dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), hidrocarbonetos (HC), compostos orgânicos voláteis (VOC) e partículas em suspensão ou material particulado (PM_{10, 2.5}) que tem levado a problemas de qualidade do ar ambientais tais como geração de ozônio na baixa troposfera, fumaça preta, chuva ácida e possivelmente até mesmo mudanças climáticas.

Desconsiderando os gases que simplesmente passam pelos motores, os gases emitidos pelas aeronaves são: CO₂, H₂O, NO_x, HCs, CO e SO_x. Os materiais particulados somam a lista, mas não como gases; os MPs são normalmente fuligem e partículas de sulfato. Essas emissões alteram a composição química da atmosfera, tanto diretamente como indiretamente, dando origem a uma variedade de impactos ambientais (DALEY, 2010) e prejudicando a saúde humana. Os efeitos à saúde humana são notáveis durante o pouso e a decolagem, nos quais as emissões alteram as concentrações locais de NO_x, O₃ e material particulado (MP).

Embora as aeronaves sejam apenas uma das várias fontes de emissão em aeroportos (ICAO, 2011) as plumas de exaustão dos motores principais e unidades de energia auxiliar (*auxiliary power unit* – APU) das aeronaves são convencionalmente consideradas responsáveis pela maioria das emissões em aeroportos, ainda que outras fontes que contribuem para a poluição do ar em escala local estejam presentes nos aeroportos modernos (MASIOL & HARRISON, 2014). As fontes de emissão específicas de aeroportos constam na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Fontes de emissões em aeroportos
Fonte: Adaptado de (Benito e Alonso 2018) e ICAO(2011)

Os motores principais possuem diferentes fatores de emissão de poluentes, de acordo com o modelo do equipamento e com as fases de voo, tais como espera, taxiamento, decolagem, aproximação e pouso. Estas operações acontecem no aeroporto e suas imediações até uma altura de 3.000 pés, e juntas formam o ciclo de pouso e decolagem (*Landing and take-off – LTO*). As emissões geradas durante o ciclo de pouso e decolagem são aquelas que são consideradas relacionadas aos aeroportos (ICAO, 2011). Na Figura 2.3 são ilustradas as fases do ciclo LTO.

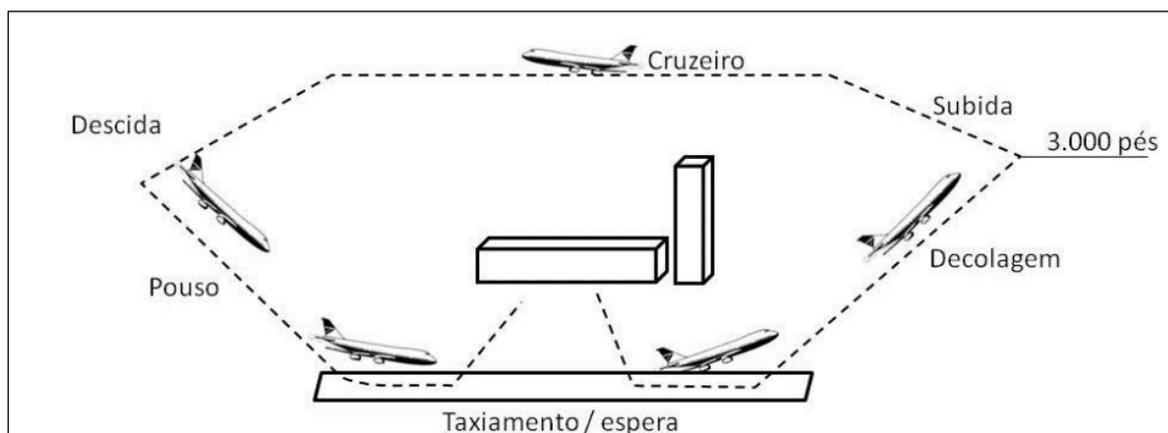


Figura 2.3: Fases do Ciclo LTO

Fonte: Adaptado de IPCC (2000)

A revisão da literatura realizada por Masiol e Harrison (2014) acerca das emissões de poluentes atmosféricos por aeronaves e fontes aeroportuárias reforçou que, no contexto da operação aeroportuária, embora as emissões do ciclo LTO sejam responsáveis pela maior parte do total de poluentes emitidos, existem outras fontes como as unidades de energia auxiliares, o tráfego de veículos, equipamentos de serviço em terra que podem afetar seriamente a qualidade do ar próximo aos aeroportos.

Com relação às emissões de gases de efeito estufa (GEE), notadamente CO₂, a literatura voltada ao gerenciamento e contabilização de GEE nos aeroportos considera os ciclos LTO como sendo emissões do escopo 3 (emissões indiretas) que não podem ser influenciadas por um operador aeroportuário, com exceção da fase de taxiamento, onde os aeroportos ainda podem aplicar procedimentos operacionais padronizados para reduzir as emissões de carbono, como, por exemplo, a introdução de taxiamento de aeronave com apenas um motor operando.

O estudo realizado por Somcharoenwattana *et. al.* (2011) analisou a performance energética e consequentes emissões de CO₂ do aeroporto de Suvarnabhumi na cidade de Bangkok na

Tailândia, após a introdução de uma usina de cogeração de 52,5 MW. O trabalho sugeriu que um edifício de terminal aeroportuário deve ser analisado por seu desempenho de uma perspectiva mais ampla e mostrou que a planta de cogeração proporcionou uma melhoria geral na eficiência de 48% para 61%, reduzindo em 24% o consumo de energia primária e alcançando uma redução de 27% nas emissões de CO₂, estimada em 129,271 tCO₂/ano.

Em consonância com o trabalho de Somcharoenwattana *et. al.* (2011) no sentido de analisar o terminal de passageiros sob um contexto mais amplo, Kilkış (2014) investigou uma abordagem de responsabilidade e compensação das emissões de CO₂ num cenário de construção de um terminal verde em um novo aeroporto planejado para a cidade de Istambul. Com uma capacidade anual de 150 milhões de passageiros, o terminal pode compensar a perda de potencial de sequestro de CO₂ pelo corte de pelo menos 657.000 árvores para o aeroporto. A análise da primeira e segunda leis da termodinâmica realizada pelos autores mostrou que a construção de um complexo de terminal verde pode não compensar sua responsabilidade de emissões de CO₂, a menos que uma atividade de reflorestamento muito intensiva seja implementada e o local onde será construído o novo aeroporto seja devidamente selecionado.

2.2.3 CONSUMO ENERGÉTICO EM AEROPORTOS

Para sua operação, os aeroportos precisam consumir grandes quantidades de recursos naturais, e o mais importante desses recursos é a energia, tanto na forma de energia elétrica quanto de combustíveis fósseis. Um fator chave para reduzir o consumo de energia nos aeroportos é entender o comportamento de uso e consumo de energia, devido aos múltiplos parâmetros e singularidades envolvidos e, portanto, os aeroportos são excelentes candidatos para pesquisas em energia (ALBA & MANANA, 2016). Entre essas fontes de energia, a eletricidade é a dominante em função do abastecimento das diversas unidades consumidoras dentro do aeroporto, além de garantir a segurança das operações de tráfego aéreo e seus sistemas.

Os dados da AENA (2015) referentes ao consumo de energia em 46 aeroportos espanhóis operados pela empresa reforçam tal afirmação, estando apresentados na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Consumo de energia por fonte em aeroportos espanhóis.

Fonte de Energia	Consumo de Energia 2012 (GJ)	Consumo de Energia 2013 (GJ)	Consumo de Energia 2014 (GJ)
Eletricidade	3,942,528	3,887,478	3,928,144
Combustíveis Fósseis	269,571	242,182	237,927

Fonte: Adaptado de AENA (2015)

A energia consumida pelos aeroportos pode ser amplamente dividida em energia consumida por suas atividades na área do lado ar e a parte consumida em suas atividades na área do lado terra, seguindo a divisão clássica operacional em aeroportos. No entanto, normalmente um aeroporto possui diversos subsistemas consumidores de energia, como, por exemplo, o pátio de aeronaves, estacionamento, torre de controle e, principalmente, o terminal de passageiros. Esses subsistemas dos lados ar e terra são demonstrados esquematicamente na Figura 2.4.



Figura 2.4: Esquema de subsistemas de aeroportos

Fonte: Adaptado de (Alba e Manana 2016)

A área do lado do ar do aeroporto inclui o combustível consumido pelas aeronaves durante os ciclos de LTO (pouso e decolagem) e a energia consumida pelos veículos terrestres que atendem às complexas operações no pátio de aeronaves. Na área do lado terra do aeroporto, os principais consumidores de energia são os sistemas/modos de acesso ao aeroporto via solo, os terminais de passageiros e carga e outros edifícios administrativos que servem ao aeroporto. Normalmente, os terminais de passageiros são grandes prédios equipados com sistemas de ar

condicionado e aquecedores, que demandam uma alta carga de energia elétrica, além dos sistemas de iluminação.

Na mesma linha, Janic (2010) afirma que no lado ar do aeroporto os requisitos de energia incluem o combustível que é consumido pelas aeronaves durante os ciclos de pouso e decolagem (LTO) bem como pelos veículos de apoio à aeronave em solo, em suas operações no pátio de aeronaves e pontes de embarque (gates). Já no lado terra, o autor afirma que os principais consumidores de energia são os sistemas e modais de acesso por solo aos aeroportos, bem como os terminais de passageiros e terminais de carga aérea, bem como outros edifícios administrativos que servem ao aeroporto. Em todos os casos, as fontes primárias de energia são de combustíveis fósseis não renováveis e, em grau moderado, de fontes renováveis eólicas, hídricas e solares.

Normalmente, nos aeroportos, a energia elétrica é obtida de diferentes fontes e disponibilizada diretamente por subestações, e é consumida principalmente para aquecimento, resfriamento, iluminação e operação do terminal de passageiros bem como em outros prédios administrativos no aeroporto (JANIC, 2010). Em estudo que investigou as estratégias e resultados das práticas de gestão ambiental em oito aeroportos regionais europeus, Dimitriou *et. al.* (2014) concluíram que o consumo de energia parece depender da localização dos aeroportos e do modelo de desenvolvimento, ou seja, onde existe um aeroporto desenvolvido com base em modelo de desenvolvimento sustentável e de carbono neutro, uma infraestrutura eficiente do ponto de vista da energia e o uso de energia renovável são algumas das medidas aplicadas (Aeroporto de East Midlands, na Inglaterra).

Segundo Benito e Alonso (2018), a maioria dos programas de eficiência energética desenvolvidos por aeroportos possuem três objetivos simultâneos: reduzir a conta de energia, reduzir o consumo de energia e reduzir sua pegada de carbono. Na maioria dos casos, as metas dos três estão alinhadas, mas, em outros, um aeroporto pode decidir incrementar seu uso de energia se uma fonte alternativa fornecer energia mais barata do que aquela que tiver a maior eficiência.

Nesse sentido, no Brasil, atualmente administradores aeroportuários tem buscado incentivos fiscais para a contratação de energia gerada por fontes renováveis, contratando duas demandas de energia elétrica diretamente no mercado privado (mercado livre), ou Ambiente de

Contratação Livre (ACL). Neste tipo de mercado, a energia gerada pode ser originada de fontes renováveis e, assim, auxiliar tanto na redução de custos com a conta de energia quanto na redução da pegada de carbono (Escopo 2) do aeroporto. Segundo Baxter (2018) no que tange às operações de equipamentos de solo no do lado ar, a energia para as aeronaves pode ser fornecida por fontes terrestres móveis ou através de instalações fixas no pátio do aeroporto (SEF), sendo esta última a preferível, pois elimina a necessidade de um veículo e, em certa medida, reduz as emissões e o ruído proveniente de um motor à diesel (GPU).

O GPU (*Ground Power Unit*) é um gerador móvel terrestre movido a diesel, e serve para fornecer energia elétrica para as aeronaves em 400Hz durante sua permanência em solo. Geralmente são utilizados ou quando a aeronave não possui ou quando o seu APU está inoperante. Em alguns casos o GPU é utilizado visando economia de combustível. Portanto, para mitigar as emissões de ruído e de poluentes atmosféricos pelo uso de APU e GPU no contexto de um aeroporto, um sistema alternativo, denominado de Sistema de Energia Fixo – SEF (fornecimento de energia elétrica e ar condicionado) é uma eficaz medida operacional que além da possibilidade de aumento de receita pela cobrança de tarifa de uso do sistema pelo operador aeroportuário às cias aéreas, pode reduzir significativamente o nível de emissões no pátio de aeronaves.

Como exemplo, no Aeroporto de Copenhague as companhias aéreas só estão autorizadas a usar a unidade de energia auxiliar da aeronave (APU) 5 minutos depois que a aeronave estiver “estacionada” no portão ou 5 min antes da hora estimada da partida (BAXTER, 2018) e, assim como muitos outros aeroportos ao redor do mundo, o Aeroporto de Copenhague fornece sistemas SEF para alimentar aeronaves durante o seu período em solo.

Atualmente, uma das principais medidas de eficiência energética em aeroportos se relaciona a geração direta nos aeroportos através de fontes alternativas: a energia solar fotovoltaica. Painéis de geração de energia solar fotovoltaica estão cada vez mais sendo utilizados em aeroportos no mundo em função da sua localização ideal para a instalação desse tipo de fontes de energia, pois os terminais de aeroportos geralmente são estruturas horizontais de grande porte, isoladas e sem sombreamento (RUTHER & BRAUN, 2009).

No caso da energia solar, padrões de demanda de energia nos aeroportos em regiões ensolaradas e quentes correlacionam-se bem com os perfis de geração solar durante a manhã. No entanto, o

principal problema, conforme Braun *et. al.* (2007) é o desajuste entre a produção de energia fotovoltaica e o consumo de eletricidade nas horas do período noturno, sendo necessário o armazenamento de energia. O trabalho de Khan *et. al.* (2014) considerou a demanda de eletricidade e a quantidade de redução de CO₂ do Aeroporto Internacional Sulymaniah no Curdistão, no Iraque. No estudo foi utilizado o valor de 0.105kg CO₂/KWh como fator de emissão de CO₂ por geração de energia solar fotovoltaica, e a planta solar proposta tem capacidade para gerar cerca de 7,3% da demanda anual do aeroporto e reduzir o dióxido de carbono em 0,55 milhões de quilos por ano. Considerando um período da vida útil média de 20 anos de um sistema solar fotovoltaico, há margem para evitar as emissões de CO₂ na ordem de 11 milhões de quilogramas, o que geraria um grande benefício ambiental de longo prazo para o aeroporto (KHAN *et. al.*, 2014).

2.3 EFICIÊNCIA NO CONTEXTO AEROPORTUÁRIO

Este tópico abordará os conceitos básicos de eficiência, os métodos de avaliação de eficiência mais utilizados e, dentre eles, o método escolhido para o presente trabalho, a Análise de Envoltória de Dados – DEA. Por fim, trará um panorama dos principais estudos com uso da técnica aplicada a aeroportos em suas diversas abordagens, mostrando os poucos estudos que abordaram variáveis ambientais em aeroportos.

2.3.1 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE EFICIÊNCIA

Para se avaliar o desempenho de uma organização é fundamental o conhecimento conceitos de produtividade e eficiência. Segundo Farrel (1957), a produtividade pode ser medida pela razão entre a quantidade gerada de um produto desejado (output) pela quantidade consumida de um determinado insumo alocado (input) a um sistema de produção. O autor sugere que a medida da eficiência deve ser resultado da comparação de dados reais das unidades de negócio em análise, desde que o modelo contemple somente as unidades que utilizam os mesmos insumos e produtos e que praticam tarefas semelhantes.

Em maior detalhe, a eficiência pode ser definida por meio da medida de avaliação de desempenho dos processos executados em uma unidade, admitindo, portanto, gradações à medida que as unidades poderão ser mais ou menos eficientes. De acordo com Lovell (1993), a eficiência de uma unidade de produção é resultado direto da comparação entre os valores observados e os valores ótimos ideais em suas relações insumo-produto.

Entretanto, Farrel (1957) afirma que é preferível determinar a medida de eficiência de uma unidade produtiva com relação ao melhor nível real de eficiência observado, ao invés de compará-la a algum nível ideal inatingível. Segundo o autor, a medida da eficiência deve ser resultado da comparação de dados reais das unidades de negócio em análise, desde que o modelo contemple somente as unidades que utilizam os mesmos insumos e produtos e que praticam tarefas semelhantes.

Para exemplificar as diferenças entre eficiência e produtividade (que muitas vezes são confundidos) a Figura 2.5 ilustra as diferenças entre os conceitos básicos de produtividade e eficiência, a qual será objeto de análise neste trabalho. O eixo x representa os insumos (inputs) e o eixo y, os produtos (outputs). Os pontos A, B e C se referem a três diferentes unidades de negócio as quais se pretende avaliar. Como pode ser observado na Figura 2.5, a produtividade do ponto A pode ser medida pela razão AD/OD . Para certo nível de insumos, fica evidenciado que a produtividade pode ser elevada ao se mover do ponto A para o ponto B e, assim, o novo nível de produtividade será expresso pela razão BD/OD (mudança de produtividade).

Com relação à eficiência, no ponto A ela pode ser mensurada pela razão entre a produtividade nos pontos A e B, expressa por razão $(AD/OD)/(BD/OD)$. Tradicionalmente, na literatura, esta razão é definida como a eficiência técnica (ET).

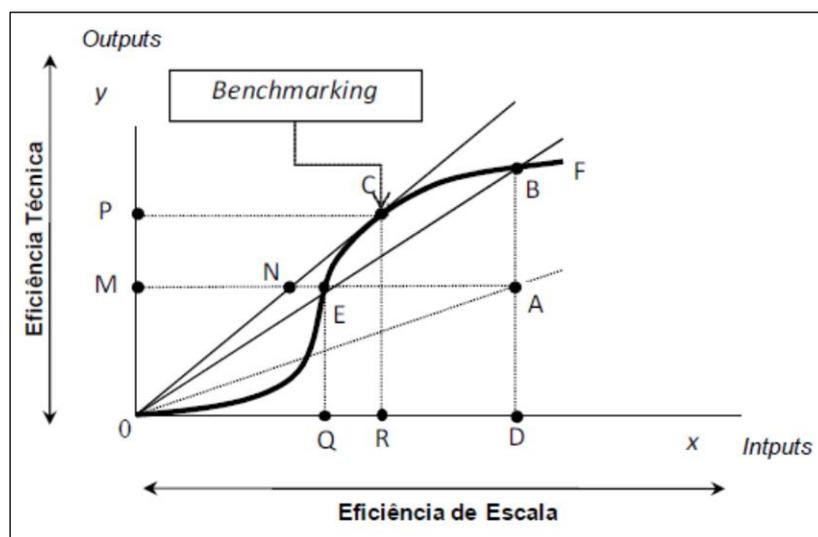


Figura 2.5: Representação gráfica de Eficiência e Produtividade.
Fonte: Adaptado de Coelli et al. (1998)

A eficiência técnica é, portanto, a medida entre as razões de produtividades observadas (de duas ou demais unidades de negócio) e pode ser analisada sob duas formas. Na primeira, a eficiência técnica indica a habilidade em produzir um máximo nível de produto (*output*) para um dado nível de insumo (*input*) através do incremento em tecnologia (WANG *et. al.*, 2002). Esta situação pode ser observada na Figura 2.5 ao se considerar a projeção do ponto A para o B. Nesse caso, é dito que o modelo é orientado ao produto (*output*). Na segunda, a eficiência técnica pode também indicar a habilidade em reduzir ao mínimo nível de insumo (*input*) dado um determinado nível de produto (*output*). Na Figura 2.5, tal situação pode ser observada na projeção do ponto A para o ponto E.

A curva OF representa a fronteira de eficiência, que reflete o atual estado da tecnologia usada no setor em análise e todos os pontos localizados nesta curva são considerados como tecnicamente eficientes. Em complemento, a linha OC que tangencia a fronteira de produção define o ponto de máxima produtividade observado no setor (ponto C) que é definida como unidade benchmark para as outras unidades.

Além da eficiência técnica, a literatura define a eficiência alocativa (EA), que envolve também os preços dos insumos e produtos e reflete a habilidade da unidade produtiva de definir a combinação dos insumos e dos produtos que, respectivamente, minimiza custos e maximiza receitas. Estes dois conceitos de eficiência (técnica e alocativa) deram origem à eficiência econômica, representada pela a máxima redução possível de inputs para uma determinada quantidade de outputs ou a expansão máxima de outputs para um determinado nível de inputs (MARQUES & SIMÕES, 2009).

Ambas eficiências (ET e EA) podem, ainda, serem decompostas em dois tipos: i) as orientadas à redução dos insumos com o mesmo nível de produção (orientação a *input*) e ii) orientadas ao aumento dos produtos com um fixo consumo de insumos (orientação a *output*). A eficiência técnica bem como suas orientações a insumos (*inputs*) e produtos (*outputs*) serão escopo desta pesquisa e seus conceitos serão desenvolvidos a seguir.

2.3.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA

Com relação ao setor aeroportuário, considerando que, via de regra, os modelos de avaliação de eficiência utilizados trazem múltiplos *inputs* e *outputs*, a utilização de procedimentos simples de mensuração de desempenho (tais como a análise gráfica e os indicadores de desempenho ou

KPIs, do inglês, *Key Performance Indicator*) fica prejudicada. Dessa forma, diferentes técnicas de mensuração mais elaboradas vêm sendo gradualmente desenvolvidas e testadas, divididas basicamente em dois grandes grupos: modelos paramétricos e não paramétricos, com diversas vantagens e desvantagens associadas a cada um deles. Enquanto os primeiros permitem a medição dos erros, os últimos, tal qual a DEA, permitem estabelecer metas de eficiência para as unidades em estudo, sendo, portanto, bastante utilizada na literatura para análises de *benchmarking* e para situações em que as unidades são caracterizadas por um conjunto de *inputs* e *outputs*.

- Técnicas consideradas paramétricas são caracterizadas pela definição do problema a priori, exceto por um conjunto finito de parâmetros desconhecidos que são estimados da amostra (BOGETOFT & OTTO, 2010). Os parâmetros adotados no modelo podem, por exemplo, fazer referência ao tipo curva de distribuição de eficiência. Neste grupo, destaca-se a Análise Estocástica de Fronteira (SFA – do inglês, *Stochastic Frontier Analysis*), cuja origem reside na teoria econométrica;

- Técnicas consideradas não paramétricas são muito menos restritivas, uma vez que são caracterizadas pela não obrigatoriedade do conhecimento da forma do problema a priori (BOGETOFT & OTTO, 2010). Neste grupo, destaca-se a Análise Envoltória de Dados (DEA – do inglês, *Data Envelopment Analysis*), cuja origem está relacionada com a programação matemática.

Ambos os métodos possuem vantagens e desvantagens, como, por exemplo, a flexibilidade de utilização dos dados disponíveis (para o caso da DEA) e a possibilidade do tratamento do erro estatístico (para o caso do SFA). No caso da técnica DEA, citam-se entre suas principais vantagens:

- (i) Não requer um peso, a priori, sobre os *inputs* e *outputs*;
- (ii) Não requer, a priori, uma função de produção explícita para a ponderação de *inputs* e *outputs*;
- (iii) Avalia a possibilidade de diferentes combinações de *inputs* e *outputs*;
- (iv) Utiliza o conceito de fronteira eficiente como uma medida para avaliação de desempenho;
- (v) Determina, para cada unidade ineficiente, subgrupos de unidades eficientes, os quais formam seu conjunto de referência (alvos para alcance da eficiência);

- (vi) Capacidade de avaliar múltiplos *inputs* e *outputs* para calcular a medida de desempenho.

Ante ao exposto, entendeu-se que a DEA é a abordagem mais apropriada para a avaliação da eficiência de aeroportos sob a dimensão ambiental que este trabalho pretende avaliar, a saber: consumo energético e emissões atmosféricas. A escolha da abordagem DEA se justifica, principalmente, por considerar simultaneamente todas as variáveis relacionadas ao processo, e por não avaliar a eficiência segundo uma média hipotética, mas sim conforme o(s) melhor(es) desempenho(s) do conjunto de aeroportos investigados, além de avaliar objetivamente a eficiência, segundo a lógica matemática que a fundamenta. Segundo Ozbek *et. al.* (2009), que fortalece a presente escolha, a técnica DEA é uma poderosa ferramenta para tomada de decisão que pode ser utilizada por profissionais de transportes e gestores no esforço de avaliar e, conseqüentemente, melhorar a eficiência de processos, seja quanto à construção, manutenção, operação, trânsito ou outro serviço relacionado ao transporte.

2.3.3 ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS - DEA

Desenvolvida por Charnes *et. al.* (1978) e mais tarde expandida por Banker *et. al.* (1984), a Análise Envoltória de Dados, do inglês *Data Envelopment Analysis* (DEA), é uma técnica não paramétrica utilizada para calcular a eficiência relativa de um grupo de unidades, as quais comumente são denominadas DMU (do inglês *Decision Making Units*) uma vez que as mesmas transformam insumos (*inputs*) em produtos (*outputs*). Em outras palavras, dado um conjunto de DMUs e de *inputs* e *outputs*, a DEA é capaz de determinar a eficiência relativa para cada DMU sendo a razão entre os valores ponderados de *inputs* e *outputs*, construindo, assim, uma fronteira de eficiência (WANKE, 2012).

A técnica DEA é um método quantitativo não paramétrico, pois não exige a escolha de uma função matemática e determinação dos pesos de cada variável. Além disso, possibilita a utilização de mais de uma variável como output (NOVAES, 2007). Assim, enquanto as técnicas estatísticas típicas para mensuração de eficiência avaliam os produtores em relação a um produtor médio, a técnica de DEA é um método de pontos extremos e compara cada produtor apenas com o melhor produtor de um determinado grupo (COOPER *et. al.*, 2007).

Assim, o objetivo principal da DEA é comparar a eficiência de DMUs relativamente homogêneas, ou seja, que realizam tarefas similares – que se diferenciam apenas nas

quantidades (mas não nas qualidades) de *inputs* utilizados e *outputs* gerados (MELLO *et. al.*, 2005).

Em comparação com a regressão linear, a técnica DEA diferencia-se por refletir o desempenho das DMUs mais eficientes ao invés de refletir a média de toda a amostra, estimando o desempenho das outras DMUs em relação à melhor delas (COOPER *et al.*, 2007). Assim, a DEA é uma técnica direcionada à estimação de fronteiras em vez de tendências centrais, focada na comparação direta entre unidades produtivas e seus pares de unidades consideradas *benchmarks*. Uma das grandes vantagens e que gera atratividade de diversos pesquisadores para uso da técnica DEA é a possibilidade de geração de um índice de desempenho único a partir da razão ponderada entre *inputs* e *outputs*, ou insumos e produtos, estabelecendo, assim, uma fronteira de máximo desempenho entre as unidades produtivas em análise. Nesta fronteira, estão posicionadas as melhores unidades (eficientes) e, para cada DMU abaixo da fronteira (ineficiente), o modelo DEA identifica subgrupos de unidades de referência posicionadas na fronteira para calcular a diminuição de insumos ou aumento dos produtos necessários para otimizar a alocação.

A Figura 2.6 ilustra a representação gráfica da fronteira de eficiência relativa. Nota-se que a fronteira é formada pela curva que estabelece a ligação entre as empresas eficientes, representadas pelas empresas A, B, C, D e E. Por um lado, as demais empresas situadas abaixo da curva da fronteira de eficiência são não consideradas eficientes. Um exemplo é a empresa representada pelo ponto F, que embora esteja próxima da fronteira é considerada uma empresa ineficiente. Dessa forma, o ponto representado por F' consiste na projeção virtual da empresa F na fronteira e está situado entre as empresas eficientes C e D, as quais servirão de referência para F caso esta procure melhorar sua relação input/output e, por conseguinte, se aproximar da fronteira de eficiência.

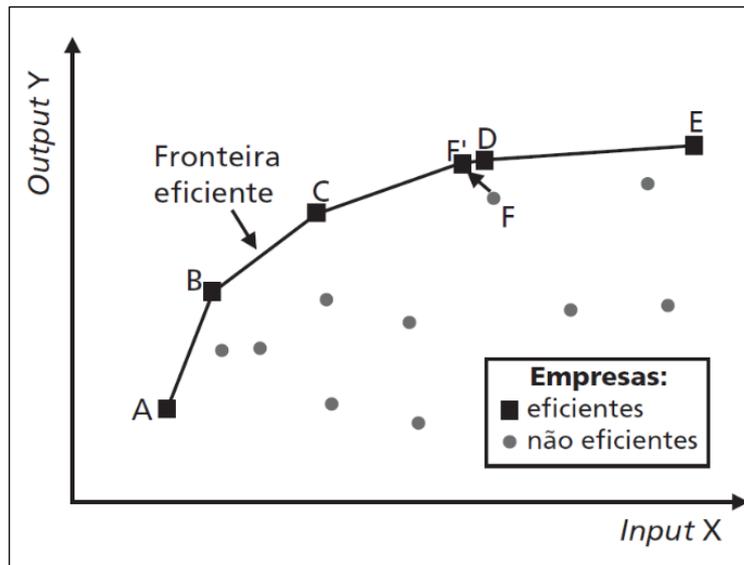


Figura 2.6: Representação de Fronteira de eficiência usando DEA.
Fonte: Novaes (2007)

Tradicionalmente, os modelos DEA podem ser subdivididos em duas categorias em função de seus retornos de escala. Inicialmente, Charnes *et. al.*, (1978) propuseram a medição da eficiência da DMU para retornos constantes de escala (CRS – *Constant Returns to Scale*), onde todas as DMUs estão operando em sua escala ótima, gerando o modelo conhecido como CCR (devido aos sobrenomes dos autores, Charles, Cooper e Rhodes). Em seguida, Banker *et. al.*, (1984) introduziram as variáveis de retornos de escala (VRS – *Variable Returns to Scale*) permitindo a segregação de eficiência na eficiência técnica e de escala, conhecido como BCC devido ao sobrenome dos seus desenvolvedores: Banker, Charnes e Cooper.

O modelo CCR avalia a eficiência total, identifica as DMUs eficientes e ineficientes e, determina a que distância da fronteira de eficiência estão as unidades ineficientes. Este modelo se refere a uma propriedade técnica de produção que analisa as mudanças nos outputs proporcionais às mudanças nos inputs (FALLAHI *et. al.*, 2011), sendo apropriado para avaliar modelos que operam numa mesma escala de produção. Em termos algébricos o modelo CCR é representado pela Equação 2.1.

$$Max E_{j_0} = \frac{\sum_{r=1}^n u_r \cdot y_{rj_0}}{\sum_{i=1}^n v_i \cdot x_{ij_0}} \quad (2.1)$$

sujeito a

$$\frac{\sum_{r=1}^n u_r \cdot y_{rj}}{\sum_{i=1}^n v_i \cdot x_{ij}} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n$$

$$u_r \geq 0 \quad r = 1, \dots, s$$

$$v_i \geq 0 \quad i = 1, \dots, m$$

Em que:

Y_{rj_0} = quantidade do *output* r produzido pela unidade em avaliação j_0 ;

u_r = peso atribuído para o *output* r;

x_{ij_0} = quantidade do *input* i;

v_i = peso atribuído para o *input* i produzido pela unidade em avaliação j_0 ; e

E = 1 significa eficiência ou desempenho ótimo.

Já o modelo BCC (retornos variáveis de escala) foi formulado a fim de estimar a eficiência técnica pura, eliminando a influência da ineficiência de escala, ou seja, o impacto que pode ter o porte inadequado das unidades na avaliação da eficiência, permitindo uma comparação direta entre unidades pequenas e grandes com as grandes. Portanto, esse modelo permite identificar DMUs eficientes e ineficientes e determinar a distância em que as DMUs ineficientes estão da fronteira de eficiência. O modelo BCC orientado ao *input* (Equação 2.2) é formulado considerando N empresas que produzem m quantidades de produtos y a partir de n quantidades de insumos x. Assim, uma empresa k produz y_{rk} quantidades de produtos utilizando x_{ik} quantidades de insumos.

$$Max \sum_{r=1}^m u_r y_{rk} - u_k$$

Sujeito a: (2.2)

$$\sum_{i=1}^n v_i x_{ik} = 1$$

$$\sum_{r=1}^m u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - u_k \leq 0$$

$$u_r, v_i \geq 0$$

Sendo: y=produtos; x=insumos; u, v=pesos

$r=1, \dots, m; i=1, \dots, n; j=1, \dots, N$

Nesse modelo BCC, a variável u_k foi introduzida visando representar justamente o que a diferencia do modelo CCR, os retornos variáveis de escala, podendo ter valores positivos ou negativos. No que se refere a orientação a *output* a Equação 2.3 demonstra a formulação do modelo BCC.

$$\text{Min } \sum_{i=1}^m v_i x_{ki} - v_k$$

Sujeito a: (2.3)

$$\sum_{i=1}^n v_i x_{ik} = 1$$

$$\sum_{r=1}^m u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} - v_k \leq 0$$

$$u_r, v_i \geq 0$$

Sendo: y =produtos; x =insumos; u, v =pesos
 $r=1, \dots, m; i=1, \dots, n; j=1, \dots, N$

Nesta orientação, a exemplo da anterior, o termo v_k representa os retornos variáveis de escala, podendo assumir valores positivos ou negativos. Portanto, o objetivo do modelo BCC é desenvolver um procedimento para a medida de eficiência que leve em conta as diferenças de escala e que possa classificar uma DMU como eficiente mesmo que esta não esteja operando na escala mais eficiente (BANKER *et. al.*, 1984). As fronteiras de ambos os modelos CCR e BCC (orientados a *input*) podem ser representadas conforme Figura 2.7.

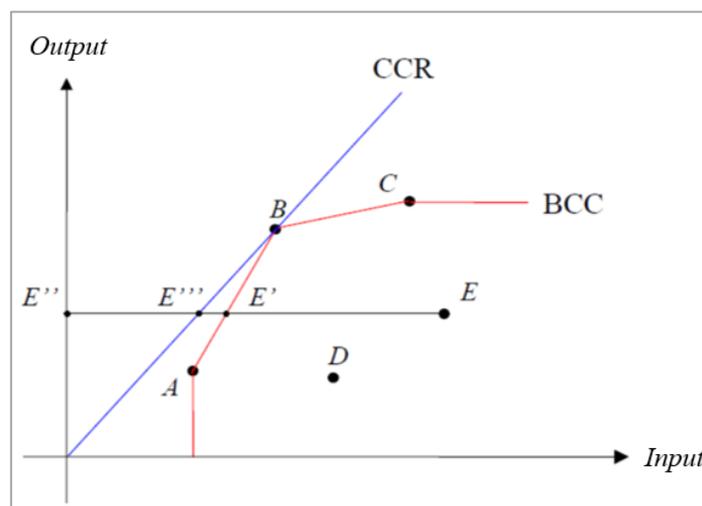


Figura 2.7: Fronteiras de eficiência dos modelos CCR e BCC.
 Fonte: Adaptado de Soares de Mello *et. al.* (2005).

A abordagem DEA tem a vantagem de considerar simultaneamente múltiplos insumos e, com relação às saídas da unidade em análise (*outputs*), pode considerar tanto as saídas desejáveis (passageiros processados, aeronaves movimentadas) quanto as indesejáveis (emissão de ruído, poluentes atmosféricos, atrasos). Nesse sentido, os modelos CCR e BCC modelam os impactos ambientais indesejáveis ora como *inputs* a minimizar, ora como variáveis *outputs* com valores invertidos ou negativos a maximizar, usando as medidas radiais orientadas de Farrel (ZHOU *et. al.*, 2008). No entanto, essas abordagens tem uma importante limitação: não contemplam as possíveis projeções não radiais que permitem medir o desempenho ambiental de unidades produtivas em termos de capacidade de expansão da produção e de redução simultânea dos insumos (*inputs*) e dos produtos (*outputs*) indesejados. Para contornar esse problema, foram propostas algumas soluções, que serão discutidas mais adiante, pelo item 2.3.5.

2.3.4 APLICAÇÃO DE DEA PARA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA EM AEROPORTOS

Na literatura, diversos são os estudos publicados sobre eficiência e produtividade no setor aeroportuário. Tais estudos envolvem várias técnicas de mensuração tais como: modelos básicos de DEA, baseados em folgas (SBM - *Slack Based Measure*), modelos DEA em duas etapas, modelos comparativos, dentre outros, avaliados sob diversas abordagens e variáveis (eficiência operacional, financeira, de segurança, de qualidade dos serviços, dentre outras). Logo, a literatura acerca de uso da técnica DEA em avaliações de eficiência em aeroportos pode ser historicamente segregada em três fases distintas, conforme também indicam Bezerra e Gomes (2016) e Cavaignac e Petiot (2016). A Tabela 2.7 apresenta um resumo contendo os períodos, descrição e características marcantes de cada uma das fases.

Tabela 2.7: Panorama histórico de estudos de eficiência de aeroportos.

	<i>Primeira Fase</i>	<i>Segunda Fase</i>	<i>Terceira Fase</i>
Período	Anos 70 e 80	Anos 90 até início dos anos 2000	Início dos anos 2000 - momento presente
Modelo de operação de aeroportos (modelo de gestão)	Aeroportos como instalações públicas/Predominantemente como propriedades do Governo/Poucas pressões comerciais do setor/Primeiras experiências com desregulamentação e privatização	Tendências para tornar os aeroportos financeiramente autossuficientes/ Privatizações/Desregulamentação	Aeroportos como um negócio complexo, fornecendo uma variedade de serviços para diferentes clientes e interessados
Tópicos abordados nas análises de eficiência	Ênfase nos aspectos operacionais e financeiros/Preocupações com a eficiência e qualidade do serviço	Benchmarking de aeroportos / Métodos mais sofisticados/Desempenho de aspectos ambientais e sociais / Concorrência/Revisão de literatura	Avaliação comparativa entre aeroportos / Efeitos de fatores internos e externos na eficiência / Responsabilidade Social Corporativa / Modelos de simulação para níveis de serviço/ Abordagem orientada ao mercado
Exemplo de estudos (temas e autores)	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência operacional e financeira (Doganis and Graham, 1987; Doganis and Nuutinen, 1983; Doganis and Thompson, 1974; Doganis et al., 1978; Keeler, 1970; Whitbread, 1971. 	<ul style="list-style-type: none"> • Questões ambientais (ruído e resíduos) e sociais associadas às atividades aeroportuárias (Ignaccolo, 2000; Inamete, 1993; Morrell e Lu, 2000; Pitt e Smith, 2003); • Avaliação do nível de serviço (Brunetta et al., 1999; Ignaccolo, 2003;Hackett e Foxall, 1997; Lemer, 1992; Suzuki et al., 2010 e Yu, 2010) Muller e Gosling, 1991; Mumayiz, 1991; Seneviratne e Martel, 1991, 1994); • Aspectos da competição dentro da indústria aeroportuária (Park, 1997, 2003; Pathomsiri e Haghani, 2004); • Considerações sobre a multidimensionalidade do desempenho aeroportuário e a relevância das partes interessadas no aeroporto (Francis et al., 2002; Humphreys et al., 2002; Janic, 2003). 	<ul style="list-style-type: none"> • Sofisticação dos métodos de avaliação do desempenho / eficiência aeroportuária (Abrate e Erbetta, 2010; Assaf, 2011a; Assaf et al. 2014; Barros e Dieke, 2008; Barros, 2009; Jessop 2009; Lai et al.,2015; Martín e Román, 2006; Martín et al.,2009; e Yu, 2010) • Os efeitos de diferentes variáveis internas e externas sobre a eficiência aeroportuária (incluindo tamanho e características dos aeroportos, fatores gerenciais, formas de propriedade / governança, aspectos regulatórios, desaceleração econômica, resultados indesejados, etc.) (Adler and Liebert,2014; Chi-Lok e Zhang, 2009; Fan et al.,2014; Martín et al.,2013; Merkert e Mangia, 2014; Oum et al., 2006; Pathomsiri et al.,2008; Voltes-Dorta e Pagliarib, 2012; e Yu et al.,2008)

Fonte: Adaptado de Bezerra e Gomes (2016) e Cavaignac e Petiot (2016).

Uma das primeiras aplicações da metodologia DEA para medir a eficiência no sector dos aeroportos foi realizada por Gillen e Lall (1997), em estudo que avaliou a eficiência de 21 dos maiores aeroportos nos EUA entre 1989 e 1993, segregando os aeroportos por serviços de terminal e de atividades aéreas. O estudo abordou os “serviços de terminal” como um modelo BCC e as “atividades aéreas” de acordo com um modelo CCR, ambos definidos para uma orientação a output além da regressão Tobit. Os *inputs* e *outputs* usados em cada um dos serviços são apresentados no Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Variáveis input e output referentes às atividades aéreas e serviços de terminal dos aeroportos norte-americanos.

<i>Artigo</i>	<i>Inputs</i>	<i>Outputs</i>
Gillen e Lall, 1997	Operações do terminal: -Número de pistas -Número de portões de embarque/desembarque -Área terminal (m ²) -Número de empregados -Número de esteiras de coleta de bagagem -Número de lugares de estacionamento públicos	Operações do terminal: -Número de passageiros -Carga (libras)
	Operações no lado ar: -Área do aeroporto -Número de pistas -Número de empregados Pista de decolagem	Operações no lado ar: -Número de movimentos aéreos -Número de movimentos aéreos pendulares

Fonte: Adaptado de Gillen e Lall (1997).

O estudo mostrou que a maior eficiência das operações do terminal está positivamente correlacionada com o fato de um aeroporto ser considerado um *hub* e negativamente com a proporção de passageiros internacionais. Além disso, foi verificado que uma maior eficiência das operações no lado ar está positivamente correlacionada com a proporção de movimentos da aviação geral e com a capacidade de expansão de portões de embarque.

Parker (1999) analisou o efeito que a privatização teve sobre o nível de eficiência de 22 aeroportos britânicos, utilizando dados de séries temporais de 1988 a 1997 e modelo DEA orientado a *input*. No estudo, foram usadas como variáveis de entrada dos aeroportos: o número de funcionários, o capital social e outros custos operacionais. O estudo concluiu que a

privatização não teve nenhum impacto perceptível na eficiência técnica dos aeroportos britânicos.

O início da década de 2000 foi marcada por um aumento na utilização da técnica de DEA no setor aéreo, com foco nos resultados de eficiência dos modelos básicos (CRS/CCR e VRS/BCC). Com foco na análise da eficiência operacional, Sarkis (2000) buscou determinar as características que podem afetar a eficiência operacional e a eficiência do aeroporto ao longo do tempo. No estudo foram considerados 44 aeroportos norte-americanos no período de 1990-1994, com aplicação de diversos modelos de DEA. O autor concluiu que as eficiências dos principais aeroportos dos EUA vêm aumentando ao longo do tempo, e que aeroportos tidos como hubs são mais eficientes. Em complemento, concluiu que sistemas de múltiplos aeroportos não são mais eficientes do que os sistemas aeroportuários únicos e que aqueles aeroportos que se localizam em áreas com cinturões de neve (regiões com mais de 10 polegadas de neve por ano) são menos eficientes.

Com foco na caracterização do tipo de retorno de escala (crescente ou decrescente) de cada unidade (aeroporto) o estudo realizado por Pels *et. al.* (2001) envolveu 34 aeroportos europeus durante o período de 1995 a 1997, fazendo divisão entre a eficiência nos terminais e eficiência nas atividades aéreas. O objetivo foi determinar a eficiência dos aeroportos através da DEA, além de calcular a dimensão ótima dos aeroportos (*most productive scale size*). A exemplo da maior parte de aplicações de DEA em aeroportos, o estudo considerou como outputs duas medidas: movimentos de transporte aéreo e de passageiros. Os autores concluíram que a maior parte dos aeroportos estava operando em regime crescente de retornos de escala, ou seja, operam de maneira eficiente. No entanto, conforme afirma Yu (2004) o estudo de Pels *et. al.* (2001) não considerou os outputs indesejáveis, o que é uma fraqueza de muitos estudos de DEA.

Com o objetivo de mostrar se os aeroportos são capazes de operar eficientemente usando a capacidade atual e se as economias de escala podem ser observadas Pels *et. al.* (2003) avaliaram 33 aeroportos europeus entre 1995-1997 utilizando DEA orientado a input combinado com modelos de fronteira estocástica (SFA). Os autores concluíram que o aeroporto europeu médio opera em retornos de escala constantes ao gerar transporte aéreo e sob retorno de escala crescente ao transportar passageiros.

Com foco em aeroportos regionais, Yoshida e Fujimoto (2004) avaliaram a eficiência de 67 aeroportos regionais japoneses no ano 2000, utilizando ambos modelos CCR e BCC orientados

a input, concluindo que os pequenos aeroportos regionais parecem ser menos eficientes devido a pressões políticas e que aeroportos com terminais maiores e menos usuários têm menores pontuações nos *scores* de eficiência. No estudo, os autores utilizaram 4 *inputs* e 3 *outputs* abrangendo o lado de terra e o lado ar dos aeroportos.

Barros (2008) desenvolveu estudo considerando diversos aeroportos argentinos no contexto da grave crise econômica mundial, durante a qual o tráfego aéreo apresentou queda de 50%. O estudo foi dividido em duas fases: na primeira, aplicou a metodologia DEA para analisar a eficiência de 32 aeroportos argentinos entre os anos de 2003 a 2007. Já na segunda fase, foi realizada uma nova avaliação utilizando o procedimento de *Simar and Wilson* para aferir quais os principais fatores que afetavam a eficiência. Em relação aos modelos adotados para o desenvolvimento deste estudo, destacam-se a orientação *output* segundo os modelos CRS e VRS. Uma das conclusões do estudo foi a de que, ao longo dos anos, não houve uma gestão uniforme dos aeroportos em função de terem registrado muitas alterações em suas eficiências técnicas. Malighetti *et. al.* (2007) avaliaram a eficiência de 34 aeroportos italianos utilizando o modelo do DEA. Dentre os resultados, o estudo apontou que os grandes aeroportos são mais eficientes que os domésticos e regionais, seguindo os resultados de estudos anteriores.

Em complemento à utilização dos modelos clássicos e com relação aos modelos de DEA e uma etapa, ressalta-se a crescente tendência da análise das folgas (*slacks*) através da técnica de SBM (*Slack Based Measure*) na aplicação em aeroportos. Esta técnica foi utilizada por Lam *et. al.* (2009) em conjunto com eficiência alocativa para estudar a eficiência de 11 aeroportos internacionais localizados na Ásia para o período entre 2000 e 2001. Segundo os autores, através deste modelo foi possível estudar de maneira mais eficiente os efeitos externos macroeconômicos sobre o desempenho das unidades, além de identificar eventuais diferenças de eficiência de custo nos aeroportos pesquisados. Na mesma linha, Yu (2010) desenvolveu um novo modelo com base no *Slack Based Measure Network* DEA (SBM-NDEA) para estimar a eficiência operacional de 15 aeroportos localizados em Taiwan para o ano de 2006. Neste estudo, o autor aponta a eficácia do modelo para identificar eventuais excessos de *inputs* e restrições nas variáveis de saída do modelo (*outputs*).

No que se refere a estudos com foco em aeroportos do Brasil, Fernandes e Pacheco (2002) realizaram um dos primeiros estudos com enfoque nos aeroportos brasileiros. Nele, os autores analisaram a capacidade de 35 aeroportos brasileiros em relação ao número de passageiros processados no ano de 1998, frente a indicações, à época, de que no curto prazo os aeroportos

brasileiros mais movimentados poderiam sofrer restrições de capacidade ao se considerar as projeções de demanda da época. As análises das pontuações de eficiência dos aeroportos indicaram, conforme previsto, que seria necessário expandir as suas instalações operacionais para que se mantivessem os níveis de serviço no curto prazo. Ainda na década de 2000, o estudo de Pacheco *et. al.* (2006) investigou o impacto de mudanças no estilo gerencial de 58 aeroportos brasileiros no período entre 1998 e 2001 utilizando um modelo bidimensional que leva em consideração a eficiência operacional e a financeira.

O trabalho de Souza *et. al.* (2009) avaliou a eficiência dos aeroportos brasileiros com foco na comparação a nível global dos escores de eficiência encontrados para uma amostra de 138 aeroportos de diversas partes do mundo, com dados referentes ao ano de 2005. Baseando-se nos resultados por meio de DEA, o estudo mostrou que os aeroportos do Brasil apresentaram os menores níveis de eficiência da amostra, enquanto Ásia e Europa se destacaram positivamente. Outro apontamento do estudo foi de que a maioria dos aeroportos avaliados foram classificados como regime decrescente de retorno de escala.

Mais recentemente, destaca-se o estudo de Wanke (2012), que utilizou diversas abordagens de DEA para estudar a eficiência de 63 aeroportos brasileiros em 2009, incluindo a técnica de *bootstrap* proposta por Simar e Wilson (2004), que serviu para refinar os erros inerentes aos scores iniciais do DEA. Essa técnica é capaz de testar, entre outras coisas, a presença de ineficiência de escala e folgas de entrada e saída do modelo, além de determinar a natureza dos retornos a escala nos diferentes aeroportos brasileiros. Os resultados confirmaram evidências empíricas do autor de que os aeroportos brasileiros poderiam sofrer uma restrição de capacidade no curto prazo e que, independentemente do tipo e localização do aeroporto, a infraestrutura dos mesmos estava saturada.

O estudo foi complementado por Wanke (2013) que utilizou a técnica DEA de dois estágios e de redes (*network*) aplicado aos aeroportos brasileiros. Neste modelo particular de DEA, a eficiência é medida num processo que envolve 2 estágios: o primeiro estágio usa os seus *inputs* para gerar medidas intermédias, as quais são usadas como *inputs* no segundo estágio para produzir os *outputs* do processo. A primeira etapa focou na obtenção de escores da eficiência operacional (ou de infraestrutura), enquanto a segunda o autor buscou estimar eficiência em termos de número de passageiros e carga transportados por ano (consolidação de voos). Dos 63 aeroportos em análise no primeiro estágio (infraestruturas físicas), apenas 4 se revelaram 100% eficientes, sendo esses aeroportos de pequena dimensão e/ou antigos. Outro apontamento feito é

de que o valor médio de eficiência para todos os aeroportos é superior no segundo estágio, indicando que os aeroportos tendem a ser mais eficientes na relação movimentos de voos/passageiros transportados do que na relação entre as infraestruturas físicas/movimentos de voos. Recentemente, Cavaignac e Petiot (2016) realizaram uma análise bibliométrica de aplicações de DEA no setor de transportes no período de 1989 a 2016 e concluíram que o modal mais estudado foi o do transporte aéreo, com cerca de 40% do número total de artigos. Deste total, 63% dos estudos foram relacionados com aeroportos ao passo que 36% estão diretamente relacionados às companhias aéreas, mostrando que os autores se concentram principalmente na organização e gestão de instalações de transporte, notadamente dos aeroportos. Outros dados relevantes apontados pelo estudo são em relação às variáveis selecionadas por estudos com DEA em aeroportos. A Tabela 2.9 mostra os valores médios de variáveis bem como o número total de artigos para algumas suposições em estudos com a técnica DEA.

Tabela 2.9: Principais resultados de variáveis e parâmetros em estudos com uso de DEA em aeroportos.

Variável	Estudos com DEA em Aeroportos
	Média
# DMUs	28.1
# Anos	6.1
# inputs	4.1
# outputs	2.7
	Número de artigos
Regra de tamanho de amostra respeitada durante um ano	6
Regra do tamanho da amostra respeitada durante todo o período	13
Suposição VRS (Retorno Variável de Escala)	7
Suposição CRS (Retorno Constante de Escala)	3
Suposição CRS / VRS	5
Orientado para entrada	6
Orientado para saída	5

Fonte: Adaptado de Cavaignac e Petiot (2016).

Com relação aos estudos de eficiência de aeroportos que focam em variáveis ambientais (*outputs* indesejáveis), estes são notadamente menos frequentes na literatura. Destacam-se os estudos que consideraram o ruído aeronáutico como uma externalidade ambiental (IGNACCOLO, 2000; YU, 2004; YU *et. al.*, 2008) estes dois últimos mostrando que ignorar o ruído aeronáutico gerado

pela operação do aeroporto aumenta o número de unidades ineficientes e sua distância da fronteira de eficiência. Ambos os estudos utilizaram a abordagem DEA combinada com abordagem de Função de Distância Direcional (DDF – *Directional Distance Function*) que cria uma função de distância direcional, para medir as menores distâncias de *inputs* e *outputs* em uma dada direção, necessárias para determinada unidade (DMU) alcançar a fronteira de eficiência.

O estudo de Lozano e Gutiérrez (2011) também utilizou o SBM-DEA para estimar a eficiência de 30 aeroportos espanhóis no ano de 2006 e 2007, mas agregando ao modelo de análise dois *outputs* indesejáveis (atraso de voos). Em todos os casos, os autores apontam que o SBM apresenta resultados mais robustos e práticos quando comparados com modelos tradicionais de DEA.

O trabalho de Martini *et. al.* (2013) merece destaque como sendo um dos poucos trabalhos na literatura que aplicou DEA com as variáveis ruído e as emissões de poluentes (HC e NOx) modeladas como *outputs* indesejáveis de aeroportos. Nesse estudo, os autores consideraram como *inputs* a área do terminal do aeroporto, o número de esteiras de bagagem disponíveis, comprimento da pista de pouso e decolagem e as posições de estacionamento das aeronaves. O estudo concluiu que os aeroportos são mais eficientes quanto menor for a porcentagem de voos operados com aeronaves de fuselagem estreita (ex.: Boeing 737 e Airbus A320), sugerindo que melhorias na eficiência técnica/ambiental podem ser obtidas induzindo as companhias aéreas a substituírem as aeronaves de fuselagem estreita por jatos regionais em rotas cujos fatores de carga utilizando aeronaves de fuselagem estreita sejam baixos.

Como observado na literatura, as questões ambientais incorporadas à eficiência em aeroportos ainda são incipientes, embora sejam um dos pilares de maior relevância no setor e de crescimento na literatura especializada. Portanto, a perspectiva de avaliação de aeroportos como um sistema processador de passageiros e aeronaves e produtor de emissões de impactos locais e ao clima se mostra pioneira na literatura, uma vez que não foram identificados trabalhos que abordem a eficiência de aeroportos sob esta perspectiva. Como uma das formas de subsidiar a escolha pelas variáveis a serem utilizadas como dados de entrada do modelo DEA proposto, a Tabela 2.10 compila as principais variáveis de entrada (*inputs*) e de saída (*outputs*) nos estudos com DEA em aeroportos.

Tabela 2.10: Síntese das variáveis de entrada e saída em estudos com DEA em aeroportos.

Autores	Entradas (inputs)	Saídas (outputs)
Gillen e Lall (1997)	<ul style="list-style-type: none"> -nº pistas -nº posições de estacionamento de aeronaves -área terminal -nº esteiras de bagagem -nº vagas estacionamento público -área aeroporto -nº funcionários 	<ul style="list-style-type: none"> -nº pousos e decolagens (regulares e não regulares) -fluxo passageiros -movimentação carga
Parker (1999)	<ul style="list-style-type: none"> -nº funcionários -capital investido -outros <i>inputs</i> definidos como residual dos custos operacionais 	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo passageiros -movimentação carga e correios -volume de negócios
Sarkis (2000)	<ul style="list-style-type: none"> -custos operacionais -nº funcionários -nº pistas -nº posições de estacionamento de aeronaves 	<ul style="list-style-type: none"> -receitas operacionais -nº pousos e decolagens (regulares e não regulares)
Pels <i>et. al.</i> (2001)	<ul style="list-style-type: none"> -nº posições de estacionamento de aeronaves -nº posições remotas de estacionamento de aeronaves -área terminal -nº esteiras de bagagem -nº posições de <i>check-in</i> 	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo passageiros
Fernandes e Pacheco (2002)	<ul style="list-style-type: none"> -área do aeroporto -nº posições de estacionamento de aeronaves -área terminal -área de desembarque -extensão terminal -nº vagas estacionamento público -área da restituição de bagagens 	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo passageiros
Pels <i>et. al.</i> (2003)	<ul style="list-style-type: none"> -área do aeroporto -nº posições de estacionamento de aeronaves -nº posições remotas de estacionamento de aeronaves -nº pistas -variáveis <i>dummy</i> z para <i>slots</i> -variáveis <i>dummy</i> z para restrições de tempo -nº posições de <i>check-in</i> -nº esteiras de bagagem 	<ul style="list-style-type: none"> -nº pousos e decolagens -fluxo passageiros
Fernandes e Pacheco (2003)	<ul style="list-style-type: none"> -nº funcionários -despesas com pessoal -despesas operacionais 	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo passageiros -movimentação de carga e correios -receitas operacionais -receitas comerciais
Bazargan e Vasigh (2003)	<ul style="list-style-type: none"> -custos operacionais e não operacionais -nº funcionários -nº pistas -nº posições de estacionamento de aeronaves 	<ul style="list-style-type: none"> -nº pousos e decolagens -fluxo passageiros -receitas aeronáuticas -receitas não aeronáuticas -% de voos pontuais
Yoshida e Fujimoto (2004)	<ul style="list-style-type: none"> -nº pistas -área do terminal -custo de oportunidade 	<ul style="list-style-type: none"> -nº pousos e decolagens -fluxo passageiros -movimentação carga
Yu (2004)	<ul style="list-style-type: none"> -nº pistas -área do pátio de aeronaves -área do terminal 	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo passageiros -nº pousos e decolagens

Pacheco <i>et al.</i> (2006)	<ul style="list-style-type: none"> -salários e benefícios -despesas operacionais e não operacionais -nº funcionários 	<ul style="list-style-type: none"> -receitas operacionais -receitas comerciais -outras receitas -fluxo passageiros -movimentação carga
Souza <i>et al.</i> (2009)	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo passageiros domésticos -fluxo passageiros internacionais -movimentação carga 	<ul style="list-style-type: none"> -receitas aeronáuticas -receitas não aeronáuticas
Marques e Simões (2010)	<ul style="list-style-type: none"> -no funcionários -no pistas -no posições de estacionamento de aeronaves -área do terminal 	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo de passageiros -movimentação de carga -nº de pousos e decolagens
Lozano e Gutiérrez (2011)	<ul style="list-style-type: none"> -no pistas -área do pátio de aeronaves -no esteiras de bagagem -no posições de <i>check-in</i> -no pontes de embarque 	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo de passageiros -nº de pousos e decolagens -% de voos atrasados -atraso médio
Curi <i>et al.</i> (2011)	<ul style="list-style-type: none"> -nº funcionários -nº pistas -área do pátio de aeronaves 	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo de passageiros -nº de pousos e decolagens
Wanke (2012)	<ul style="list-style-type: none"> -nº posições de estacionamento público -área do terminal -área de pátio de aeronaves -comprimento total pistas -nº pistas -nº posições de estacionamento de aeronaves -área dos aeroportos 	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo de passageiros -movimentação de carga -nº de pousos e decolagens
Perelman e Serebriski (2012)	<ul style="list-style-type: none"> -nº funcionários -nº pistas -área do terminal 	<ul style="list-style-type: none"> -fluxo de passageiros -movimentação de carga -nº de pousos e decolagens
Wanke (2013)	<ul style="list-style-type: none"> -área do terminal -nº posições de estacionamento de aeronaves -nº pistas -nº de pousos e decolagens (2º estágio apenas) 	<ul style="list-style-type: none"> -nº de pousos e decolagens (1º estágio apenas) -fluxo de passageiros -movimentação de carga

Logo, a partir da Tabela 2.10 é possível notar que a análise de eficiência de aeroportos tem como vantagem a disponibilidade de diversos *inputs* diferentes, ao passo que *outputs* possuem menor variação na literatura. Dentre os *inputs* mais comuns estão: número e extensão de pistas de pouso e decolagem, área do terminal, áreas do aeroporto, número de posições de estacionamento de aeronaves, número de funcionários e custos operacionais. Entretanto, as opções são muito variadas: número de esteiras de bagagem, horas de utilização da aeronave, custos operacionais, capital investido. De acordo com estudos verificados, os *outputs* mais utilizados são operacionais, como o fluxo de passageiros, a movimentação de cargas e o número de pousos e decolagens, embora, neste setor, a utilização de dados monetários seja difundida (por exemplo: receitas totais e receitas não aeronáuticas). Em complemento, verifica-se uma tendência de divisão nas análises em modelos operacionais e financeiros, tendo em vista a natureza dos *inputs* e *outputs* (monetários ou relacionados à infraestrutura dos aeroportos).

2.3.5 TRATAMENTO DE OUTPUTS INDESEJÁVEIS EM MODELOS DEA

Os modelos tradicionais de DEA assumem que todas as saídas (*outputs*) devem ser maximizadas para um determinado nível de *inputs*. No entanto, como brevemente já discutido, quando produtos indesejáveis também são gerados como subprodutos de produtos desejáveis, essa suposição é inadequada. Para contornar essas limitações, inúmeros métodos para modelar os resultados indesejados no *framework* tradicional DEA foram propostos. Uma das primeiras abordagens sugeridas é tratar os *outputs* indesejáveis como *inputs* na análise de eficiência, o que implica em reduzir simultaneamente os *inputs* e *outputs* indesejáveis para melhorar a eficiência de uma DMU. Esse método é simples demais ou inadequado para refletir o processo de produção real, já que resultados indesejáveis, como o CO₂, são de fato produzidos como subproduto do processo de produção usual, e não do insumo. Em outras palavras, essa abordagem ignora a articulação na produção entre resultados desejáveis e indesejáveis, como no caso dos voos, por exemplo, que não podem ser produzidos sem também produzir ruído e poluição local (SCOTTI *et. al.*, 2014).

Como visto, os modelos radiais (DEA clássico) assumem que uma redução proporcional ou ampliação de *inputs/outputs* é a principal preocupação na medição de eficiência. Consequentemente, os modelos radiais negligenciam as folgas (*slacks*) e, portanto, quando se lida com resultados (*outputs*) indesejáveis em modelos DEA clássicos, as folgas nos resultados indesejáveis não são contabilizadas na medida de eficiência, fazendo desta uma lacuna crucial dos modelos radiais.

Dessa forma, apenas os modelos não radiais podem capturar todos os aspectos da eficiência, e, deste ponto de vista, deve-se notar que nossos modelos baseados nas folgas (*slacks*) podem lidar com a eficiência de entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) na presença de saídas (*outputs*) não desejáveis, separáveis e não-separáveis em qualquer ambiente de retorno de escala.

Outras abordagens mais elaboradas surgiram para melhorar a avaliação de *outputs* indesejáveis em DEA. Duas das mais utilizadas são a abordagem de Chung *et. al.* (1997) ao incorporar no DEA as funções distância direcionais (DDF) multiobjectivos, a análise por meio de medida baseada em folgas (SBM- *Slack Based Measure*), que lida diretamente com as folgas das relações de *inputs* e *outputs* e que será detalhado a seguir.

2.3.5.1 MODELO DEA BASEADO EM FOLGAS (SLACK BASED MEASURE - SBM)

A medida baseada em folgas (SBM) foi proposta pela primeira vez por Tone (2001) como uma abordagem notável para lidar com folgas em entradas e saídas. As folgas são as quantidades extras a serem reduzidas (aumentadas) nos insumos (produtos) para que a unidade avaliada atinja o conjunto eficiência após todos os insumos (produtos) terem sido reduzidos (aumentados) para atingir a curva de eficiência. Após as reduções (aumentos) adicionais, o plano de produção resultante pertence ao conjunto eficiência e, portanto, é tecnicamente eficiente.

O modelo caracteriza-se por ser abordagem não-radial e lida diretamente com o excesso de insumo (*inputs*) e déficit de produção (*outputs*), sendo invariante para as unidades de medida, além de ser indicado para avaliar DMUs que tenham diferenças de tamanho entre si.

Em contraste com as medidas CCR e BCC tradicionais que são baseadas na redução proporcional (ampliação) das entradas (*inputs*) ou ampliação das saídas (*outputs*), o SBM calcula a relação entre a redução média de *inputs* e o aumento médio de *outputs*, ambos chamados de “folgas”. Logo, o SBM projeta a DMU para o ponto mais distante da fronteira eficiente, fazendo com que a função objetivo deva ser minimizada por meio das folgas máximas (TONE, 2001).

Segundo Lozano e Gutiérrez (2011), minimizar essa relação implica a busca simultânea de melhorias nas entradas e saídas. É, portanto, um modelo não orientado (a priori) e também não

radial, isto é, não força as entradas e saídas para serem melhoradas de forma uniforme ou igualmente proporcional, permitindo que a máxima melhoria possível em cada unidade seja computada pelo modelo. Além disso, a pontuação de eficiência do modelo SBM não deixa nenhuma folga (*slack*) de entrada ou saída não contabilizada, ou seja, todas as melhorias possíveis são esgotadas e devidamente consideradas na função objetivo. A Equação 2.4 a seguir demonstra a programação linear do modelo DEA-SBM com a inclusão de *outputs* indesejáveis.

$$\min \rho = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i^- / x_{ik}}{1 + \frac{1}{q_1 + q_2} \left(\sum_{r=1}^{q_1} s_r^+ / y_{rk} + \sum_{t=1}^{q_2} s_t^{b-} / b_{tk} \right)} \quad (2.4)$$

Sujeito a:

$$X\lambda + s^- = x_k$$

$$Y\lambda - s^+ = y_k$$

$$B\lambda + s^{b-} = b_k$$

$$\lambda, s^-, s^+ \geq 0$$

No modelo, S_i^- e S_t^{b-} são vetores de quantidades de excessos (*slacks*) de consumo dos insumos (*inputs*) e produtos (*outputs*) indesejáveis respectivamente, e ambos devem ser reduzidos, e S_r^+ expressa escassez nos produtos (*outputs*) desejáveis, que por sua vez devem ser aumentados. Já m corresponde ao número de insumos (*inputs*) e q_1 e q_2 de produtos (*outputs*) desejáveis e indesejáveis, respectivamente. Por sua vez, λ corresponde ao peso dos *inputs* e *outputs*.

No modelo, deve-se considerar a seguinte condição: $0 \leq \rho \leq 1$, onde ρ corresponde à mensuração da eficiência das DMU (aerportos no contexto desta pesquisa). Quando $\rho = 1$, as DMU são consideradas eficientes ou ineficientes e com folgas. Assim, unidades ineficientes têm $\rho < 1$ se estiverem abaixo da fronteira ou podem estar sobre a fronteira (com $\rho = 1$) e apresentarem folgas (COOPER *et. al.*, 2007). Em outras palavras, para alcançar a eficiência, é necessário reduzir os insumos (*inputs*), reduzir excesso nos produtos (*outputs*) indesejáveis e aumentar o déficit de produtos (*outputs*) desejáveis.

Portanto, de acordo com os estudos verificados na literatura, nesta pesquisa serão utilizados os modelos DEA-BCC (Banker – Charnes – Cooper) e SBM-DEA (*Slack Based Measure*), este

último por possuir como vantagem a capacidade de tratar adequadamente os *outputs* indesejáveis, como é o caso das emissões atmosféricas que serão consideradas nesta pesquisa. Nesse sentido, Chen e He (2017) afirmam que o modelo SBM é ideal para tratamento de *outputs* indesejáveis com o método DEA.

Em relação aos retornos de escala, foi escolhido a abordagem de retornos variáveis de escala (VRS) em função do setor aeroportuário frequentemente alcançar retornos variáveis de escala devido à concorrência imperfeita, regulamentações governamentais e restrições financeiras, o que julgou-se ser o caso para os aeroportos da amostra.

Em relação à orientação do modelo DEA, foi definida uma orientação a *output* pois, uma vez realizados investimentos nos aeroportos, como a construção de novos terminais e ampliação do sistema de pistas de pouso e decolagem (PPD), é desejável que estas infraestruturas sejam utilizadas da maneira mais intensa possível, maximizando, desta forma, os *outputs* (GILLEN & LALL, 1997; OUM *et. al.*, 2008).

No modelo DEA, os pesos foram equivalentes para todas as variáveis (valor do peso = 1) de modo a evitar que alguma das variáveis enviesasse o resultado final.

3 MÉTODO

A partir da problematização e dos objetivos deste trabalho – apresentados no Capítulo 1 – e da Revisão da Literatura – apresentada no Capítulo 2 –, este capítulo apresenta o método adotado para a avaliação da eficiência carbono-energética de aeroportos brasileiros com aplicação de DEA.

O presente estudo, como fora mencionado, tem como finalidade aplicar o método da Análise Envoltória de Dados (DEA) para encontrar os aeroportos mais eficientes em termos de seu consumo de energia total e emissões de CO₂, considerando suas características de infraestrutura, através de dados coletados da Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária – Infraero. A aplicação dessa metodologia requer um modelo representativo do processo produtivo de um aeroporto que contemple as variáveis mais importantes de acordo com a abordagem proposta. Dessa forma, a criação deste modelo depende da definição das unidades produtivas – DMU's (aeroportos) e da seleção prévia dos parâmetros: as variáveis de entradas ou insumos (*inputs*) e as variáveis de saídas ou produtos (*outputs*), incluindo os *outputs* ou saídas/produtos indesejados (que nesta abordagem trata-se das emissões atmosféricas).

O escopo da avaliação da presente pesquisa se dá no contexto dos aeroportos públicos operados pela Infraero, em função da vinculação do pesquisador com a referida empresa pública. Logo, os aeroportos recentemente concedidos à iniciativa privada (até o ano de 2018), a saber: Aeroportos Internacionais de Guarulhos, Brasília, Campinas (Viracopos), Rio de Janeiro (Galeão), Confins, Fortaleza, Salvador e Porto Alegre, não fazem parte do escopo da avaliação proposta no presente trabalho. Além do exposto, a não disponibilidade dos dados de consumo energético destes aeroportos contribuiu para a exclusão dos mesmos. Para alcançar os objetivos propostos e obter uma resposta ao problema da pesquisa, as etapas realizadas são descritas a seguir e apresentadas sinteticamente na Figura 3.1.

Etapa 1: a primeira etapa inclui a revisão da literatura dos dois eixos de pesquisa, tendo como resultados (i) Variáveis de *inputs* e *outputs* mais utilizadas em estudos de eficiência de aeroportos; (ii) Indicadores de performance ambientais de aeroportos (consumo de energia e emissões).

Etapa 2: a segunda etapa envolve a coleta de dados de aeroportos e aeronaves e a definição dos fatores de emissões a serem utilizados para o cálculo estimativo das emissões de CO₂, NO_x e CO relativos ao consumo energético total dos aeroportos e aeronaves (no caso dos poluentes). Dentre os dados dos aeroportos, foram levantados dados de infraestrutura definidos a partir da revisão da literatura, referentes à infraestrutura atual dos aeroportos, como extensão de pista de pouso e decolagem (PPD) e área do terminal de passageiros (TPS). Esta etapa também inclui o cálculo das estimativas de emissões a partir dos fatores de emissões coletados, que foram os *outputs* indesejáveis utilizados para determinar a eficiência na análise DEA. Assim, tem-se a consolidação da base de dados, a partir de todos os dados coletados, tratados e calculados.

Etapa 3: a terceira etapa corresponde à análise dos dados (variáveis consideradas como *input* e *output*) e aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA). Em complemento esta etapa traz a definição dos cenários de modelagem para a avaliação da eficiência carbono-energética de aeroportos proposta. A análise das variáveis se baseia na estatística descritiva, além de análise de correlação para avaliação das suas relações. Já na análise DEA, há a seleção das variáveis (*inputs*), construção e execução do modelo DEA (cenários), para obter a eficiência carbono-energética dos aeroportos selecionados.

Etapa 4: a quarta e última etapa corresponde aos resultados da pesquisa, com o ranking dos aeroportos mais eficientes, análise dos cenários e avaliação do impacto das variáveis nos resultados. Em complemento, os indicadores ambientais de aeroportos identificados a partir da revisão da literatura são calculados e comparados aos de outros aeroportos disponíveis na literatura.

Como forma de visualizar a dinâmica metodológica do trabalho, a Figura 3.1 a seguir detalha as etapas da metodologia da dissertação.

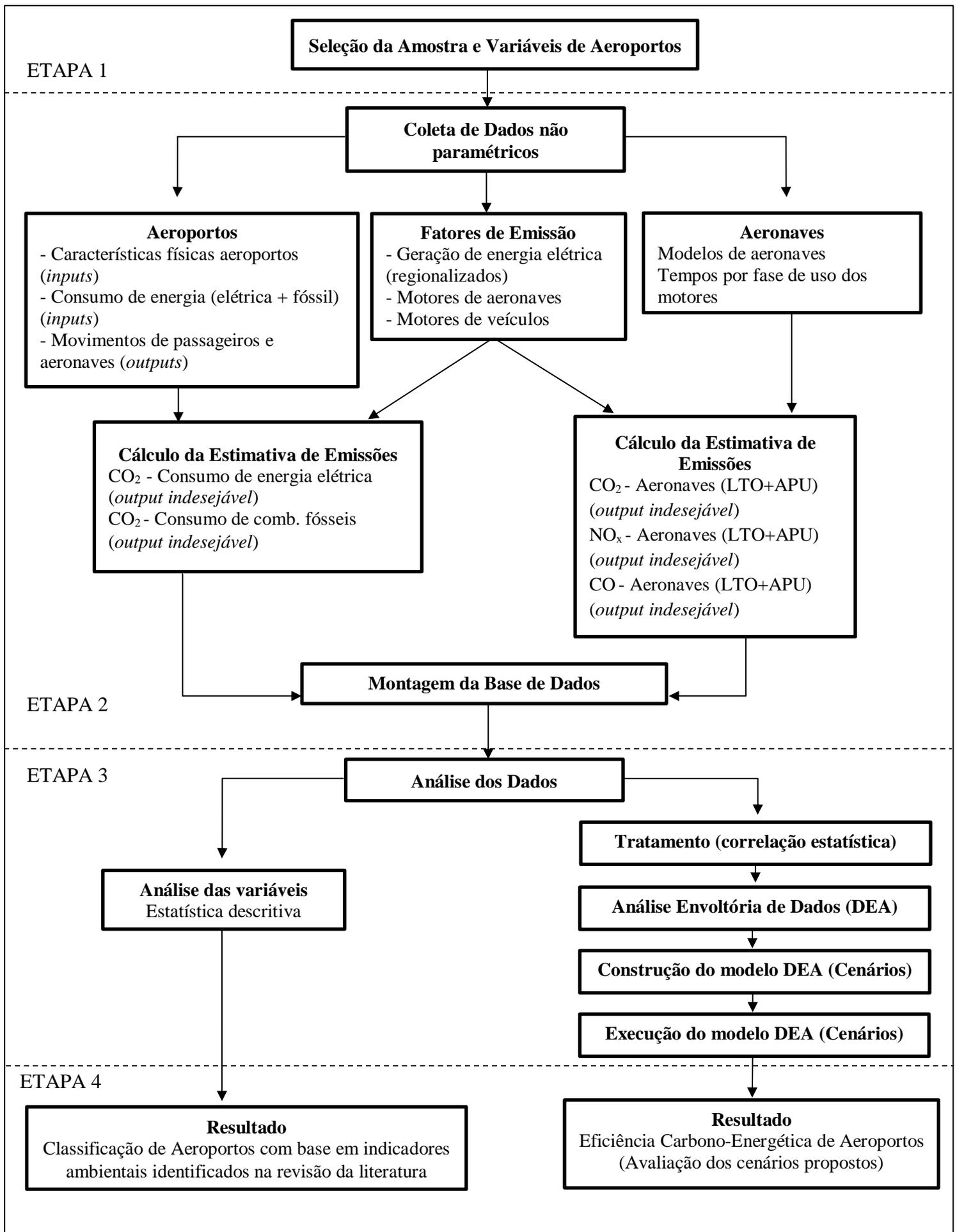


Figura 3.1: Etapas do método da dissertação.

3.1 ETAPA 1 - SELEÇÃO DA AMOSTRA DE AEROPORTOS

De forma a evitar incertezas relativas a possíveis efeitos sazonais e de forma a ter uma visão mais recente do comportamento dos aeroportos selecionados, todos os dados foram coletados para o período de 2016 a 2018 e, em seguida, foram estabelecidos valores médios do período para utilização na modelagem proposta com o uso de DEA. Portanto, inicialmente, foram considerados todos os 54 aeroportos operados pela Infraero até o mês de Abril de 2019, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Aeroportos operados pela Infraero.

Grupo	Aeroportos
Especial	SBSP - Aeroporto de Congonhas
Especial	SBRJ - Aeroporto Santos-Dumont
Especial	SBRF - Aeroporto Internacional de Recife
Especial	SBCT - Aeroporto Internacional de Curitiba
1	SBBE - Aeroporto Internacional de Belém
1	SBGO - Aeroporto de Goiânia
1	SBVT - Aeroporto Internacional de Vitória
1	SBCY - Aeroporto Internacional de Cuiabá
Especial	SBEG - Aeroporto Internacional de Manaus
2	SBFI - Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu
2	SBMO - Aeroporto Internacional de Maceió
2	SBNF - Aeroporto Internacional de Navegantes
2	SBSL - Aeroporto Internacional de São Luís
2	SBCG - Aeroporto Internacional de Campo Grande
2	SBJP - Aeroporto Internacional de João Pessoa
2	SBAR - Aeroporto de Aracaju
3	SBUL - Aeroporto de Uberlândia
3	SBTE - Aeroporto de Teresina
2	SBLO - Aeroporto de Londrina
3	SBPV - Aeroporto Internacional de Porto Velho
3	SBPJ - Aeroporto de Palmas
3	SBJU - Aeroporto de Juazeiro do Norte
3	SBMQ - Aeroporto Internacional de Macapá
3	SBJV - Aeroporto de Joinville
3	SBSN - Aeroporto Internacional de Santarém
3	SBPL - Aeroporto Internacional de Petrolina
3	SBIL - Aeroporto de Ilhéus

3	SBBV - Aeroporto Internacional de Boa Vista
3	SBRB - Aeroporto de Rio Branco
3	SBIZ - Aeroporto de Imperatriz
3	SBMA - Aeroporto de Marabá
3	SBMK - Aeroporto de Montes Claros
2	SBBH - Aeroporto de Belo Horizonte
3	SBJR - Aeroporto de Jacarepaguá
3	SBKG - Aeroporto de Campina Grande
2	SBME - Aeroporto de Macaé
2	SBMT - Aeroporto de Campo de Marte
3	SBCJ - Aeroporto de Carajás
3	SBHT - Aeroporto de Altamira
3	SBCZ - Aeroporto Internacional de Cruzeiro do Sul
3	SBUR - Aeroporto de Uberaba
3	SBTT - Aeroporto Internacional de Tabatinga
3	SBSJ - Aeroporto Internacional de São José dos Campos
3	SBPK - Aeroporto Internacional de Pelotas
3	SBTF - Aeroporto de Tefé
3	SBBI - Aeroporto de Bacacheri
3	SBCR - Aeroporto Internacional de Corumbá
3	SBPR - Aeroporto Carlos Prates de Belo Horizonte
3	SBUG - Aeroporto Internacional de Uruguaiana
3	SBUF - Aeroporto de Paulo Afonso
3	SBPB - Aeroporto Internacional de Parnaíba
3	SBJC - Aeroporto Júlio César de Belém
3	SBPP - Aeroporto Internacional de Ponta Porã
3	SBBG - Aeroporto Internacional de Bagé

Fonte: Adaptado de INFRAERO (2019).

A ordenação dos aeroportos da Tabela 3 se deu de acordo com o número decrescente de movimentos de passageiros no último ano de dados disponíveis (2018). A classificação dos aeroportos em Classe Especial, 1, 2 e 3 é feita de acordo um escore balanceado, interno da Infraero, que leva em consideração tanto a receita comercial quanto o movimento de passageiros do aeroporto, segundo Ato Administrativo nº 925/DP/2014 da referida empresa.

3.2 ETAPA 1 - SELEÇÃO DE VARIÁVEIS DE AEROPORTOS

A proposta inicial de escolha das variáveis a serem consideradas no modelo de avaliação da eficiência carbono-energética de aeroportos brasileiros proposto por esta pesquisa se pautou em

dois fatores: (i) variáveis mais utilizadas em análises de eficiência de aeroportos por meio de DEA de acordo com estudos apresentados no Capítulo 2 – Revisão da Literatura e (ii) disponibilidade de dados dos aeroportos brasileiros operados pela Infraero entre 2016 e 2018. Dessa forma, inicialmente, verificou-se a existência de dados de movimentos de passageiros e aeronaves para todos os aeroportos listados na Tabela 3. Com relação às variáveis de consumo energético e de modelo de aeronaves foi verificada a disponibilidade dos seguintes dados dos aeroportos da amostra: consumo de energia elétrica, consumo de combustíveis fósseis (referentes ao operador do aeroporto) e modelo de aeronaves que operaram em cada aeroporto da amostra no período de 2016 a 2018. Com relação aos dados de caracterização da infraestrutura dos aeroportos, foi verificada a disponibilidade dos seguintes dados sugeridos pela revisão de literatura (Capítulo 2): (i) número de posições de parada de aeronaves, (ii) tamanho de pista de pouso e decolagem (em metros) e (iii) área do terminal de passageiros (em metros quadrados). Portanto, todos os dados mencionados tiveram sua disponibilidade avaliada e foi observado que, à exceção de alguns dados de consumo de energia elétrica (detalhados a seguir), todos os dados estavam disponíveis em sistemas de monitoramento e controle da Infraero e foram coletados. Com relação aos dados de consumo de energia elétrica, verificou-se inconsistência de dados para os seguintes aeroportos:

- SBJU - Aeroporto de Juazeiro do Norte
- SBIL - Aeroporto de Ilhéus
- SBJR - Aeroporto de Jacarepaguá
- SBKG - Aeroporto de Campina Grande
- SBME - Aeroporto de Macaé
- SBMT - Aeroporto de Campo de Marte
- SBCJ - Aeroporto de Carajás
- SBHT - Aeroporto de Altamira
- SBCZ - Aeroporto Internacional de Cruzeiro do Sul
- SBUR - Aeroporto de Uberaba
- SBTT - Aeroporto Internacional de Tabatinga
- SBSJ - Aeroporto Internacional de São José dos Campos
- SBPK - Aeroporto Internacional de Pelotas
- SBTF - Aeroporto de Tefé
- SBBI - Aeroporto de Bacacheri
- SBKR - Aeroporto Internacional de Corumbá
- SBPR - Aeroporto Carlos Prates de Belo Horizonte
- SBUG - Aeroporto Internacional de Uruguaiana
- SBUF - Aeroporto de Paulo Afonso
- SBPB - Aeroporto Internacional de Parnaíba
- SBJC - Aeroporto Júlio César de Belém
- SBPP - Aeroporto Internacional de Ponta Porã
- SBBG - Aeroporto Internacional de Bagé

As inconsistências se referem a lacunas em dados de alguma das séries mensais no período avaliado (2016 a 2018), que embora pudessem ser estimados, optou-se por utilizar apenas dados validados oriundos das faturas de energia elétrica dos aeroportos. Portanto, os aeroportos listados acima foram excluídos da amostra, sem prejuízo para a relevância da mesma, uma vez que os aeroportos retirados (listados acima) correspondem a apenas 2,42% do movimento total de passageiros dos aeroportos da rede Infraero no ano de 2018. Nesse sentido, um benefício associado à retirada de tais aeroportos da amostra é o aumento da homogeneidade dentre aeroportos, que é uma das premissas de estudos com aplicação de DEA, uma vez que a maioria dos aeroportos retirados são de pequeno porte, fazendo com que a amostra fique mais homogênea, conforme Figura 3.2.

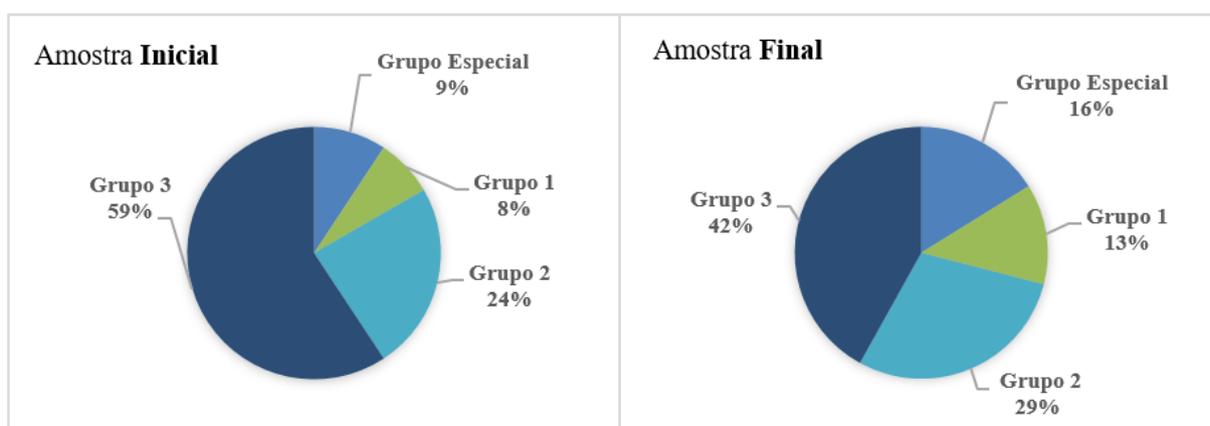


Figura 3.2: Comparação entre amostras de aeroportos.

Portanto, a amostra final dos 31 aeroportos selecionados para avaliação proposta nesta pesquisa consta na Tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2: Lista final de Aeroportos selecionados como DMUs.

Grupo	Código ICAO	Aeroportos
Especial	SBSP	Aeroporto de Congonhas
Especial	SBRJ	Aeroporto Santos-Dumont
Especial	SBRF	Aeroporto Internacional de Recife
Especial	SBCT	Aeroporto Internacional de Curitiba
1	SBBE	Aeroporto Internacional de Belém
1	SBGO	Aeroporto de Goiânia
1	SBVT	Aeroporto Internacional de Vitória
1	SBCY	Aeroporto Internacional de Cuiabá
Especial	SBEG	Aeroporto Internacional de Manaus
2	SBFI	Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu

2	SBMO	Aeroporto Internacional de Maceió
2	SBNF	Aeroporto Internacional de Navegantes
2	SBSL	Aeroporto Internacional de São Luís
2	SBCG	Aeroporto Internacional de Campo Grande
2	SBJP	Aeroporto Internacional de João Pessoa
2	SBAR	Aeroporto de Aracaju
3	SBUL	Aeroporto de Uberlândia
3	SBTE	Aeroporto de Teresina
2	SBLO	Aeroporto de Londrina
3	SBPV	Aeroporto Internacional de Porto Velho
3	SBPJ	Aeroporto de Palmas
3	SBMQ	Aeroporto Internacional de Macapá
3	SBJV	Aeroporto de Joinville
3	SBSN	Aeroporto Internacional de Santarém
3	SBPL	Aeroporto Internacional de Petrolina
3	SBBV	Aeroporto Internacional de Boa Vista
3	SBRB	Aeroporto de Rio Branco
3	SBIZ	Aeroporto de Imperatriz
3	SBMA	Aeroporto de Marabá
3	SBMK	Aeroporto de Montes Claros
2	SBBH	Aeroporto de Belo Horizonte

3.3 ETAPA 2 - COLETA DE DADOS

Conforme mencionado no Capítulo 1, este estudo visa estimar o grau de eficiência carbono-energética dos aeroportos brasileiros além de classifica-los em termos da referida eficiência através da técnica DEA, considerando dados do período de 2016 a 2018. O primeiro passo, portanto, é a seleção de variáveis adequadas para caracterização dos modelos e formação das variáveis de *input* e *output* que possam descrever adequadamente a operação de um aeroporto (PARKER, 1999; SARKIS, 2000) sob a abordagem pretendida. Os dados coletados estão divididos entre dados relacionados à operação dos aeroportos e dados relacionados às aeronaves, necessários para os cálculos de estimativa de emissões destas. A seguir serão apresentados os procedimentos realizados durante a coleta dos dados da pesquisa.

3.3.1 AEROPORTOS

Em relação aos aeroportos, inicialmente foram coletados dados dos movimentos de aeronaves e passageiros para os anos de 2016 a 2018, obtidos através das informações estatísticas

disponibilizadas no site da Infraero (INFRAERO, 2018). A média para os 3 anos em análise (2016-2018) é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Média de movimento de passageiros e aeronaves entre os anos 2016 -2018.

Aeroportos	Movimento Aeronaves (Pouso + Decolagem)	Movimento Passageiros (Embarque + Desembarque)
SBSP - Aeroporto de Congonhas	217.761	21.407.630
SBRJ - Aeroporto Santos-Dumont	102.627	9.140.551
SBRF - Aeroporto Internacional de Recife	74.324	7.582.308
SBCT - Aeroporto Internacional de Curitiba	63.648	6.465.657
SBBE - Aeroporto Internacional de Belém	39.011	3.366.744
SBGO - Aeroporto de Goiânia	64.484	3.105.536
SBVT - Aeroporto Internacional de Vitória	44.060	3.052.109
SBCY - Aeroporto Internacional de Cuiabá	49.476	2.909.903
SBEG - Aeroporto Internacional de Manaus	38.059	2.685.761
SBFI - Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu	20.323	2.123.121
SBMO - Aeroporto Internacional de Maceió	18.750	2.071.316
SBNF - Aeroporto Internacional de Navegantes	20.699	1.654.686
SBSL - Aeroporto Internacional de São Luís	19.098	1.565.520
SBCG - Aeroporto Internacional de Campo Grande	19.205	1.516.066
SBJP - Aeroporto Internacional de João Pessoa	13.863	1.373.038
SBAR - Aeroporto de Aracaju	12.747	1.209.785
SBUL - Aeroporto de Uberlândia	24.190	1.095.999
SBTE - Aeroporto de Teresina	14.842	1.067.587
SBLO - Aeroporto de Londrina	23.200	923.091
SBPV - Aeroporto Internacional de Porto Velho	13.817	821.418
SBPJ - Aeroporto de Palmas	12.660	648.602
SBMQ - Aeroporto Internacional de Macapá	8.995	561.217
SBJV - Aeroporto de Joinville	7.866	490.999
SBSN - Aeroporto Internacional de Santarém	11.105	473.533
SBPL - Aeroporto Internacional de Petrolina	6.070	469.786
SBBV - Aeroporto Internacional de Boa Vista	5.394	290.784
SBRB - Aeroporto de Rio Branco	6.575	329.741
SBIZ - Aeroporto de Imperatriz	5.662	286.880
SBMA - Aeroporto de Marabá	7.420	291.253
SBMK - Aeroporto de Montes Claros	8.347	262.933
SBBH - Aeroporto de Belo Horizonte	40.156	246.725

Já o consumo de energia elétrica (em GJ) dos aeroportos selecionados foi obtido através de banco de dados interno da Infraero que considera as faturas de energia mensais de cada aeroporto. Foram coletados dados referentes aos anos de 2016 a 2018, conforme mostra a Figura 3.3. Os dados coletados foram transformados originalmente de kWh para GJ, onde 1 GJ = 277,778 kWh.

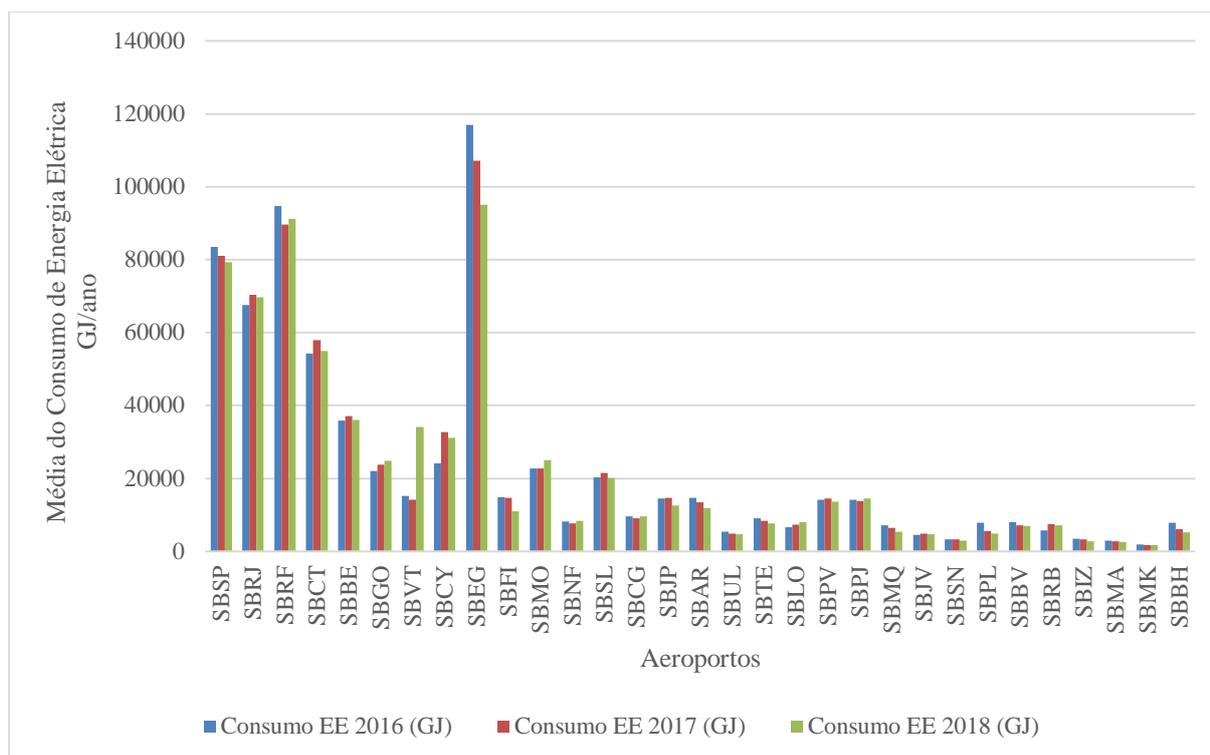


Figura 3.3: Consumo de Energia Elétrica dos aeroportos no período de 2016 a 2018.

A Tabela 3.4 compila a média dos dados de consumo de energia elétrica pelos aeroportos da amostra para o período estudado (2016 a 2018), em giga joule (GJ).

Tabela 3.4: Consumo médio de energia elétrica dos aeroportos no período de 2016 a 2018.

Aeroportos	Consumo Médio de Energia Elétrica (GJ)
SBSP - Aeroporto de Congonhas	81224.42
SBRJ - Aeroporto Santos-Dumont	69198.41
SBRF - Aeroporto Internacional de Recife	91826.12
SBCT - Aeroporto Internacional de Curitiba	55684.26
SBBE - Aeroporto Internacional de Belém	36284.40
SBGO - Aeroporto de Goiânia	23601.82
SBVT - Aeroporto Internacional de Vitória	21176.22
SBCY - Aeroporto Internacional de Cuiabá	29330.32
SBEG - Aeroporto Internacional de Manaus	106399.34
SBFI - Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu	13527.37
SBMO - Aeroporto Internacional de Maceió	23478.18
SBNF - Aeroporto Internacional de Navegantes	8063.83
SBSL - Aeroporto Internacional de São Luís	20619.72
SBCG - Aeroporto Internacional de Campo Grande	9434.33
SBJP - Aeroporto Internacional de João Pessoa	13962.89
SBAR - Aeroporto de Aracaju	13341.06

SBUL - Aeroporto de Uberlândia	4960.88
SBTE - Aeroporto de Teresina	8414.91
SBLO - Aeroporto de Londrina	7287.71
SBPV - Aeroporto Internacional de Porto Velho	14116.79
SBPJ - Aeroporto de Palmas	14129.67
SBMQ - Aeroporto Internacional de Macapá	6304.56
SBJV - Aeroporto de Joinville	4708.38
SBSN - Aeroporto Internacional de Santarém	3193.33
SBPL - Aeroporto Internacional de Petrolina	6119.47
SBBV - Aeroporto Internacional de Boa Vista	7345.87
SBRB - Aeroporto de Rio Branco	6787.37
SBIZ - Aeroporto de Imperatriz	3169.48
SBMA - Aeroporto de Marabá	2753.96
SBMK - Aeroporto de Montes Claros	1756.86
SBBH - Aeroporto de Belo Horizonte	6422.44

Este consumo de energia representa a alimentação das principais cargas dos aeroportos, a saber: Terminais de Passageiros - TPS (ar condicionado, iluminação interna e externa, sistemas de água gelada, dentre outros), iluminação do pátio de aeronaves, do sistema de luzes de balizamento, atendimento aos Terminais de Cargas - TECA, estacionamentos de veículos, torre de controle e demais prédios administrativos e sistemas de menor porte. Além disso, neste consumo está incluído o consumo de diversos concessionários, como, por exemplo, o consumo de hangares dos aeroportos que fazem o rateio da energia junto à Infraero. Da Tabela 3.2 é possível notar que aeroportos do grupo Especial são os maiores consumidores de energia elétrica, devido ao seu porte e ao volume de passageiros e aeronaves processadas. O Aeroporto de Manaus (SBEG) se destaca em função de possuir grande demanda energética do terminal de passageiros e de seu Terminal de Carga Aérea (TECA).

Em relação ao consumo de combustíveis fósseis nos aeroportos, foram considerados dados das faturas de combustível da Infraero, que representam os seguintes consumos: carros e caminhões de apoio servindo ao aeroporto, geradores de energia de emergência à diesel, treinamentos com simulação de fogo, veículos de apoio às aeronaves. Da mesma forma dos demais dados coletados, para o consumo de combustível foi considerada, por aeroporto, a média anual referente ao período entre 2016 a 2018, conforme Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Consumo de Combustíveis Fósseis nos aeroportos

Grupo	Código ICAO	Aeroportos (DMUs)	Média Consumo 2016-2018 (litros)	
			Gasolina	Diesel
Especial	SBSP	Aeroporto de Congonhas	6264.66	97238.46
Especial	SBRJ	Aeroporto Santos-Dumont	7502.75	72138.49
Especial	SBRF	Aeroporto Internacional de Recife	6160.12	77276.66
Especial	SBCT	Aeroporto Internacional de Curitiba	5964.87	22787.22
1	SBBE	Aeroporto Internacional de Belém	4401.39	20746.37
1	SBGO	Aeroporto de Goiânia	3152.78	23913.27
1	SBVT	Aeroporto Internacional de Vitória	1861.66	32678.27
1	SBCY	Aeroporto Internacional de Cuiabá	1613.87	16112.09
Especial	SBEG	Aeroporto Internacional de Manaus	6233.36	34912.64
2	SBFI	Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu	1769.24	12437.05
2	SBMO	Aeroporto Internacional de Maceió	2034.23	19379.01
2	SBNF	Aeroporto Internacional de Navegantes	950.49	11248.31
2	SBSL	Aeroporto Internacional de São Luís	981.59	22096.08
2	SBCG	Aeroporto Internacional de Campo Grande	1063.37	17409.58
2	SBJP	Aeroporto Internacional de João Pessoa	987.43	13357.03
2	SBAR	Aeroporto de Aracaju	636.23	8761.49
3	SBUL	Aeroporto de Uberlândia	1641.60	27344.25
3	SBTE	Aeroporto de Teresina	1587.55	11611.12
2	SBLO	Aeroporto de Londrina	813.08	10400.10
3	SBPV	Aeroporto Internacional de Porto Velho	656.07	4011.23
3	SBPJ	Aeroporto de Palmas	1976.30	10694.92
3	SBMQ	Aeroporto Internacional de Macapá	1141.74	15439.86
3	SBJV	Aeroporto de Joinville	689.56	9711.15
3	SBSN	Aeroporto Internacional de Santarém	1016.01	12129.32
3	SBPL	Aeroporto Internacional de Petrolina	871.23	7923.22
3	SBBV	Aeroporto Internacional de Boa Vista	1001.50	10642.26
3	SBRB	Aeroporto de Rio Branco	737.85	13766.56
3	SBIZ	Aeroporto de Imperatriz	1223.76	14836.87
3	SBMA	Aeroporto de Marabá	1706.20	10539.57
3	SBMK	Aeroporto de Montes Claros	959.03	7191.43
2	SBBH	Aeroporto de Belo Horizonte	2547.95	25104.37

Com relação aos demais combustíveis consumidos pelos aeroportos, não foram considerados pois não representam menos de 1% dos combustíveis consumidos. À parte da Gasolina e do Diesel, nos aeroportos da amostra, o Biodiesel B20 (20% de biodiesel) é o combustível que possui o maior percentual de uso. Ainda assim, quando comparado diretamente com o consumo

do Diesel, a média do percentual do consumo de B20 é de 0.12%, conforme mostra a Figura 3.4.

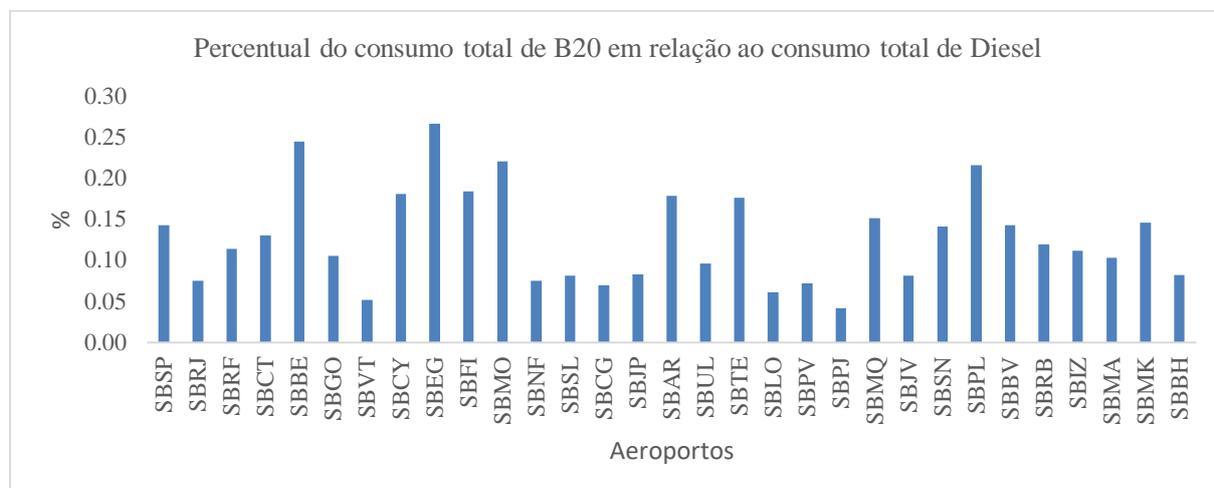


Figura 3: Consumo de B20 em relação ao consumo de Diesel.

Em complemento, em função das reduções de emissões inerentes ao biodiesel serem menores devido ao percentual de biocombustível e por terem um baixo percentual na contribuição do consumo energético nos aeroportos, não foram considerados o B20 nem demais combustíveis como GNV, B500 e S10, que possuem usos ainda menores do que o do B20.

Com relação às variáveis de infraestrutura dos aeroportos selecionados, que serão modeladas como *inputs* de acordo com premissas observadas nos estudos discutidos na revisão da literatura (vide Tabela 2.7), a Tabela 3.6 traz os dados coletados através do site oficial da Infraero (INFRAERO, 2018).

Tabela 3.6: Variáveis de infraestrutura dos aeroportos da amostra.

Aeroportos	Área do Terminal (m ²)	Posições	Tamanho de Pista (m)
SBSP - Aeroporto de Congonhas	64579	29	1940
SBRJ - Aeroporto Santos-Dumont	61000	20	1323
SBRF - Aeroporto Internacional de Recife	52000	21	3007
SBCT - Aeroporto Internacional de Curitiba	112433	26	2218
SBBE - Aeroporto Internacional de Belém	33255	12	2800
SBGO - Aeroporto de Goiânia	34100	10	2500
SBVT - Aeroporto Internacional de Vitória	29556	19	1750
SBCY - Aeroporto Internacional de Cuiabá	5600	17	2300
SBEG - Aeroporto Internacional de Manaus	18000	14	2700

SBFI - Aeroporto Internacional de Foz do Iguaçu	24188	18	2195
SBMO - Aeroporto Internacional de Maceió	22000	23	2606
SBNF - Aeroporto Internacional de Navegantes	5200	12	1701
SBSL - Aeroporto Internacional de São Luís	10700	27	2385
SBCG - Aeroporto Internacional de Campo Grande	7215	23	2600
SBJP - Aeroporto Internacional de João Pessoa	9090	9	2515
SBAR - Aeroporto de Aracaju	9321	11	2200
SBUL - Aeroporto de Uberlândia	4733	14	2100
SBTE - Aeroporto de Teresina	4414	5	2200
SBLO - Aeroporto de Londrina	40293	15	2100
SBPV - Aeroporto Internacional de Porto Velho	7875	3	2400
SBPJ - Aeroporto de Palmas	12331	20	2500
SBMQ - Aeroporto Internacional de Macapá	5382	25	1800
SBJV - Aeroporto de Joinville	4000	9	1640
SBSN - Aeroporto Internacional de Santarém	1982	32	2400
SBPL - Aeroporto Internacional de Petrolina	3093	13	3250
SBBV - Aeroporto Internacional de Boa Vista	4798	7	2700
SBRB - Aeroporto de Rio Branco	4292	18	2158
SBIZ - Aeroporto de Imperatriz	2164	10	1798
SBMA - Aeroporto de Marabá	1011	15	2000
SBMK - Aeroporto de Montes Claros	733	5	2100
SBBH - Aeroporto de Belo Horizonte	4629	51	2364

Fonte: Infraero (2018).

3.3.2 AERONAVES

Para estimar as emissões relativas ao movimento de aeronaves, foi considerado o movimento de aeronaves durante o ciclo LTO (*Landing and Take-Off*) correspondente ao percurso que as aeronaves realizam durante o procedimento de pouso e decolagem até a altura de 3000 pés (914 metros). Os dados dos modelos de aeronaves foram obtidos através dos registros em sistemas de banco de dados de operações da Infraero (OPNET e SETADTA), para cada aeroporto, para os anos de 2016 a 2018 (dados não disponíveis na internet).

Como exemplo dos dados de aeronaves coletados para cada aeroporto, a Tabela 3.7 mostra os dados referentes ao Aeroporto de Vitória em 2018, onde percebe-se a predominância de aeronaves de fuselagem estreita, os chamados *narrowbody*, como o Airbus A320, Boeing 737-800 e Embraer 190. Além destes, o helicóptero modelo Sikorsky S-76 teve o maior movimento no aeroporto no ano de 2018. Para utilização no modelo DEA, foram considerados os percentuais médios de 2016 a 2018 de cada aeronave.

Tabela 3.7: Modelos de aeronaves para o ano de 2018 do Aeroporto de Vitória – SBVT.

Pos.	Aeronave	Percentual	Decolagens	Pousos
1°	S76	20.38%	4328	4326
2°	A320	16.91%	3611	3646
3°	B738	14.32%	3092	3055
4°	E190	11.22%	2051	2763
5°	E195	7.71%	2012	1299
6°	B737	6.59%	1398	1432
7°	A319	3.65%	798	767
8°	R44	1.47%	312	316
9°	SR22	1.43%	308	306
10°	BE58	1.34%	291	285
11°	BE9L	1.05%	225	224
12°	B722	0.93%	200	200
13°	PA34	0.9%	194	190
14°	C152	0.83%	66	67
15°	R66	0.8%	175	168
16°	AS50	0.76%	164	163
17°	A139	0.69%	146	150
18°	E50P	0.65%	141	140
19°	P46T	0.59%	127	128
20°	C525	0.5%	107	107
21°	BE20	0.49%	106	106
22°	E110	0.4%	85	85
23°	B06	0.39%	84	85
24°	TBM7	0.37%	80	80
25°	C210	0.33%	70	70
26°	C208	0.32%	69	69
27°	C510	0.32%	69	70
28°	RV10	0.32%	70	67
29°	EC45	0.24%	50	41
30°	B763	0.24%	45	56
31°	B734	0.23%	49	49
32°	C172	0.22%	17	17
33°	AC90	0.22%	46	47
34°	PA46	0.21%	43	43
35°	AT72	0.2%	44	43
36°	ULAC	0.2%	33	32
37°	H25B	0.19%	41	41
38°	BE36	0.18%	39	39
39°	P28A	0.16%	17	16
40°	EC25	0.15%	32	32
41°	PAY3	0.14%	31	31
42°	SK76	0.14%	33	26
43°	E55P	0.14%	29	29
44°	P28T	0.13%	28	29
45°	C25B	0.12%	26	26
46°	C56X	0.11%	23	23
47°	AC50	0.09%	20	20
48°	PRM1	0.09%	20	20

49°	E135	0.09%	20	19
50°	P28R	0.09%	19	19
51°	R22	0.08%	17	19
52°	DA62	0.08%	14	20
53°	PC12	0.07%	16	16
54°	C550	0.07%	14	14
55°	PA31	0.07%	14	14
56°	MU2	0.07%	14	14
57°	A109	0.06%	12	12
58°	E121	0.06%	12	12
59°	SR20	0.04%	9	10
60°	C25A	0.04%	9	9
61°	B429	0.04%	9	9
62°	C295	0.04%	9	9
63°	LJ31	0.04%	8	8
64°	E550	0.03%	7	7
65°	E120	0.03%	7	7
66°	BE40	0.03%	7	7
67°	C650	0.03%	7	7
68°	C182	0.03%	7	7
69°	B407	0.03%	7	7
70°	EC35	0.03%	6	7
71°	GLEX	0.03%	6	6
72°	LJ35	0.03%	6	6
73°	B767	0.03%	11	0
74°	AB11	0.02%	4	4
75°	EC55	0.02%	4	5
76°	LJ45	0.02%	4	4
77°	C180	0.02%	4	4
78°	AS65	0.02%	4	4
79°	BE9T	0.02%	4	4
80°	LJ40	0.02%	4	4
81°	E145	0.02%	4	4
82°	EC30	0.02%	4	4
83°	C25C	0.02%	4	4
84°	C310	0.01%	3	3
85°	G150	0.01%	3	3
86°	GLF6	0.01%	3	3
87°	C95	0.01%	3	3
88°	H269	0.01%	2	1
89°	BE35	0.01%	2	2
90°	C750	0.01%	2	2
91°	CL60	0.01%	2	2
92°	BE33	0.01%	2	2
93°	C680	0.01%	2	2
94°	E711	0.01%	2	2
95°	B38M	0.01%	3	1
96°	F2TH	0.01%	2	2
97°	AS55	0.01%	2	2
98°	E810	0.01%	2	2
99°	PA27	0.01%	2	2

100°	C72R	0.01%	2	2
101°	CL35	0.01%	2	2
102°	C500	0.01%	2	2
103°	E720	0.01%	2	2
104°	B505	0.01%	2	1
105°	B739	0.01%	0	3
106°	FA7X	0.01%	1	2
107°	WW24	0%	1	1
108°	PAY2	0%	1	1
109°	GL5T	0%	1	1
110°	E55	0%	1	1
111°	LJ60	0%	1	1
112°	AT3T	0%	1	1
113°	AT76	0%	0	2
114°	DA50	0%	1	1
115°	C206	0%	1	1
116°	GLF4	0%	1	1
117°	H60	0%	1	1
118°	BE23	0%	1	1
119°	CL30	0%	1	1
120°	A318	0%	1	1
121°	DAL2	0%	1	1
122°	PAT4	0%	1	1
123°	BE55	0%	1	1
124°	M20P	0%	1	1
125°	BE30	0%	1	1
126°	HDJT	0%	1	1
127°	G280	0%	1	1
128°	C560	0%	1	1
129°	E35L	0%	1	1
130°	TUCA	0%	1	1
131°	PAY1	0%	1	1
132°	FA10	0%	1	1
133°	B350	0%	1	1
134°	FA8X	0%	1	0
135°	1607	0%	1	0
136°	EC05	0%	1	0
137°	B58	0%	0	1
138°	EC15	0%	1	0
139°	DA46	0%	0	1
140°	190	0%	1	0
141°	B06L	0%	1	0
142°	A380	0%	1	0
143°	PA43	0%	0	1
144°	B378	0%	1	0
145°	E130	0%	1	0
146°	SS2T	0%	1	0
147°	H36	0%	0	1
148°	B73	0%	0	1
149°	AR44	0%	1	0
150°	R33	0%	1	0

151°	SBGL	0%	0	1
152°	E650	0%	0	1
153°	P46	0%	1	0
154°	HU30	0%	0	0
155°	B73H	0%	0	1
156°	GLO	0%	0	1
157°	BK11	0%	0	0
158°	EC50	0%	0	1
159°	EC20	0%	0	1
160°	B7M8	0%	0	1
161°	R444	0%	0	1
162°	BK17	0%	0	1
163°	C130	0%	0	1
164°	SS2R	0%	0	1
165°	C52	0%	0	1

Dessa forma, os modelos de aeronaves são identificados em função de sua sigla, conforme Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Exemplo de identificação de aeronaves.

Sigla aeronave	Modelo
A320	AirBus A-320
B738	Boeing 737-800
E190	Embraer - 190
E195	Embraer - 195
B737	Boeing -737
A319	Airbus - A319

Com base na identificação dos modelos das aeronaves que operaram nos 31 aeroportos da amostra entre 2016 e 2018 e utilizando o percentual médio para cada aeroporto, foi possível realizar o cálculo da estimativa de emissão de CO₂, CO e NO_x para cada aeronave, que somadas, resultam na emissão associada ao aeroporto correspondente. Para os cálculos são considerados os fatores de emissão e de consumo de combustível para cada modelo de aeronave, que possui um motor padrão associado. Os detalhes da estimativa serão apresentados nos itens a seguir.

3.4 CÁLCULO DA ESTIMATIVA DE EMISSÕES DE CO₂ E POLUENTES E DE INDICADORES

Nessa seção são mostrados os cálculos e transformações unitárias realizadas nos dados coletados, de forma a permitir o seu uso no modelo DEA. Foram realizadas as estimativas para

as emissões de CO₂, CO e NO_x relativas ao consumo energético total dos 31 aeroportos brasileiros da amostra, considerando os valores médios entre os anos de 2016 a 2018. Em complemento, são apresentados todos os fatores de emissão utilizados na pesquisa. A Figura 3.5 mostra a sequência lógica dos procedimentos adotados para os cálculos das estimativas das emissões tanto para aeroportos quanto para aeronaves, bem como as fontes de dados utilizadas.

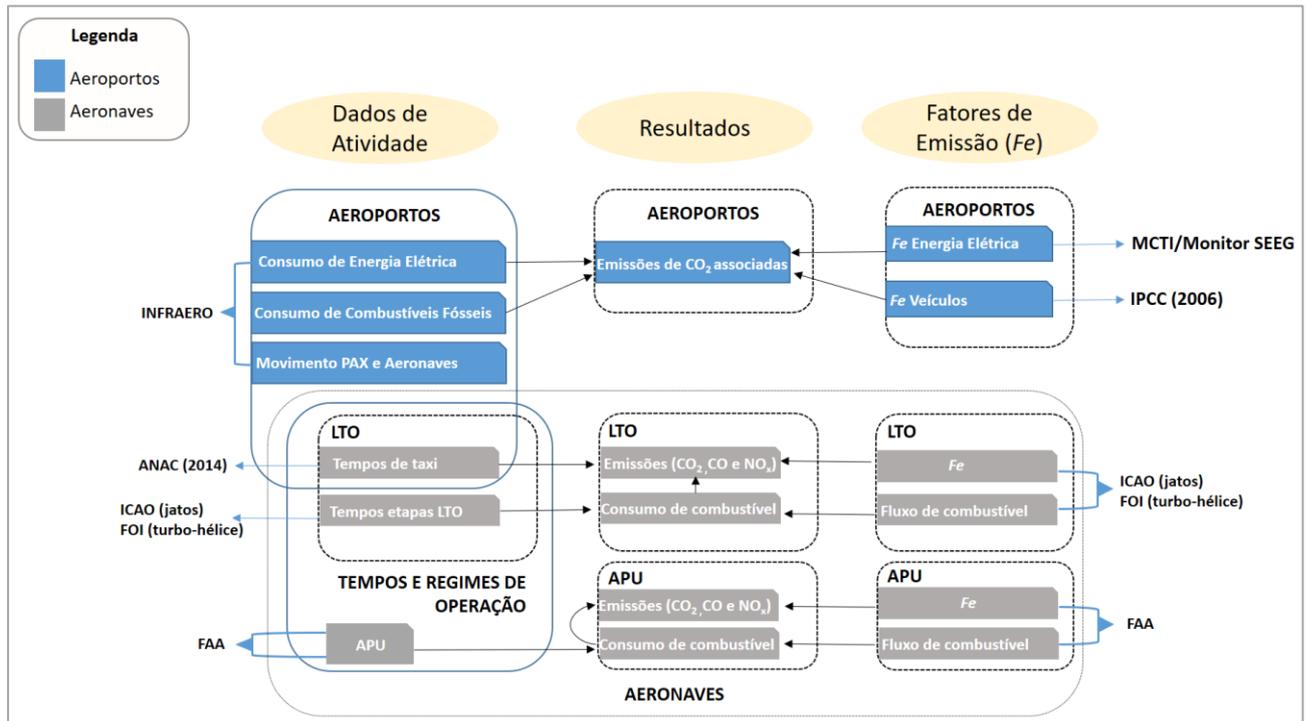


Figura 3.5: Procedimentos adotados e fontes de informação para estimar as emissões de aeroportos e aeronaves (metodologia Tier 3A).

3.4.1 EMISSÕES DE CO₂ DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA DOS AEROPORTOS

Para as emissões de CO₂ associadas ao consumo de energia elétrica dos aeroportos, foi necessário identificar o fator de emissão adequado. O site do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC, 2018) divulga de maneira permanente os fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) do Brasil. Nele, o fator é dado em toneladas de CO₂ por MWh, e calcula a média das emissões da geração, levando em consideração todas as usinas que estão gerando energia e não somente aquelas que estejam funcionando na margem. Conforme recomendação do Programa Brasileiro GHG Protocol, em caso de indisponibilidade de fatores de emissão específicos por fonte ou fornecedor para a energia adquirida, as organizações devem utilizar fatores de emissão regionais ou da rede elétrica.

Logo, como a amostra de aeroportos encontra-se em estados diferentes, em que pese o sistema de energia seja interligado, existem diferenças, ainda que diminutas, entre um fator de emissão nacional para todo o sistema elétrico e fatores de emissões regionalizados. Portanto, buscou-se uma forma de regionalizar os fatores de emissão através dos dados disponibilizados pela plataforma denominada Monitor Elétrico do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Esta é uma ferramenta de informação qualificada e com atualização diária sobre a composição da matriz elétrica brasileira e suas emissões de gases de efeito estufa (SEEG, 2019), que, devido aos dados diários e segregados por região, é possível estimar fatores de emissão regionalizados. As estimativas do SEEG Monitor Elétrico abrangem a geração de eletricidade e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) de forma segregada por região, o que permitiu a subdivisão em 4 regiões, a saber: Norte, Nordeste, Sul e Sudeste/Centro-Oeste.

Portanto, com base nos dados de geração de energia para cada uma das regiões supracitadas, bem como das suas emissões de CO₂ associadas, foram estimados os fatores de emissão de CO₂. Para validação dos fatores de emissão calculados para cada região do país, foi avaliado o coeficiente de correlação (Pearson) entre os dados do Monitor SEEG e dados do MCTIC, apresentando valor de $r = 0,9383$ indicando uma forte correlação entre ambas as fontes de dados. Dessa forma, foram utilizados os fatores de emissão obtidos a partir do banco de dados do Monitor SEEG (SEEG, 2019), segregados por região, conforme Tabela 3.9.

Tabela 3.9: Fatores de emissão de CO₂ da geração de energia elétrica regionalizados.

Região	Fator de Emissão de CO ₂ de geração de energia elétrica (tCO ₂ /MWh)		
	2016	2017	2018
Norte	0.07663	0.09410	0.07697
Nordeste	0.07660	0.09412	0.07694
Sul	0.07660	0.09418	0.07701
Sudeste/Centro Oeste	0.07661	0.09417	0.07707

Fonte: Adaptado de SEEG (2019).

Para o ano de 2017 cabe ressaltar o aumento de cerca de 18% no fator de emissão de CO₂, que se deu pelo maior acionamento de usinas termelétricas no país recomendado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em função dos baixos níveis dos reservatórios responsáveis pelo funcionamento das usinas hidrelétricas de abastecimento energético. As emissões de CO₂ pelo consumo de energia elétrica dos aeroportos foram estimadas de acordo com a Equação 3.1 a seguir.

$$EM = CEE * FE_{regional} \quad (3.1)$$

Onde:

EM = Emissões CO₂ (ton)

CEE = Consumo de energia elétrica (MWh)

$FE_{Regional}$ = Fator de conversão (tCO₂/MWh)

Portanto, para cada ano entre 2016 e 2018 e por aeroporto, foram calculadas as estimativas de emissões com base na Equação 3.1 e o valor médio de cada aeroporto foi considerado para inserção no modelo DEA.

3.4.2 EMISSÕES DE CO₂ DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS DOS AEROPORTOS

Para o cálculo da estimativa das emissões de CO₂ pela queima de combustíveis fósseis nos aeroportos, foi utilizada a metodologia indicada pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (2006). Nele, são apresentadas duas abordagens distintas para a contabilização das emissões da queima de combustíveis, que são denominadas *top-down* e *bottom-up*. Segundo o IPCC (2006) as emissões de CO₂ são melhor calculadas com base na quantidade e tipo de combustível queimado e seu teor de carbono, sendo essa abordagem metodológica chamada de *top-down*. Essa abordagem prevê a contabilização das emissões de GEE pela queima dos principais combustíveis fósseis sem diferenciação de como e onde são utilizados. Já a abordagem *bottom-up*, ou abordagem setorial, quantifica as emissões de GEE para cada setor de consumo dos combustíveis com finalidades energéticas, levando-se em consideração características específicas de cada setor.

Ainda de acordo com o IPCC (2006), exceto em casos raros (por exemplo, onde há contrabando em larga escala de combustível) a abordagem *top-down* é mais confiável para a estimativa de Gases de Efeito Estufa (GEE), sendo também a metodologia mais simples de ser realizada. Em complemento, as emissões de GEE podem ser estimadas com base no consumo de combustível ou na distância percorrida por tipo de veículo. Em geral, a primeira abordagem é mais apropriada para estimar as emissões de CO₂ e a segunda, para estimar as emissões de CH₄ e N₂O.

Portanto, no presente trabalho foi escolhida a abordagem *top-down* em função da disponibilidade de dados de consumo de combustível para os aeroportos da amostra, sem distinção dos veículos e equipamentos que os consumiram.

Nos aeroportos, a gasolina é comumente utilizada em veículos de inspeção, em carros oficiais e em veículos de apoio à aeronave em solo. O consumo de combustível utilizado para quantificar as emissões de CO₂ refere-se ao consumo aparente de combustível pelos aeroportos, que implica assumir que a média do combustível comercializado entre o período de 2016 a 2018 é consumido em sua totalidade, não sendo considerados estoques eventualmente remanescentes de um ano para outro. O IPCC (2006) apresenta três graus de detalhamento (*Tiers*) da metodologia de cálculo das emissões por veículos móveis. O método do *Tier 1* é baseado nas quantidades de combustíveis e fatores de emissão médios padrão. O *Tier 2* também se baseia nas quantidades de combustíveis, mas utiliza fatores de emissão específicos locais. Já o *Tier 3* utiliza modelos detalhados de emissão. Portanto, foi utilizado o *Tier 1* em função da disponibilidade limitada de dados. A Equação 3.2 a seguir detalha o primeiro passo para o cálculo estimativo das emissões de CO₂ por combustíveis fósseis em aeroportos: o valor do consumo de combustível em unidade de energia (TJ).

$$CE = CU * F_{conv} \quad (3.2)$$

Onde:

CE = Consumo de energia (TJ)

CU = Consumo de combustível (litros)

F_{conv} = Fator de conversão (TJ/litros)

A Tabela 3.10 mostra os fatores de conversão utilizados, já considerando o poder calorífico de cada combustível.

Tabela 3.10: Fatores de Conversão.

Tipo de Combustível	Fator de Conversão (TJ/l)
Gasolina	0,00003224
Diesel	0,00003550

Fonte: Balanço Energético Nacional 2018 / Ano Base 2017 (valores convertidos para as unidades utilizadas).

Uma vez estimados os valores do consumo de gasolina e diesel em unidade de energia (TJ), que é a mesma unidade dos fatores de emissão do IPCC (2016), foram estimadas as emissões de CO₂ para cada um dos combustíveis através da Equação 3.3 a seguir.

$$E_{CO_2} = CE * FE \quad (3.3)$$

Onde:

E_{CO_2} = Emissões de CO₂ (tCO₂/ano)

CE = Consumo de combustível no aeroporto em unidade de energia (TJ)

FE = Fator de emissão do combustível (t/TJ)

Os fatores de emissão utilizados para estimar as emissões de CO₂ do consumo de gasolina e óleo diesel dos aeroportos foram os valores padrão do IPCC (2006), os quais são baseados no tipo e conteúdo de carbono dos combustíveis. Estes fatores estão dispostos na Tabela 3.11.

Tabela 3.11: Fatores de emissão

Tipo de Combustível	Fator de Emissão (tCO ₂ /TJ)
Gasolina	69,30
Diesel	74,10

Fonte: 2006 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 2/ Energy*. (IPCC,2016).

Dessa forma, com base nos consumos energéticos dos combustíveis fósseis foi possível quantificar a contribuição estimada das emissões de CO₂ para cada aeroporto da amostra. Ressalta-se que, conforme discutido na revisão da literatura desta pesquisa (Capítulo 2), há sempre incertezas associadas ao levantamento de dados em aeroportos, mas a premissa deste trabalho é que os valores sejam valores reais, pois são oriundos do sistema de pagamento de combustíveis, ou seja, assumiu-se que os combustíveis foram consumidos pelos equipamentos da Infraero, representando as emissões de Escopo 1, ainda que existam outras fontes emissões (de menor contribuição) de mesmo escopo que foram desconsideradas desta análise, conforme discutido no item 3.3.1.

3.4.3 EMISSÕES DE CO₂, CO e NO_x DAS AERONAVES

Para o cálculo das emissões do ciclo LTO e APU das aeronaves dos aeroportos da amostra, foi utilizado como referência os *Guidelides* recomendados pelo IPCC especificamente para o desenvolvimento de inventários de emissões do setor aéreo. Tais protocolos definem *Tiers*, que são níveis de detalhamento do mapeamento de emissões: quanto maior o *Tier*, mais detalhada a metodologia e maior precisão de resultados. Conseqüentemente, maiores também serão a complexidade dos cálculos e a quantidade e detalhamento das informações de entrada. O método *Tier 3A* tem por base informações mais detalhadas de cada voo, dos aeroportos aeródromos e do modelo da aeronave, e foi o método utilizado para as estimativas das emissões de aeronaves no presente trabalho. Cabe ressaltar que foram estimadas apenas as emissões referentes ao ciclo LTO do *Tier 3A*, pois não faz parte do escopo desta pesquisa a estimativa de emissões de voos em cruzeiro. Conforme apresentado na revisão da literatura (Capítulo 2 desta pesquisa), o ciclo LTO é decomposto em 6 fases, conforme Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Fases e Etapas do ciclo de pouso e decolagem das aeronaves (LTO)

Fase	Etapa
Partida	Taxi de partida (<i>Taxi out</i>)
	Decolagem (<i>Take off</i>)
	Início da subida para cruzeiro (<i>Climb out</i>)
Chegada	Aproximação final (<i>Final approach</i>)
	Toque e corrida de desaceleração (<i>Landing</i>)
	Taxi de chegada (<i>Taxi in</i>)

Logo, para cada aeroporto, foram calculadas as emissões por fase do ciclo LTO a partir do combustível consumido em cada uma delas. Por sua vez, o consumo de combustível em cada fase é função do modelo e do número de motores da aeronave e, por fim, o fluxo de combustível é função do regime de potência dos motores nas fases. Para a estimativa também é considerado o tempo de duração de cada fase. Portanto, o cálculo resultando nas Equações 3.4 e 3.5.

$$C_{a,f,p} = nM_a \times Fc_{a,f} \times t_{a,f,p} \quad (3.4)$$

$$E_{g,a,f,p} = Fe_{g,a,f} \times C_{a,f,p} \quad (3.5)$$

Onde:

$C_{a,f,p}$ é o consumo de combustível da aeronave a , expresso em kg, para cada f no aeroporto p ;
 nM_a é o número de motores da aeronave a ;

$F_{C_{a,f}}$ é o fluxo de combustível, em kg/s, de cada motor da aeronave a , na fase f ;
 $t_{a,f,p}$ é o tempo, em segundos, que a aeronave a permanece na fase f no aeroporto p ;
 $E_{g,a,f,p}$ é a emissão, expressa em kg, do gás g pela aeronave a na fase f no aeroporto p ;
 $Fe_{g,a,f}$ é o fator de emissão do gás g , em $Kg_{gás} / Kg_{combustível}$ da aeronave a na fase f .

Para utilização como um dos *outputs* indesejáveis em cenário específico da modelagem DEA (a ser descrito no item 3.5.2) para cada aeroporto (DMU) foram calculadas as estimativas das emissões do ciclo LTO para os poluentes NO_x e CO, e gás CO₂, para os anos de 2016 a 2018.

Em relação às aeronaves, as fases de decolagem (*take off*) e de subida até 3.000 pés (*climb out*) são responsáveis pela maior contribuição de CO₂ e NO_x, pois em tais etapas os motores principais das aeronaves operam com alta potência, melhorando a eficiência da combustão, o que reduz a emissão de subprodutos poluentes como o CO e compostos orgânicos do combustível que não-queimados. Por sua vez, as maiores emissões de CO em aeroportos ocorrem durante as etapas de taxiamento (*taxi in* e *taxi out*) das aeronaves, quando o motor opera com baixa potência e baixa eficiência na combustão.

Diferentemente dos motores das aeronaves, as APUs não são certificadas e, uma vez que seus fabricantes consideram os dados de emissão como sua propriedade, esses não são divulgados amplamente. A metodologia de cálculo apresentada no *Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APUs and Alternative Systems* (ACRP, 2012) foi utilizada como base para a elaboração das estimativas apresentadas de consumo de combustível e de emissões das APUs. De forma similar às estimativas para as emissões das fases do ciclo LTO, o consumo de combustível é estimado a partir do tempo de uso da APU e do fluxo de combustível. Após o cálculo desse consumo, foram estimadas as emissões a partir de fatores de emissão específicos para CO₂, NO_x e CO. As Equações 3.6 e 3.7 representam a maneira como essas estimativas foram realizadas:

$$C_{a,f} = F_{C_{a,f}} \times t_{a,f} \quad (3.6)$$

$$E_{g,a,f} = Fe_{g,a,f} \times C_{a,f} \quad (3.7)$$

$C_{a,f}$ é o consumo de combustível da APU na aeronave a , na fase de uso f ;
 $F_{C_{a,f}}$ é o fluxo de combustível, em kg/s, de cada APU na aeronave a , na fase de uso f ;
 $t_{a,f}$ é o tempo, em segundos, que a unidade APU é usada na aeronave a , na fase de uso f ;
 $E_{g,a,f}$ é a emissão, expressa em kg, do gás g pela aeronave a na fase de uso f ;
 $Fe_{g,a,f}$ é o fator de emissão do gás g , em $Kg_{gás} / Kg_{combustível}$ da aeronave a na fase de uso f .

3.4.3.1 REGIMES E TEMPOS DE OPERAÇÃO

Para as estimativas de emissões das aeronaves são necessários dados de regimes e tempos de operação das mesmas, o que pode variar de aeroporto para aeroporto, além de variar entre as aeronaves devido às suas especificações.

Para os tempos em cada fase do ciclo LTO, foram utilizados os tempos fornecidos pela ICAO e a FOI (*Swedish Defence Research Agency*), que sugerem tempos médios para cada etapa do ciclo LTO para aeronaves a jato e a turboélice, respectivamente. Como parte das campanhas de certificação de motores, os valores do fluxo de combustível (kg/s) e emissões (em g/Kg_{combustível}) são medidos nos regimes de potência 7%, 30%, 85% e 100%, de acordo com a operação. Os tempos de *Take off*, *Climb* e *Approach* estão apresentados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13: Tempos por fase do ciclo LTO.

Fase	Jato			Turboélice		
	Tempo (min)	Regime de Potência	Fonte	Tempo (min)	Regime de Potência	Fonte
<i>Approach</i>	4,0	30%	ICAO	4,5	30%	FOI
<i>Taxi in</i>	7,0	7%	ICAO	7,0	7%	ICAO
<i>Taxi out</i>	19,0	7%	ICAO	19,0	7%	ICAO
<i>Take off</i>	0,7	100%	ICAO	0,5	100%	FOI
<i>Climb</i>	2,2	85%	ICAO	2,5	85%	FOI

Os tempos de taxiamento das aeronaves dependem das características dos aeroportos, devido ao número de pistas de pouso e decolagem, de *taxiways* e de possíveis restrições operacionais específicas para cada aeroporto. Portanto, devem ser utilizados tempos específicos para os aeroportos da amostra ao invés dos tempos sugeridos para aeroportos do exterior conforme Tabela 3.13. Para estimar os tempos de taxiamento dos aeroportos da amostra foram utilizados os valores referenciados pela ANAC (2014) e, para os aeroportos que do grupo 3, geralmente de pequeno porte, foi considerado um tempo médio de *taxi in* de 5 minutos e de 3 minutos para *taxi out*, também de acordo com recomendação da ANAC (2014). A Tabela 3.14 a seguir mostra os valores utilizados:

Tabela 3.14: Tempos de taxiamento utilizados por aeroporto.

Grupo	Aeroporto (Código ICAO)	Taxi in (min)	Taxi out (min)
Especial	SBSP	4.4	12.7
Especial	SBRJ	4.4	11.1
Especial	SBRF	3.6	10.8
Especial	SBCT	4.2	10.8
1	SBBE	4.8	8.7
1	SBGO	4.5	8.6
1	SBVT	4.0	9.9
1	SBCY	3.3	9.2
Especial	SBEG	4.9	10.1
2	SBFI	3.2	7.5
2	SBMO	4.5	8.1
2	SBNF	3.4	7.1
2	SBSL	4.0	9.5
2	SBCG	4.2	10.0
2	SBJP	3.7	7.2
2	SBAR	4.5	7.3
3	SBUL	5	3
3	SBTE	5	3
2	SBLO	4.3	7.1
3	SBPV	5	3
3	SBPJ	5	3
3	SBMQ	5	3
3	SBJV	5	3
3	SBSN	5	3
3	SBPL	5	3
3	SBBV	5	3
3	SBRB	5	3
3	SBIZ	5	3
3	SBMA	5	3
3	SBMK	5	3
2	SBBH	3.1	7.4

Fonte: Adaptado de ANAC (2014)

Com relação às emissões da unidade auxiliar de potência (APU), segundo a ICAO (2011), a sua operação é dividida em quatro fases distintas, que correspondem ao uso da unidade a cada ciclo LTO realizado pela aeronave. Os quatro modos de operação (fases) são descritos a seguir:

- Partida da APU: condição de uso sem carga;
- *Gate-out*: funcionamento normal da APU para embarque de passageiros;
- *Main Engine Start* (MES): funcionamento com carga alta para a partida dos motores principais, condição que exige a máxima potência da unidade;
- *Gate-in*: funcionamento normal da APU para desembarque de passageiros.

O tempo efetivo que cada aeronave passa no *gate* varia de forma considerável conforme o tipo de aeronave, o aeroporto e a necessidade de combustível requerido para a próxima movimentação (ANAC,2014). Como referência dos valores a serem considerados foi utilizado o documento *Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APUs and Alternative Systems* (ACRP, 2012) que apresenta valores padrão para os tempos de cada fase. Neste documento, as aeronaves são classificadas em cinco categorias: *narrow body* (aeronave de fuselagem estreita), *wide body* (aeronave de fuselagem larga), *jumbo-wide body* (aeronaves do tipo jumbo, de fuselagem larga), *regional jet* (jatos regionais) e *turbo-prop* (turboélices). Alguns exemplos de aeronaves e suas classificações conforme as cinco categorias usadas no cálculo das emissões de APUs são apresentados na Tabela 3.15 a seguir.

Tabela 3.15: Classificação de aeronaves para cálculo das emissões de APU.

Categoria da aeronave	Exemplos de aeronaves
Fuselagem estreita	Boeing 737-700 Series, Boeing MD-80 Series, Airbus A320 Series, Boeing 757- 200 Series, Airbus A319-100 Series, Boeing 737-800 Series, Boeing 737-300 Series, Boeing 717-200 Series, Embraer ERJ170, Embraer ERJ175.
Fuselagem larga	Boeing 767-300 Series, Boeing 777-200 Series, Airbus A300B/C/F-600 Series, Boeing 767-200 Series, Boeing 767-400, Airbus A310- 200 Series, Boeing 777- 300 Series, Airbus A300B/C/F Series, Airbus A310-300 Series, Boeing 787-300 Series.
Fuselagem larga (jumbo)	Boeing 747-400 Series, Airbus A330-200 Series, Airbus A340-200 Series, Boeing 747- 200/300 Series, Airbus A330-300 Series, Airbus A340-600 Series, Airbus A340-300 Series, Airbus A340-500 Series, Boeing 747- 100 Series, Air- bus A380 Series.
Jato regional	Bombardier CRJ-200/400, Embraer ERJ145, Bombardier CRJ-700, Bombardier CRJ-900, Embraer ERJ140, Bombardier CRJ-100, Embraer ERJ135, Dornier 328 Jet, BAE 146-100, BAE 146-200.
Turbo-hélices	DeHavilland DHC-8-400, DeHavilland DHC-8- 100, Embraer EMB120 Brasi- lia, DeHavilland DHC-8-300, DeHavilland DHC-8-200, Shorts 360-100 Series, DeHavilland DHC-7 Dash 7, Embraer EMB110 Bandeirante, Fokker F27- 100 Series, Fokker F27-200 Series.

Fonte: Adaptado de ACRP (2012).

Com relação aos tempos em cada modo de operação da APU, segundo a ANAC (2014), o tempo total médio de uso representativo para os aeroportos brasileiros é de aproximadamente 75 minutos, apresentando diferença significativa em relação ao tempo total padrão apresentado pela ICAO (entre 22 e 26 minutos). Portanto, para o presente estudo, assumiu-se que os tempos

padrão para as fases partida, *gate-out* e MES são representativos das condições dos aeroportos da amostra, sendo os tempos de *gate-in* ajustados de acordo com a ANAC (2014). A Tabela 3.16 a seguir apresenta os tempos utilizados nas estimativas.

Tabela 3.16: Tempos por fase de uso da APU.

Categoria da aeronave	Partida da APU (min)	<i>Gate-out</i> (min)	MES - partida dos motores (min)	<i>Gate-in</i> (min)	Tempo total de uso (min)
Fuselagem estreita	3.00	3.60	0.58	67.82	75.00
Fuselagem larga	3.00	3.60	0.58	67.82	75.00
Fuselagem larga (jumbo)	3.00	5.30	2.33	64.37	75.00
Jato regional	3.00	3.60	0.58	67.82	75.00
Turbo-hélices	3.00	3.60	0.58	67.82	75.00

Fonte: Adaptado de ANAC (2014).

3.4.3.2 FATORES DE EMISSÕES DAS AERONAVES

Os fatores de emissão de CO e NO_x (bem como o fluxo de combustível dos motores) foram retirados de bancos de dados amplamente utilizados para finalidade de estimativa de emissões de aeronaves, conforme Tabela 3.17.

Tabela 3: Fatores de Emissões de Aeronaves para CO e NO_x.

Banco de dados (Fonte)	Descrição	Fatores
<i>Emissions Databank</i> (ICAO)	Fatores de emissão de motores de aeronaves a jato em relação ao regime de potência do motor	CO, NO _x e fluxo de combustível
<i>Turboprop Engine Emissions Database</i> (<i>Luffartsverket- Swedish Civil Aviation Administration</i>)	Fatores de emissão de motores de aeronaves turboélice em relação ao regime de potência do motor	CO, NO _x e fluxo de combustível

Como observado, os fatores de emissão para motores a jato foram obtidos através do banco de dados da ICAO. Este banco de dados é disponibilizado na página da EASA (*European Aviation Safety Agency*) (EASA, 2018) e contém informações sobre as emissões dos motores nos regimes

de operação de 7%, 30%, 85% e 100% de potência. Quanto às aeronaves com motores turbo-hélice, os fatores de emissão são originários da *Turboprop Engine Emissions Database*. Essa base de dados foi compilada pelos fabricantes através da ICCAIA (*International Coordinating Council of Aerospace Industries Associations*) e fica sob a custódia da FOI (*Luftfartsverket Swedish Civil Aviation Administration*). O acesso a essa base é restrito, podendo ou não ser autorizada por meio de solicitação.

Como as tabelas dos bancos de dados utilizados apresentam as emissões por motor, foi necessário correlacionar as aeronaves da frota dos aeroportos amostrados com um dos motores. Desta forma, foi criada uma tabela de conversão do tipo de aeronave para o tipo de motor, além da posterior confirmação junto aos sites das companhias aéreas brasileiras, quando disponível. Nos casos de inexistência do motor da aeronave nos bancos de dados, este foi substituído pelo equipamento com tração nominal em kN (quilonewtons) mais próximo do motor real.

Como exemplo de fator de emissão utilizado, a Tabela 3.18 mostra os fatores de emissão de NO_x para 3 motores que equipam algumas das aeronaves mais comuns nos aeroportos brasileiros, a saber: Boeing 737-800 (motores CFM56-7B27); Embraer 195 (motores CF34) e ATR-72 (motores PW127).

Tabela 4: Exemplo de fatores de emissão de motores.

Motor	Fabricante	Força (kN)	NO _x (g/kg) em função do regime de potência				Fluxo de combustível (kg/s) em função do regime de potência			
			100%	85%	30%	7%	100%	85%	30%	7%
CFM56-7B27	CFM International	121.44	30.90	23.70	11.00	4.80	1.28	1.04	0.35	0.12
CF34-10A18	General Electric	82.1	19.47	16.72	8.26	3.58	0.826	0.684	0.232	0.086
PW127	Pratt & Whitney	345.9	23.26	17.94	11.46	6.25	0.67	0.55	0.19	0.07

Fonte: Adaptado de EASA (2018).

Para as estimativas das emissões das APU foram utilizados os fatores de emissões recomendados pela ANAC (2014), que são dados em função do tipo de aeronave e do regime de potência no qual ela está operando. Uma vez identificada a categoria da aeronave, a Tabela

3.19 apresenta o fluxo de combustível e os fatores de emissão para cada fase de utilização. Esses valores são utilizados nas Equações 3.6 e 3.7 nas estimativas das emissões das APU.

Tabela 3.19: Fluxo de Combustível e Fatores de Emissão das APUs.

Fase de utilização	Categoria da aeronave	Fluxo de combustível (kg QAV/s)	gCO/kgQAV	gNO _x /kgQAV
Partida da APU	Fuselagem estreita	0.021	31.75	5.45
	Fuselagem larga	0.035	10.26	7.55
	Fuselagem larga (jumbo)	0.033	9.38	7.41
	Jato regional	0.012	6.26	6.14
	Turboélices	0.012	6.26	6.14
	Fuselagem estreita	0.033	5.72	6.85
<i>Gate-in e gate-out</i>	Fuselagem larga	0.052	1.14	10.99
	Fuselagem larga (jumbo)	0.061	0.53	10.3
	Jato regional	0.019	6.47	4.93
	Turboélices	0.019	6.47	4.93
	Fuselagem estreita	0.038	4.94	7.64
MES	Fuselagem larga	0.064	0.98	11.53
	Fuselagem larga (jumbo)	0.058	0.53	11.2
	Jato regional	0.02	6.48	4.91
	Turbo-hélices	0.02	6.48	4.91

Fonte: Adaptado de ANAC (2014).

No que diz respeito às emissões de CO₂ dos motores principais e APUs das aeronaves, as estimativas foram feitas a partir de valores padrão de fator de emissão e poder calorífico para o querosene de aviação (QAV), conforme apresentados pelo IPCC (2006), sendo o fator de emissão dependente exclusivamente do tipo de combustível utilizado e de sua composição química, não variando conforme o regime de operação do motor. Para a densidade média, foram adotados os dados divulgados pela ANP (2014). Em função dos fatores de emissão do IPCC estarem apresentados em kg de gás por unidade de energia (kg/TJ), foi utilizado o poder calorífico, expresso em quantidade de energia por unidade de massa (TJ/Gg). Dessa forma, foram obtidos fatores de emissão expressos em kg de gás por kg de combustível utilizado. Assim, os valores utilizados para a estimativa das emissões de CO₂ estão apresentados na Tabela 3.20.

Tabela 3.20: Propriedades do QAV utilizadas nas estimativas da metodologia Tier 3A.

Combustível	Querosene de Aviação	Unidade	Fonte
Fator de emissão de CO ₂	71500	kgCO ₂ /TJQAv	IPCC 2006
Valor calorífico	44.1	TJ/Gg	IPCC 2006
Fator de emissão (massa) de CO ₂	3.15	kgCO ₂ /kgQAv	Calculado
Densidade média	0.799	kg/L	ANP 2014

3.4.4 CÁLCULO DOS INDICADORES DE CONSUMO DE ENERGIA E INTENSIDADE DE EMISSÕES DE CO₂

Com base na média de movimento de passageiros entre 2016 e 2018, bem como nas estimativas de emissões de CO₂ tanto pelo consumo médio de combustíveis dos aeroportos (escopo 1) quanto pelo consumo médio de energia elétrica (escopo 2) para o mesmo período, foi possível calcular os indicadores de emissões de CO₂ com base nos indicadores apresentados na revisão da literatura (Capítulo 2) oriundos do trabalho de Kilkiş e Kilkiş (2016). A Equação 3.8 demonstra o cálculo realizado para obtenção do indicador dos aeroportos brasileiros relativos ao consumo de energia em tonelada equivalente de petróleo (tep) por passageiros.

$$CE_{PAX} = (CE_{EE} + CE_{EF})/PAX \quad (3.8)$$

Onde:

CE_{PAX} = Consumo energético (tep/pax)

CE_{EE} = Consumo de energia elétrica (EE) (tep)

CE_{EF} = Consumo de energia fóssil (EF) (tep)

PAX = Média de movimento de passageiros entre 2016 e 2018

A Equação 3.9 demonstra o cálculo realizado para obtenção dos indicadores dos aeroportos brasileiros relativos às emissões de CO₂ por passageiros.

$$E_{CO_2/PAX} = (E_{E1} + E_{E2})/PAX \quad (3.9)$$

Onde:

$E_{CO_2/PAX}$ = Emissões de CO₂ por passageiro (tCO₂/pax)

E_{E1} = Emissões de CO₂ de Escopo 1 (combustíveis fósseis dos aeroportos)

E_{E2} = Emissões de CO₂ de Escopo 2 (emissões pelo consumo de energia elétrica)

PAX = Média de movimento de passageiros entre 2016 e 2018

A Equação 3.10 demonstra o cálculo realizado para obtenção dos indicadores dos aeroportos brasileiros relativos às emissões de CO₂ por unidade de consumo energético.

$$E_{CO_2/CE} = (E_{E1} + E_{E2}) / (CE_{EE} + CE_{EF}) \quad (3.10)$$

Onde:

$E_{CO_2/CE}$ = Emissões de CO₂ por unidade de consumo energético (tCO₂/tep)

E_{E1} = Emissões de CO₂ de Escopo 1 (combustíveis fósseis dos aeroportos) (tCO₂)

E_{E2} = Emissões de CO₂ de Escopo 2 (emissões pelo consumo de energia elétrica) (tCO₂)

CE_{EE} = Consumo de energia elétrica (EE) (tep)

CE_{EF} = Consumo de energia fóssil (EF) (tep)

3.5 ETAPA 3 - ANÁLISE POR ENVOLTÓRIA DE DADOS – DEA

Para avaliar os aeroportos sob o ponto de vista de o quão eficiente é o seu consumo energético considerando as emissões atmosféricas resultantes, o modelo DEA será utilizado tanto em sua forma tradicional (VRS - BCC) como em sua derivação de análise de folgas (*slacks*) SBM-DEA, modelo apropriado para tratamento de *outputs* indesejáveis, como é o caso das emissões atmosféricas associadas à operação dos aeroportos, conforme discutido no Capítulo 2 (Revisão da Literatura).

3.5.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS DO MODELO DEA

Como o objetivo da presente pesquisa é avaliar a eficiência carbono-energética de aeroportos brasileiros, deseja-se analisar a eficiência da infraestrutura dos aeroportos selecionados em converter o seu consumo energético total em movimento de passageiros e aeronaves considerando os níveis de emissões de CO₂ e de poluentes como uma externalidade negativa. Conforme mencionado no item 3.2, as variáveis foram selecionadas para utilização como *inputs* e *outputs* nos modelos DEA com base na revisão da literatura realizada no Capítulo 2 e na

disponibilidade de dados referentes à abordagem pretendida para a pesquisa. De início todas as variáveis coletadas e calculadas foram consideradas como potenciais variáveis de *input* e *output*, e estão descritas na Tabela 3.21.

Tabela 3.21: Banco de dados de variáveis de *input* e *output*.

Classificação	Variáveis (média do período 2016 a 2018)	Código utilizado
<i>Input</i>	*Consumo de Energia Elétrica (GJ)	*CEE
	*Consumo de Energia dos Combustíveis (GJ)	*CEC
	Consumo de Energia Total (GJ) (Energia Elétrica + Combustíveis) (t)	CETOTAL(CEE + CEC)
	Número de posições de aeronaves	GATE
	Área dos Terminais de Passageiros - TPS (m ²)	TPS
	Comprimento de pistas de pouso e decolagem (m)	PPD
<i>Output</i> (desejável)	Movimento de Aeronaves (LTO)	MOVAERO
	Movimento de Passageiros	MOVPAAX
<i>Output</i> (indesejável)	*Emissões de CO ₂ pelo consumo de combustíveis nos aeroportos (t)	*EMCO2EF
	*Emissões de CO ₂ pelo consumo de energia elétrica dos aeroportos (t)	*EMCO2EE
	*Emissões de CO ₂ do consumo energético total (combustíveis + energia elétrica) (t)	*EMCO2ETOTAL (EMCO2EF + EMCO2EE)
	Emissões de CO das aeronaves no ciclo LTO + APU (t)	EMCOAERO
	Emissões de NO _x das aeronaves no ciclo LTO + APU(t)	EMNOXAERO
	*Emissões de CO ₂ das aeronaves no ciclo LTO + APU(t)	*EMCO2AERO
	Emissões de CO ₂ total (Aeroportos e Aeronaves) (t)	EMCO2TOTAL (EMCO2ETOTAL+ EMCO2AERO)

*Variáveis que não serão consideradas nos modelos, porém foram necessárias para o cálculo de outras variáveis de *input* e *output*.

Essas variáveis irão compor o banco de dados indicado na Etapa 2 (Figura 3.1) da metodologia de onde serão retiradas as variáveis finais para utilização nos cenários. A Tabela 3.22 mostra as estatísticas descritivas para o banco de dados de variáveis.

Tabela 3.22: Estatística descritiva do banco de dados de variáveis.

Variável	Média	Soma	Desvio Padrão	Variância	Mínimo	Máximo
CEE (GJ)	23052.38	714623.8	27960.25	781775457.2	1756.86	106399.25
CEC (GJ)	910.1	28213.15	849.81	722178.58	128.73	3653.94
CETOTAL (GJ)	23962.48	742836.96	28621.72	819202867.9	2043.08	107839.62
GATE (Qtd)	17.19	533	9.69	93.96	3	51
TPS (m ²)	19353.77	599967	24874.24	618727679.7	733	112433
PPD (m)	2266.13	70250	417.49	174297.12	1323	3250
MOVAERO (Qtd)	32723.68	1014434	41621.17	1732322044	5394	217761
MOVPAE (Qtd)	2564202.55	79490279	4117817.92	1.69564E+13	246725	21407630
EMCO2EF (t)	67.09	2079.74	62.72	3933.64	9.44	269.79
EMCO2EE (t)	534.69	16575.31	648.52	420583.05	40.75	2467.87
EMCO2ETOTAL (t)	601.78	18655.07	698.02	487231.23	61.81	2573.64
EMCOAERO (t)	64.6	2002.48	93.38	8719.65	6.57	449.06
EMNOXAERO (t)	122.12	3785.67	192.32	36986.97	11.63	994.71
EMCO2AERO (t)	31078.55	963435	46550.48	2166947330	3317	234223
EMCO2TOTAL (t)	31680.32	982090.05	47081.53	2216670078	3378.81	236376.74

Uma alternativa que pode ser utilizada para a definição das variáveis consideradas como *input* e *output* é a correlação estatística, não se descartando outras técnicas. Quanto ao número de variáveis, é importante destacar que um modelo operacionalizado com muitas variáveis tende a ser benevolente, fazendo com que muitas DMU alcancem o escore 1 de eficiência. Logo, a análise de correlação foi aplicada para o conjunto de 9 (nove) variáveis (conforme critérios acima) de todos os 31 aeroportos selecionado (DMUs) para a modelagem com a técnica DEA, obtendo os coeficientes de correlação que medem o grau de relacionamento entre elas.

Tabela 3.23: Matriz de correlação das variáveis consideradas.

	<i>Inputs</i>				<i>Outputs</i>				
	CETOTAL	GATE	TPS	PPD	MOV AERO	MOV PAX	EMCO AERO	EMNOX AERO	EMCO2 TOTAL
CETOTAL	1.000								
GATE	0.173	1.000							
TPS	0.656	0.236	1.000						
PPD	0.136	0.000	-0.076	1.000					
MOVAERO	0.706	0.325	0.671	-0.165	1.000				
MOVPAE	0.720	0.257	0.692	-0.152	0.975	1.000			
EMCOAERO	0.781	0.280	0.752	-0.158	0.968	0.981	1.000		
EMNOXAERO	0.744	0.271	0.692	-0.144	0.970	0.995	0.989	1.000	
EMCO2TOTAL	0.749	0.257	0.708	-0.112	0.960	0.981	0.981	0.987	1.000

Como evidenciado na Tabela 3.23, a matriz de correlação mostra correlação positiva forte entre os *inputs* Consumo de Energia Total (CETOTAL) e Tamanho do Terminal (TPS) com todas as variáveis de *outputs*, justificando o seu uso. Essa é uma conclusão bastante razoável, visto que os referidos *inputs* estão fortemente relacionados ao porte do aeroporto, ou seja, geralmente quanto maior o Terminal de Passageiros (TPS) do aeroporto, maior é o seu consumo energético e, por consequência, maior serão as suas emissões atmosféricas associadas. Com relação ao número de posições de aeronaves disponíveis nos aeroportos (GATES), notou-se uma baixa correlação, podendo ser classificada como desprezível. Isso ocorre em função de diferentes possibilidades de configuração dos aeroportos, uma vez que novas posições podem ser ajustadas de acordo com a demanda, não se relacionando diretamente com estrutura física permanente de um aeroporto. Portanto, visto para essa variável há um baixo poder de explicação das variáveis de *output*, a mesma foi desconsiderada das análises dos modelos DEA.

Quanto à variável de *input* referente ao tamanho de Pista de Pouso e Decolagem (PPD), não é surpresa que apresente correlação negativa com os *outputs*, devido ao fato dos aeroportos com pistas de pouso e decolagem com menos de 2000 metros de extensão (apenas 7) representarem, em média, 43% dos aeroportos para cada variável de *output*. Notadamente, isso ocorre em função dos aeroportos mais movimentados da amostra (Congonhas e Santos Dumont) terem pistas relativamente curtas, sendo que o último apresenta o menor comprimento de pista dentre todos os aeroportos selecionados. Em complemento, os aeroportos com pistas acima de 2600 metros (apenas 7) representam apenas 23% dos aeroportos para cada variável de *output*. Portanto, isso demonstra que há uma tendência de relação inversa entre o comprimento das PPD e os *outputs* (movimento de passageiros, aeronaves e emissões atmosféricas), que sinaliza uma eficiência de utilização das pistas de pouso e decolagens alavancada pelos grandes aeroportos

com pistas curtas. Mesmo apresentando essa correlação negativa entre os *outputs* e o comprimento das pistas (PPD), a variável foi mantida no modelo porque embora seja negativa, a correlação existe e expressa a realidade dos aeroportos selecionados, a qual não deve ser omitida.

Destaca-se que o processo de análise e definição das variáveis em modelos DEA é essencial para a sua representatividade, uma vez que um conhecido efeito da técnica DEA é de que quanto maior o número de variáveis no modelo maior a oportunidade de uma unidade ser considerada eficiente em pelo menos um dos parâmetros e, portanto, aparecer na fronteira eficiente (já que não seria dominada por outra unidade nesse parâmetro). A Tabela 3.24 traz as variáveis finais selecionadas como *inputs* e *outputs* para construção dos cenários utilizando a técnica DEA.

Tabela 3.24: Variáveis selecionadas do banco de dados

Classificação	Variáveis (média do período 2016 a 2018)	Código utilizado
<i>Inputs</i>	Consumo de Energia Total (GJ) (Energia Elétrica + Combustíveis) (t)	CETOTAL(CEE + CEC)
	Área dos Terminais de Passageiros - TPS (m ²)	TPS
	Comprimento de pistas de pouso e decolagem (m)	PPD
<i>Output</i> (desejável)	Movimento de Aeronaves (LTO)	MOVAERO
	Movimento de Passageiros	MOVPAX
<i>Output</i> (indesejável)	Emissões de CO das aeronaves no ciclo LTO + APU (t)	EMCOAERO
	Emissões de NO _x das aeronaves no ciclo LTO + APU(t)	EMNOXAERO
	Emissões de CO ₂ total (Aeroportos e Aeronaves) (t)	EMCO2TOTAL

Em relação às variáveis de *input* representativas das características de infraestrutura dos aeroportos selecionadas, área do terminal de passageiros (TPS) e comprimento de pista de pouso e decolagem (PPD), é importante ressaltar que em termos de produtividade aeroportuária, a inclusão da primeira permite que modelo DEA capture os efeitos da configuração do lado terra do aeroporto, enquanto a inclusão da segunda permite que o modelo capture o efeito da configuração do lado do ar.

Com relação ao conjunto mínimo unidades a serem avaliadas (DMUs) em aplicações com DEA, na literatura há algumas diretrizes. Uma primeira regra afirma que o tamanho da amostra deve ser maior que o produto do número de *inputs* e *outputs*, enquanto uma segunda regra declara que o número de observações no conjunto de dados deve ser pelo menos três vezes a soma do

número de *inputs* e *outputs*. Esta relação está representada pela Equação 3.11 (COOPER *et. al.*, 2007).

$$DMUs \geq \max\{(M \times N); (3 \times (M + N))\} \quad (3.11)$$

Onde:

M = número de inputs

N = número de outputs

Portanto, considerando o quantitativo máximo de *inputs* (3) e *outputs* (5), o número de DMUs (aerportos) selecionadas (31) supera o valor mínimo estabelecido pela regra anteriormente definida (24). Com isso, todos os modelos a serem definidos pelos cenários de avaliação irão obedecer a este critério por terem valor inferior a 24 conforme regra da Equação 3.11. Logo, espera-se que os modelos dos cenários descritos serão capazes de obter poder discriminatório suficiente para gerar os escores de eficiência sem viés.

Outra forma de explorar a distribuição de uma variável é através de um gráfico de densidade. O gráfico de densidade é gerado como se fosse um histograma com uma classe móvel, isto é, a classe que tem uma certa amplitude, se move da esquerda para direita e em cada ponto estima a densidade probabilística da variável. Tecnicamente, a função de densidade é um estimador de densidade Kernel gaussiano e foram obtidos para cada variável, conforme mostra a Figura 3.6.

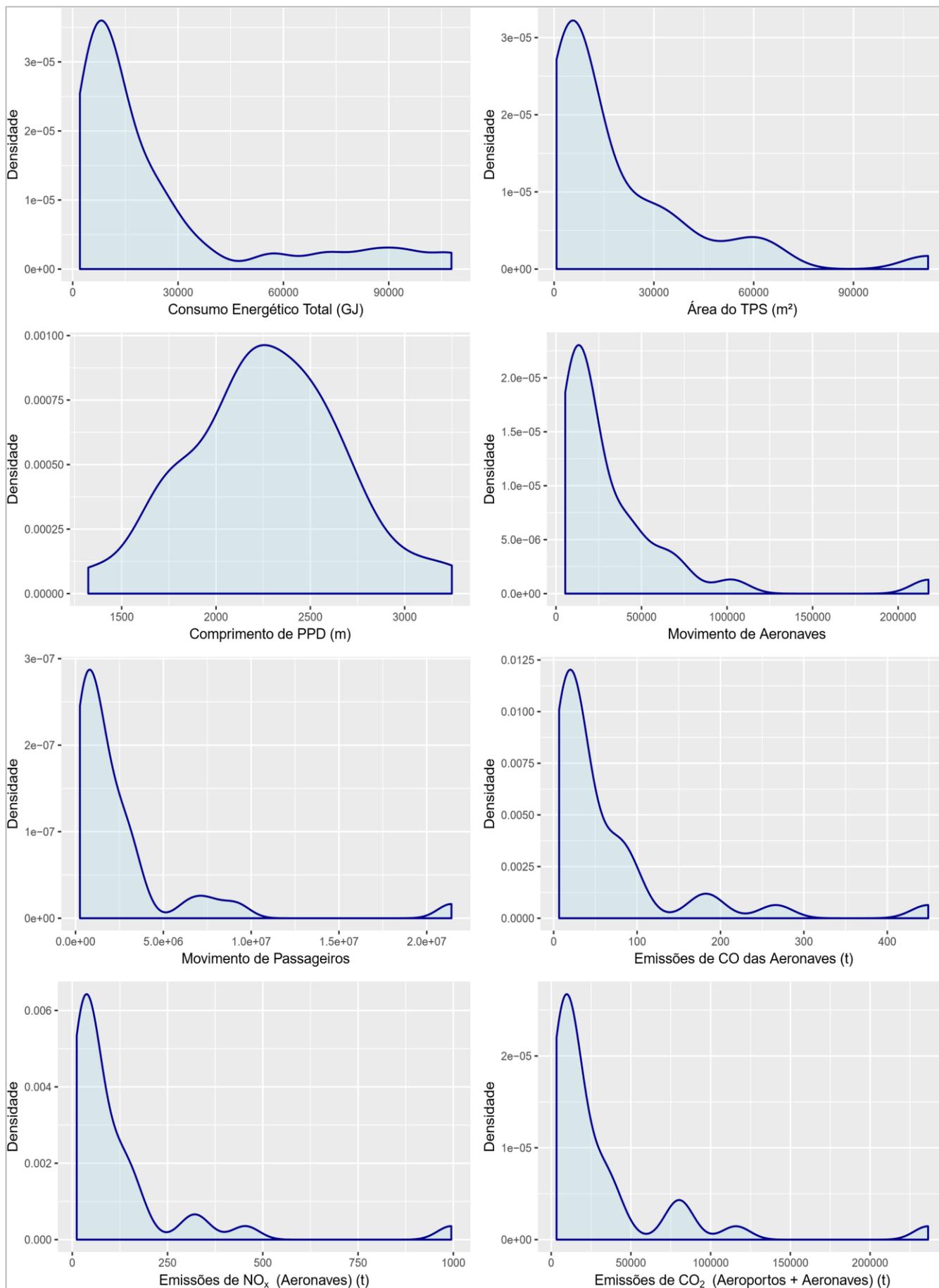


Figura 4: Densidade das variáveis selecionadas para construção dos modelos DEA (cenários).

Conforme pode-se notar da Figura 3.6, a maioria possui uma função densidade mais enviesada à esquerda, mas, observando-se a cauda direita, pode-se notar pelo menos três grupos ou clusters de aeroportos, distintos por sua infraestrutura (área do terminal de passageiros - TPS), pelo consumo energético total e pelas variáveis de emissões. Estes grupos identificados tendem a refletir justamente a classificação de aeroportos em classes Especial, 1,2 e 3 (Tabela 3.2) pois, como exemplo, no prolongamento da cauda à direita figuram os dados referentes aos maiores aeroportos da amostra, percententes à classe Especial (Congonhas, Santos Dumont, Recife e por exemplo, número de pistas e área do terminal) e porte de sua operação (custos e receitas operacionais totais). A exceção é a variável “Comprimento de PPD”, referente ao comprimento das pistas de pouso e decolagem, que reflete uma distribuição próxima da normal e menos distorcida do que as demais. Isso ocorre em função da maior parte dos aeroportos da amostra possuírem foco em voos comerciais domésticos, com aeronaves similares operadas nestes aeroportos, e, por consequência, pistas de pouso e decolagem que atendem aos requisitos operacionais das principais aeronaves, independente do movimento de passageiros e aeronaves.

Em complemento, as densidades observadas seguem o mesmo padrão de observações realizadas em outros estudos de avaliação de eficiência de aeroportos encontrados na revisão da literatura, como mostra o exemplo da Figura 3.7.

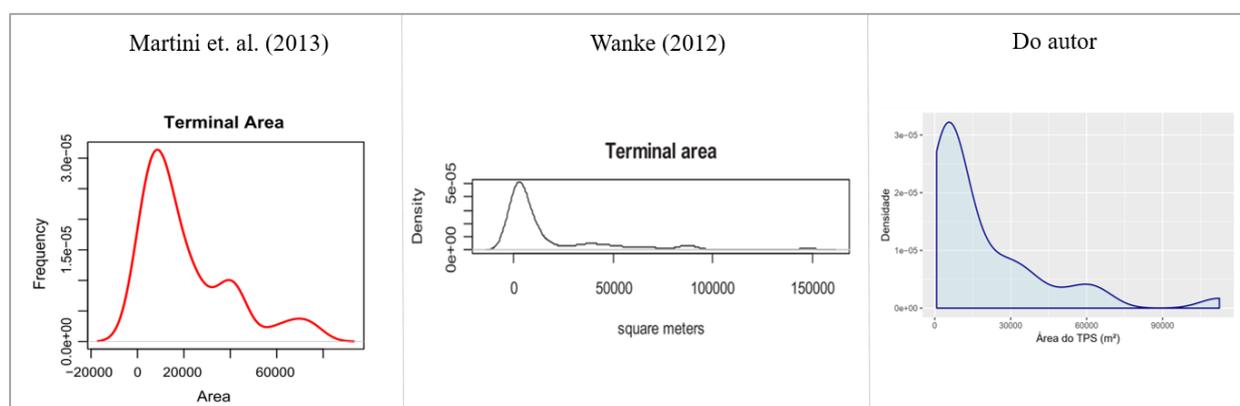


Figura 3.7: Comparação de densidades da variável "Área do Terminal" em outros estudos.
Fonte: Adaptado de Martini *et.at.* (2013) e Wanke (2012)

3.5.2 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS DE MODELAGEM

Para avaliação proposta pela pesquisa, foram definidos 4 cenários distintos, com o objetivo de avaliar as diferentes respostas dos modelos DEA bem como diferentes combinações de variáveis calculadas. A criação de cenários permite avaliar a resposta do modelo DEA com relação a diferentes combinações de variáveis de *input* e *output*, além de considerar um modelo de base com variáveis de infraestrutura para que a eficiência carbono-energética dos aeroportos possa ser comparada com a eficiência operacional. Em complemento, a criação e análise de cenários em estudos com aplicação de DEA em aeroportos segue os passos de estudos como Yu (2004), Scotti *et. al.* (2014) e lo Storto (2018).

No tópico seguinte serão detalhadas as características cenários propostos, incluindo os processos de produção dos aeroportos (combinação de variáveis *input* e *output*) considerados para cada cenário proposto.

3.5.3 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS DEA

Nesta etapa da metodologia são definidos os cenários e suas variáveis da análise (*inputs* e *outputs*), o modelo DEA utilizado, orientação e retorno de escala, para cada cenário criado.

Com relação à orientação do modelo, todos possuem orientação a *output*, conforme mencionado item 2.3.5.1. Ou seja: o modelo considerado para ambos os cenários busca a maximização dos *outputs* desejáveis (movimento de passageiros e aeronaves) e a simultânea minimização dos *outputs* indesejáveis (emissões), a partir do consumo energético e da infraestrutura disponível nos aeroportos (*inputs*), por meio da identificação da eficiência relativa dos aeroportos analisados.

Com relação ao retorno de escala, a técnica DEA será aplicada segundo uma abordagem de retornos variáveis de escala (VRS – *Variable Returns to Scale*), por considerar-se a presença de diferentes escalas nos movimentos de passageiros nos aeroportos da amostra. Em complemento, é assumido que, em função da concorrência limitada entre os aeroportos, não se pode esperar que eles operem no tamanho da escala mais produtiva, tendo, assim, variabilidade nos retornos de escala (LOZANO & GUTIÉRREZ, 2011). Para todos os cenários, as emissões atmosféricas (*outputs* indesejáveis) foram consideradas variáveis não-discricionárias (fatores fixos). Uma variável não discricionária é considerada aquela sobre a qual a administração tem pouco ou nenhum controle (Adler *et. al.* 2013).

Nesse contexto, embora as demais variáveis de *input* possam ser consideradas em certa medida como não-discricionárias caso se considere um horizonte de curto prazo, ou seja, de pouca influência do operador aeroportuário, o operador ainda assim possui a prerrogativa de influenciá-las, como, por exemplo, ao realizar uma obra de expansão do terminal de passageiros ou mesmo a substituição de seus veículos por veículos elétricos, o que demandaria menor consumo de energia agregado (DAMACENA *et. al.*, 2016).

3.5.3.1 CENÁRIO BASE

O primeiro cenário trata-se de um cenário de base com o modelo DEA-BCC padrão orientado à *output*, para calcular os escores de eficiência dos aeroportos que servirão como um parâmetro de comparação com dos demais cenários. Isso permite comparar os resultados dos cenários considerados e destacar as diferenças entre uma análise de eficiência técnica padrão (ou seja, modelo DEA sem *outputs* indesejáveis) e um modelo DEA com a inclusão de *outputs* indesejáveis, que é o foco da presente pesquisa. Em outras palavras, o cenário de base considera a eficiência de aeroportos em processar passageiros e aeronaves utilizando a sua infraestrutura disponível, que neste trabalho é representada pelo tamanho do terminal (TPS) e o comprimento de pista de pouso e decolagem (PPD). O processo de produção do aeroporto no cenário de base é representado pela Figura 3.8.

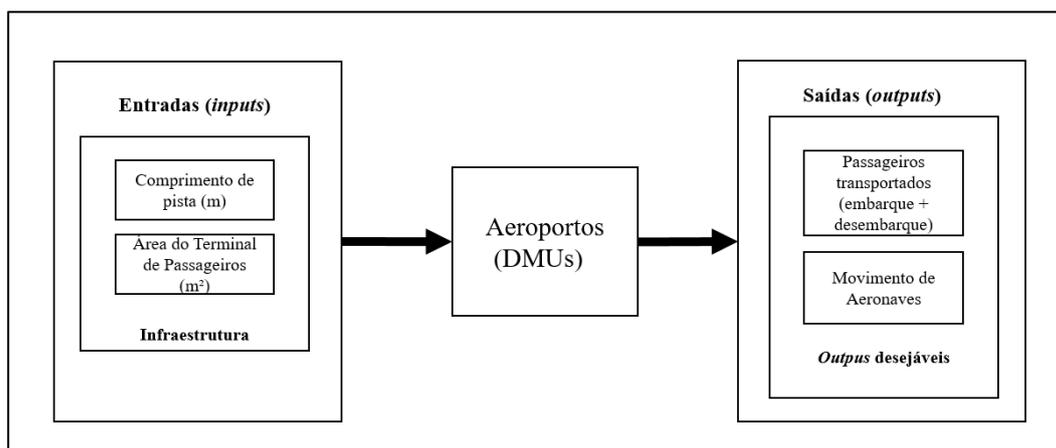


Figura 5: Processo produtivo de um aeroporto – Cenário de Base (operacional).

Em resumo, para o modelo de base foi considerada uma abordagem puramente operacional dos aeroportos, num processo de produção no qual os aeroportos utilizam duas entradas de infraestrutura (comprimento da pista e área do terminal de passageiros), para produzir dois resultados desejáveis (movimentos de aeronaves e passageiros transportados). Dessa forma será

possível capturar o efeito das variáveis de consumo energético e emissões atmosféricas na avaliação de eficiência, de modo a observar as mudanças nos escores de eficiência relacionados às mesmas. A Tabela 3.25 mostra o tipo de modelo DEA adotado bem como suas características.

Tabela 3.25: Características do modelo DEA para o Cenário de base.

Modelo	Orientação	Retorno de Escala	Inputs	Outputs
DEA-BCC	Output	Variável (VRS)	<ul style="list-style-type: none"> • PPD • TPS 	<ul style="list-style-type: none"> • MOVAERO • MOVPAK

3.5.3.2 CENÁRIO 1 (Modelo principal)

O Cenário 1, por considerar o consumo energético e as emissões de CO₂ resultantes, foi considerado como sendo o modelo principal de análise da eficiência carbono-energética dos aeroportos proposta por esta pesquisa, na medida em que considera tanto as variáveis do modelo de base (operacional) quanto as variáveis de ambientais. Neste (e em todos os demais cenários) foram mantidas as variáveis de infraestrutura dos aeroportos. A Figura 3.9 mostra a definição do modelo principal.

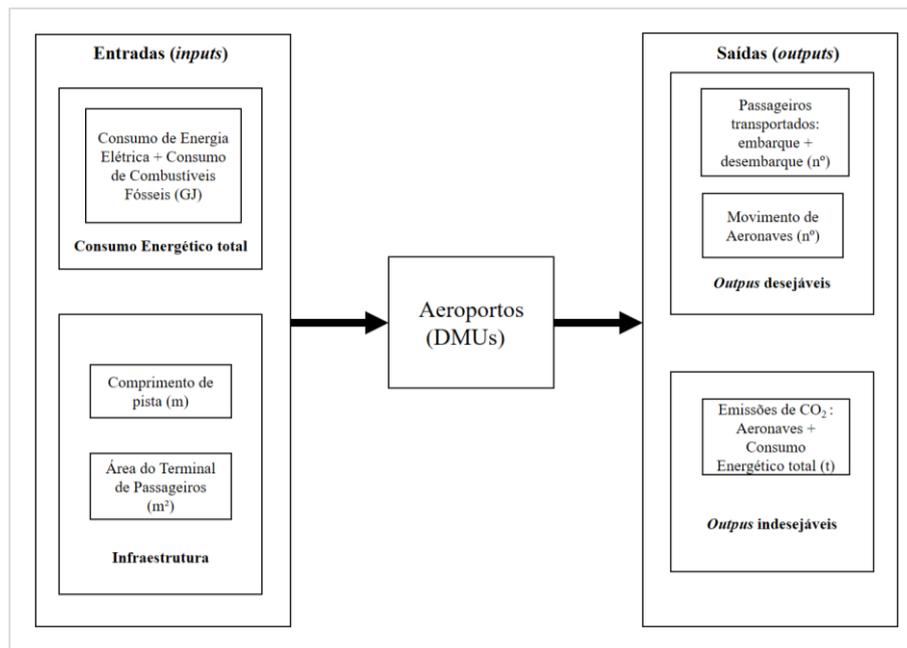


Figura 3.9: Processo produtivo de um aeroporto – Cenário 1. Modelo principal de avaliação da eficiência carbono-energética.

Neste modelo principal foi considerado como entrada (*input*) do processo o consumo energético total de cada aeroporto (energia elétrica e fóssil, em GJ), variável denominada “CETOTAL”. Como variável de saída (indesejável) foi considerada a emissão total de CO₂ (aeronaves e aeroportos). A Tabela 3.26 mostra o tipo de modelo DEA adotado bem como suas características.

Tabela 3.26: Características do modelo DEA para o Cenário 1(modelo principal).

Modelo	Orientação	Retorno de Escala	<i>Inputs</i>	<i>Outputs</i>
SBM-DEA	Output	Variável (VRS)	<ul style="list-style-type: none"> • TPS • PPD • CETOTAL 	<ul style="list-style-type: none"> • MOVAERO; • MOVPAIX; • EMCO2TOTAL

3.5.3.3 CENÁRIO 2 (Poluentes Atmosféricos)

O modelo do Cenário 2 considera as emissões de poluentes atmosféricos CO e NO_x, avaliando a eficiência do aeroporto em relação à sua capacidade de utilizar a infraestrutura disponível para processar passageiros e aeronaves e minimizar as emissões que contribuem para a qualidade do ar local. A Figura 3.10 mostra a definição do modelo que considera as emissões de poluentes locais (CO e NO_x) gerados pelas aeronaves durante o ciclo LTO.

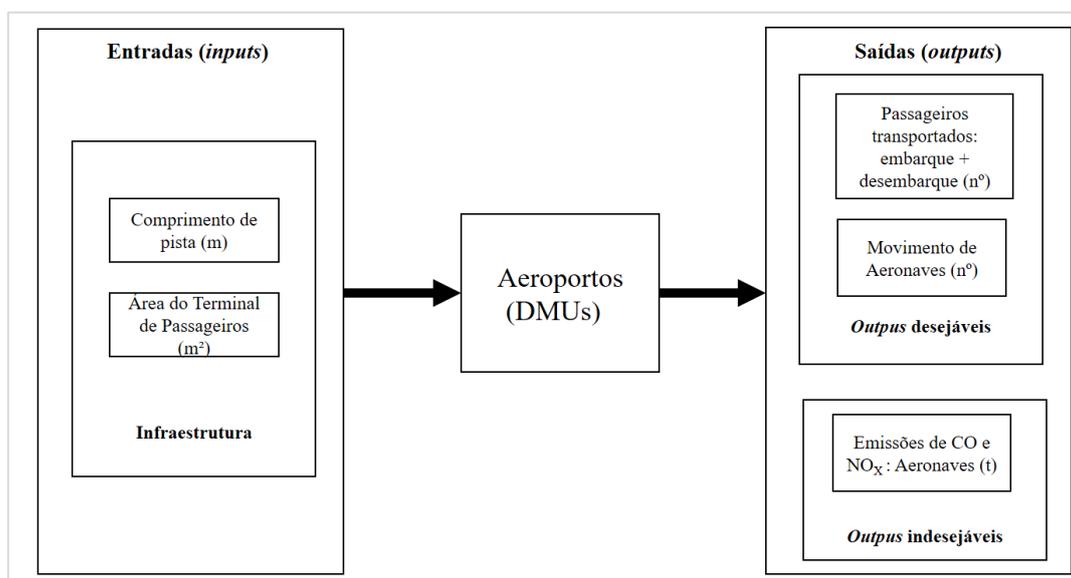


Figura 3.10: Processo produtivo de um aeroporto – Cenário 2. Modelo considerando poluentes atmosféricos.

O objetivo deste cenário é avaliar a eficiência dos aeroportos em termos da sua infraestrutura, operação e impactos à qualidade do ar. A Tabela 3.27 mostra o tipo de modelo DEA adotado bem como suas características.

Tabela 3.277: Características do modelo DEA para o Cenário 2 (poluentes atmosféricos).

Modelo	Orientação	Retorno de Escala	Inputs	Outputs
SBM-DEA	Output	Variável (VRS)	<ul style="list-style-type: none"> • TPS • PPD 	<ul style="list-style-type: none"> • MOVAERO; • MOVPAE; • EMCOAERO • EMNOXAERO

3.5.3.4 CENÁRIO 3 (Modelo principal + poluentes atmosféricos das aeronaves)

Por fim, o Cenário 3 considera tanto as emissões de CO₂ quanto de poluentes atmosféricos como externalidades negativas do processo produtivo dos aeroportos, modelando-os como *outputs* indesejáveis. A Figura 3.11 mostra a definição do modelo que considera as emissões de poluentes locais (CO e NO_x) gerados pelas aeronaves durante o ciclo LTO.

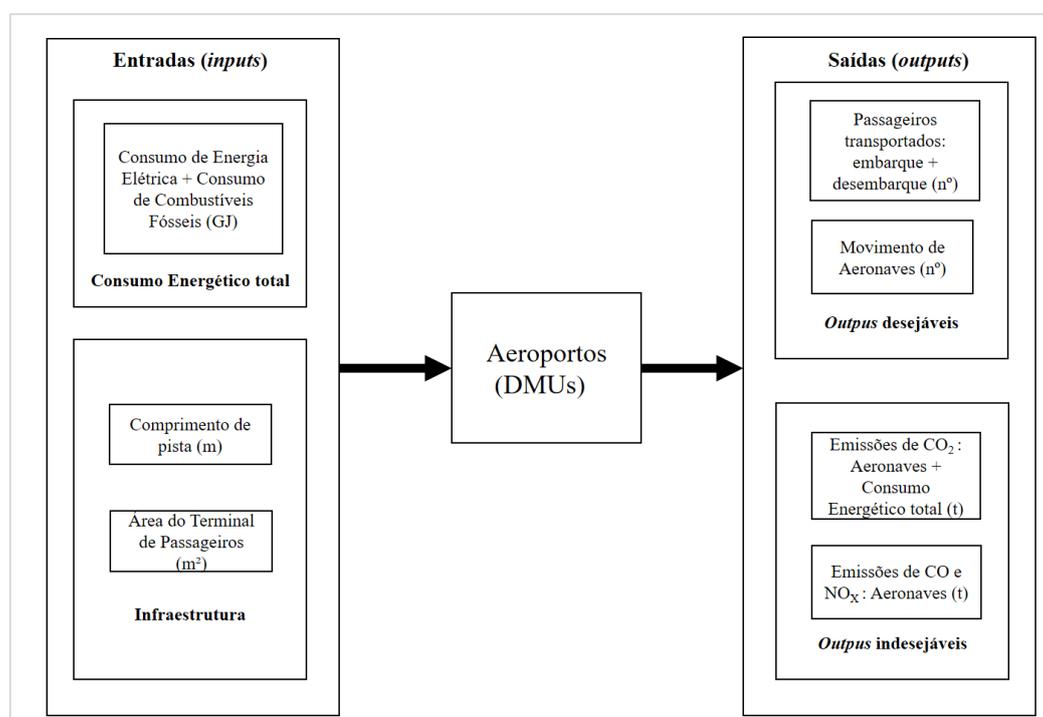


Figura 3.11: Processo produtivo de um aeroporto – Cenário 3. Modelo considerando emissões de CO₂ e de poluentes atmosféricos.

Este modelo representa a eficiência dos aeroportos em termos do uso de sua infraestrutura e consumo de energia para o processamento de passageiros e aeronaves e, como resultante

indesejável deste processo, considerando as emissões de CO₂ e poluentes atmosféricos (CO e NO_x). A Tabela 3.28 mostra o tipo de modelo DEA adotado bem como suas características.

Tabela 3.28: Características do modelo DEA para o Cenário 3 (Cenário 1 + Cenário 2).

Modelo	Orientação	Retorno de Escala	<i>Inputs</i>	<i>Outputs</i>
SBM-DEA	Output	Variável (VRS)	<ul style="list-style-type: none"> • TPS • PPD • CETOTAL 	<ul style="list-style-type: none"> • MOVAERO; • MOVPAE; • EMCOAERO • EMNOXAERO • EMCO2TOTAL

3.5.4 EXECUÇÃO DO MODELO DEA

A execução do modelo DEA definido foi realizada com auxílio do software MaxDEA 7 Ultra, desenvolvido pela empresa Beijing Realworld Software Company Ltd, sob licença anual. O MaxDEA 7 Ultra é uma das ferramentas de eficiência não paramétricas mais abrangentes e que possui ampla biblioteca de modelos DEA.

Após o processamento do modelo DEA, o resultado obtido foi a eficiência carbono-energética dos aeroportos da amostra. Para todos os cenários é obtida a fronteira da eficiência a partir dos valores para as variáveis de *input* e *output* definidas conforme os cenários descritos. Além da definição dos aeroportos eficientes, são identificados aqueles ineficientes, para as quais são conhecidas as respectivas “metas” ou alvos”, que representam valores de melhoria para alcancem a fronteira de eficiência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste Capítulo serão apresentados os resultados dos cálculos das variáveis bem como dos cenários de avaliação propostos.

4.1 ETAPA 4 - CLASSIFICAÇÃO DE AEROPORTOS SEGUNDO INDICADORES DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES SUGERIDOS NA LITERATURA

Com base nos dados coletados foi possível estimar indicadores de performance ambiental para os aeroportos brasileiros, de acordo com o trabalho de Kilkış e Kilkış (2016). A Tabela 4.1 traz os resultados dos indicadores estimados para os aeroportos brasileiros da amostra, bem como os aeroportos internacionais

Tabela 4.1: Resultados dos cálculos dos indicadores para aeroportos brasileiros em comparação com indicadores apresentados pelo trabalho de Kilkış e Kilkış (2016).

Aeroporto	Emissões de CO ₂ (ton)	Passageiros (pax)	Consumo de Energia (tep)	Consumo de Energia por pax (tep/pax)	Passageiros (pax)	CO ₂ por passageiros (ton/pax)	Emissões por unidade de energia (tCO ₂ /tep)
Amsterdam (AMS)	104,948	52,569,200	26610.4	6.00E-04	52,569,200	0.0020	3.94
Atatürk (IST)	46,080	51,300,000	37581.6	7.00E-04	51,300,000	0.0010	1.23
Barcelona (BCN)	87,718	35,145,176	19615.9	1.00E-03	35,145,176	0.0030	4.47
Frankfurt (FRA)	175,032	58,040,000	72401.4	7.00E-04	58,040,000	0.0030	3.36
Gatwick (LGW)	59,380	38,100,000	19042.1	8.00E-04	38,100,000	0.0017	3.12
Heathrow (LHR)	284,000	72,300,000	63977.6	7.00E-04	72,300,000	0.0039	4.44
Munich (MUC)	101,968	38,400,000	44486.1	8.00E-04	38,400,000	0.0027	2.29
San Francisco (SFO)	42,236	39,391,234	35895.7	1.10E-03	39,391,234	0.0011	1.18
Seoul (ICN)	190,327	49,045,000	86318.9	1.40E-03	49,045,000	0.0039	2.2
São Paulo (SBSP)	2,154	21,407,630	1939.92	9.00E-05	21,407,630	0.0001	1.11
Rio de Janeiro (SBRJ)	1,812	9,140,551	1652.70	8.00E-05	9,140,551	0.0002	1.10
Recife (SBRF)	2,347	7,582,308	2193.12	1.00E-04	7,582,308	0.0003	1.07
Curitiba (SBCT)	1,365	6,465,657	1329.93	6.00E-05	6,465,657	0.0002	1.03
Belém (SBBE)	906	3,366,744	866.60	4.00E-05	3,366,744	0.0003	1.05
Goiânia (SBGO)	617	3,105,536	563.69	3.00E-05	3,105,536	0.0002	1.10
Vitória (SBVT)	581	3,052,109	505.76	2.00E-05	3,052,109	0.0002	1.15
Cuiabá (SBCY)	726	2,909,903	700.51	3.00E-05	2,909,903	0.0002	1.04
Manaus (SBEG)	2,574	2,685,761	2541.18	1.20E-04	2,685,761	0.0010	1.01
Foz do Iguaçu (SBFI)	350	2,123,121	323.08	2.00E-05	2,123,121	0.0002	1.08

Maceió (SBMO)	655	2,071,316	560.74	3.00E-05	2,071,316	0.0003	1.17
Navegantes (SBNF)	202	1,654,686	192.59	1.00E-05	1,654,686	0.0001	1.05
São Luís (SBSL)	563	1,565,520	492.47	2.00E-05	1,565,520	0.0004	1.14
Campo Grande (SBCG)	267	1,516,066	225.32	1.00E-05	1,516,066	0.0002	1.18
João Pessoa (SBJP)	374	1,373,038	333.48	2.00E-05	1,373,038	0.0003	1.12
Aracajú (SBAR)	332	1,209,785	318.63	1.00E-05	1,209,785	0.0003	1.04
Uberlândia (SBUL)	191	1,095,999	118.48	1.00E-05	1,095,999	0.0002	1.61
Teresina (SBTE)	229	1,067,587	200.98	1.00E-05	1,067,587	0.0002	1.14
Londrina (SBLO)	198	923,091	174.06	1.00E-05	923,091	0.0002	1.14
Porto Velho (SBPV)	337	821,418	337.16	2.00E-05	821,418	0.0004	1.00
Palmas (SBPJ)	343	648,602	337.46	2.00E-05	648,602	0.0005	1.02
Macapá (SBMQ)	189	561,217	150.57	1.00E-05	561,217	0.0003	1.26
Joinville (SBJV)	121	490,999	112.45	1.00E-05	490,999	0.0002	1.07
Santarém (SBSN)	108	473,533	76.27	0.00E+00	473,533	0.0002	1.42
Petrolina (SBPL)	165	469,786	146.15	1.00E-05	469,786	0.0004	1.13
Boa Vista (SBBV)	201	290,784	175.44	1.00E-05	290,784	0.0007	1.14
Rio Branco (SBRB)	206	329,741	162.11	1.00E-05	329,741	0.0006	1.27
Imperatriz (SBIZ)	115	286,880	75.70	0.00E+00	286,880	0.0004	1.52
Marabá (SBMA)	95	291,253	65.77	0.00E+00	291,253	0.0003	1.45
Montes Claros (SBMK)	62	262,933	41.96	0.00E+00	262,933	0.0002	1.47
Pampulha (SBBH)	270	246,725	153.39	1.00E-05	246,725	0.0011	1.76

Fonte: Adaptado de Kilkiş e Kilkiş (2016).

Inicialmente, observa-se que, devido a maior parte as emissões serem associadas ao consumo de energia elétrica, os aeroportos brasileiros possuem vantagem em função de 65,2% da matriz elétrica do país ser de fonte hídrica (BEM, 2018) com fator de emissão menor do que os utilizados em países europeus e pelos Estados Unidos, onde a matriz é sustentada por combustíveis fósseis, como carvão e gás natural. Por esta razão, em geral, os indicadores dos aeroportos brasileiros são mais baixos, indicando maior eficiência por passageiro e unidade de energia. No entanto, aeroportos como Aeroporto de Istambul (Turquia) e de San Francisco (EUA) possuem indicadores similares aos de aeroportos brasileiros, mesmo com um porte e processamento de passageiros bastante superior. Tal fato reforça que estes aeroportos internacionais possuem uma política consolidada de redução de suas pegadas de carbono bem como a de implementação de projetos de eficiência energética, como é o caso de alimentação de grandes cargas dos Terminais de Passageiros por energia fotovoltaica e eletrificação de veículos de pátio.

Ressalta-se que esta comparação por indicadores é apenas uma aproximação por ordem de grandeza, pois existem diversas variáveis que devem ser levantadas para que uma comparação detalhada entre aeroportos possa ser justa. Um exemplo é o Aeroporto de Seoul (Coréia do Sul). Embora este aeroporto possua o maior (pior) indicador em termos de emissão de CO₂ por passageiro processado (0.0039) deve-se considerar a sua política de tratamento de resíduos e emissões zero, com uma planta própria de coleta, transporte e tratamento de resíduos sólidos, aproveitando o gás metano proveniente em outros processos. Dessa forma, embora o aeroporto tenha um alto gasto energético para essa atividade, os benefícios destes processos devem ser considerados.

Em complemento, cabe notar que há uma tendência de piora dos indicadores na medida em que se diminui o porte dos aeroportos (estão listados de forma decrescente de acordo com número de passageiros processados). Isso ocorre em função de alguns aeroportos terem grande parte de seus movimentos em função de escola de instrução de pilotos, bases militares ou aviação geral, o que diminui o número de passageiros processados embora a sua infraestrutura seja utilizada normalmente nas operações de pousos e decolagens.

4.2 ETAPA 4 - EFICIÊNCIA CARBONO-ENERGÉTICA DOS AEROPORTOS BRASILEIROS PELA ANÁLISE DEA

O processamento dos cenários com modelagem DEA gerou como resultado o grau de eficiência relativa dos 31 aeroportos da amostra, conforme apresentado no item 3.5.3 (Construção dos Modelos DEA). Os resultados da Programação Linear dos modelos DEA são apresentados em valores que variam de 0 a 1, e foram transformados em porcentagem para facilitar a interpretação dos dados. Os cenários serão avaliados tanto individualmente quanto de forma comparativa, para captar as mudanças em relação às diferentes abordagens.

4.2.1 CENÁRIO DE BASE (MODELO OPERACIONAL)

Inicialmente, a Figura 4.1 mostra os resultados do escore de eficiência operacional obtidos para o modelo DEA do cenário de base.

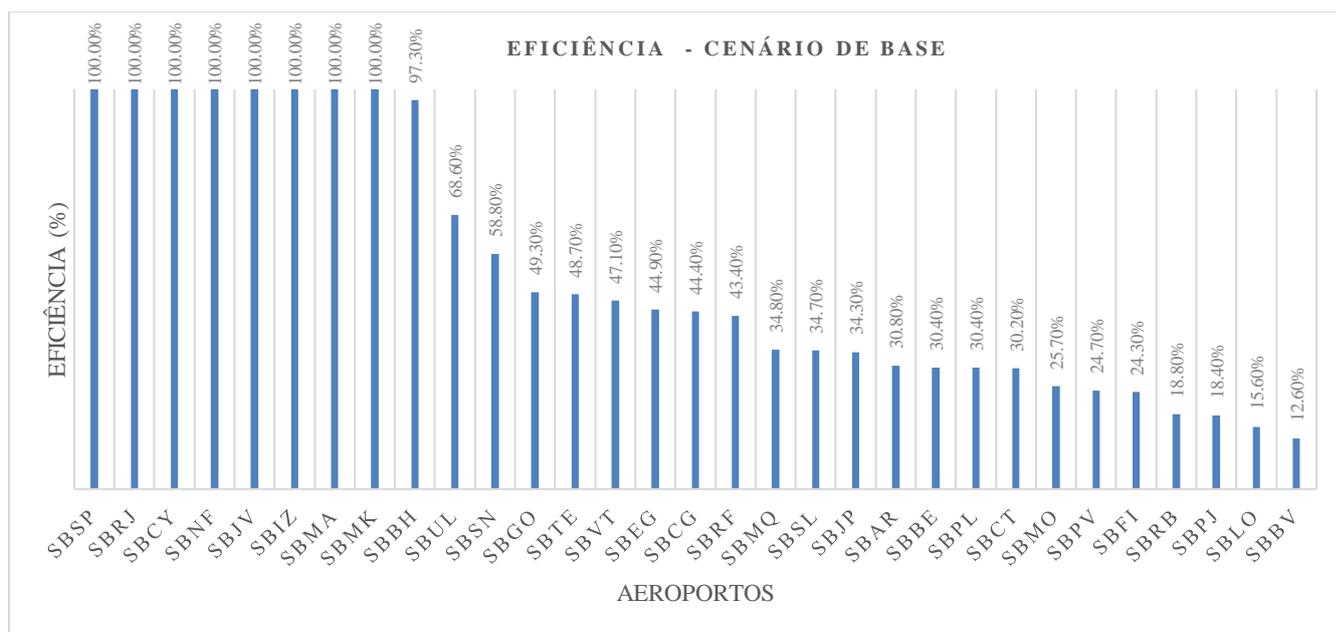


Figura 4.1: Resultados de Escore de Eficiência - Modelo de base.

Com base da Figura 4.1 é possível observar que, neste cenário, 8 aeroportos apresentaram escore de eficiência de 100%. Dentre estes, nota-se que apenas um está na região Norte (SBMA), indicando que aeroportos em regiões mais isoladas tendem a ser menos eficientes. Em complemento, dos 10 aeroportos com menores escores de eficiência, 4 deles estão na região Norte (SBBE, SBPV, SBRB e SBBV). Os Aeroportos de Congonhas (SBSP) e Santos Dumont (SBRJ) são classificados como os mais eficientes em função de servirem como referência aos demais aeroportos. Este resultado confirma a previsão de que, em função de sua alta movimentação de passageiros e aeronaves para voos comerciais e em função de comprimento de pista inferior à média dos demais aeroportos (2266,13 metros), estes dois aeroportos são considerados os mais eficientes da amostra neste cenário operacional. A Tabela 4.2 traz os resultados do modelo DEA-BCC para o cenário de base.

Tabela 4.2: Resultados do cenário de base.

Aeroporto (DMU)	Eficiência	Folgas (slacks) (TPS)	Projeção (TPS)	Folgas (slacks) (PPD)	Projeção (PPD)	Folgas (slacks) (MOVAERO)	Projeção (MOVAERO)	Folgas (slacks) (MOVPAX)	Projeção (MOVPAX)
SBSP	100.00%	0	64579	0	1940	0	217761	0	21407630
SBRJ	100.00%	0	61000	0	1323	0	102627	0	9140551
SBCY	100.00%	0	5600	0	2300	0	49476	0	2909903
SBNF	100.00%	0	5200	0	1701	0	20699	0	1654686
SBJV	100.00%	0	4000	0	1640	0	7866	0	490999
SBIZ	100.00%	0	2164	0	1798	0	5662	0	286880
SBMA	100.00%	0	1011	0	2000	0	7420	0	291253
SBMK	100.00%	0	733	0	2100	0	8347	0	262933
SBBH	97.30%	0	4629	-104	2260	0	41270	2128242	2381814
SBUL	68.60%	0	4733	0	2100	0	35248	561221	2158226
SBSN	58.80%	0	1982	-249	2151	0	18902	136216	942215
SBGO	49.30%	0	34100	-374	2126	0	130795	5549360	11848427
SBTE	48.70%	0	4414	0	2200	7136	37622	0	2192852
SBVT	47.10%	0	29556	0	1750	0	93574	2528093	9010130
SBEG	44.90%	0	18000	-476	2224	0	84857	810729	6798945
SBCG	44.40%	0	7215	-310	2290	10806	54084	0	3416419
SBRF	43.40%	0	52000	-990	2017	10697	181869	0	17462448
SBMQ	34.80%	0	5382	0	1800	0	25818	288960	1899818
SBSL	34.70%	0	10700	-116	2269	9017	64028	0	4509428
SBJP	34.30%	0	9090	-236	2279	19002	59434	0	4004480
SBAR	30.80%	0	9321	0	2200	15115	56542	0	3931750
SBBE	30.40%	0	33255	-669	2131	0	128384	503547	11583408
SBPL	30.40%	0	3093	-1053	2197	8309	28290	0	1546444
SBCT	30.20%	-47854	64579	-278	1940	7024	217761	0	21407630
SBMO	25.70%	0	22000	-406	2200	23368	96270	0	8053475
SBPV	24.70%	0	7875	-114	2286	0	55967	296174	3623417
SBFI	24.30%	0	24188	-8	2187	18855	102513	0	8739703
SBRB	18.80%	0	4292	0	2158	0	35012	306336	2062238
SBPJ	18.40%	0	12331	-241	2259	0	68682	1502241	5020963
SBLO	15.60%	0	40293	-12	2088	0	148466	7883541	13790753
SBBV	12.60%	0	4798	-433	2267	0	42699	171895	2473727

Da Tabela 4.2, as folgas (slacks) representam as folgas, que são excessos de insumos (*inputs*) ou escassez de produtos (*outputs*) utilizados por alguma DMU (aeroporto) que pode estar numa parte da fronteira não eficiente em razão destas folgas. Já as projeções correspondem às metas de cada DMU para alcançar a eficiência, com base nos resultados do cenário específico. Algumas metas como de projeção de passageiros (MOVPAX) são excessivas em função dos aeroportos de Congonhas e Santos Dumont terem um alto índice de eficiência, “forçando” o modelo a estimar as metas considerando-os como *benchmarks* de eficiência da amostra.

Com relação às folgas (*slacks*), nota-se que o Aeroporto de Curitiba sinaliza um Terminal de Passageiros com folga (de 47.854 m²), ou seja, que ainda pode receber mais passageiros para melhorar sua eficiência em termos da utilização de seu terminal. Cabe notar que, possivelmente há uma relação de *trade-off* entre o “excesso de área de Terminal” com o conforto observado pelos passageiros. Isso se dá em função do Aeroporto de Curitiba há 3 anos consecutivos receber o prêmio “Aeroporto + Brasil 2018” por meio da Pesquisa de Satisfação do Passageiro, divulgada anualmente pelo Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Em outras

palavras, a satisfação por parte dos usuários pode ter relação com um terminal novo, amplo e espaçoso, diferente de terminais muito congestionados e/ou antigos.

O Aeroporto de Maceió (SBMO) apresenta uma folga (escassez) em termos de movimento de aeronaves com relação ao seu porte, mas não com relação à variável de passageiros. Este comportamento é similar para todos os aeroportos com escassez de movimento de aeronave, assim como também o contrário: todos os aeroportos com escassez de movimento de passageiros não apresentam escassez na variável de movimento de aeronaves. Como exemplo deste resultado, nota-se que não há folgas na variável de terminais de passageiros (TPS), indicando que os aeroportos da amostra possuem terminais ajustados à sua operação, mesmo apresentando potencial de crescimento em termos de movimento de passageiros, sugerindo que investimentos tenham de ser realizados em termos de aumento de infraestrutura para processar mais passageiros.

Com relação à variável tamanho de pista (PPD) o modelo apresentou aeroportos com “folgas” ou excesso desta infraestrutura. Isso pode ser explicado em função das pistas dos aeroportos mais eficientes da amostra serem, em sua maioria, pistas mais curtas, fazendo com que as pistas com maior extensão penalizem alguns aeroportos, como é o caso do aeroporto de Petrolina (SBPL). Este aeroporto que possui a maior extensão de pista (3.250m) e recebe aeronaves cargueiras de grande porte, ou seja, tanto pelo fato do modelo não considerar carga processada como um *output* como também pelo fato do SBPL ter a maior pista em extensão da amostra, o mesmo tem seu escore reduzido. Os aeroportos de Londrina (SBLO), Goiânia (SBGO) e Pampulha (SBBH) apresentaram os maiores indicadores de escassez de passageiros. Em particular, este último em função da atual restrição para voos comerciais de aeronaves de grande porte, fazendo com que haja uma escassez estimada de 2.128.242 passageiros/ano.

Outra análise possível é com relação ao movimento proporcional de variáveis. É a parte radial da melhoria de *inputs/outputs*, ou seja, a diminuição proporcional de *inputs* (entradas) ou o aumento proporcional de *outputs* (saídas). Os valores positivos significam aumento e negativos valores significam diminuição. A Figura 4.2 demonstra a análise para a variável de movimento de passageiros (MOVPA).

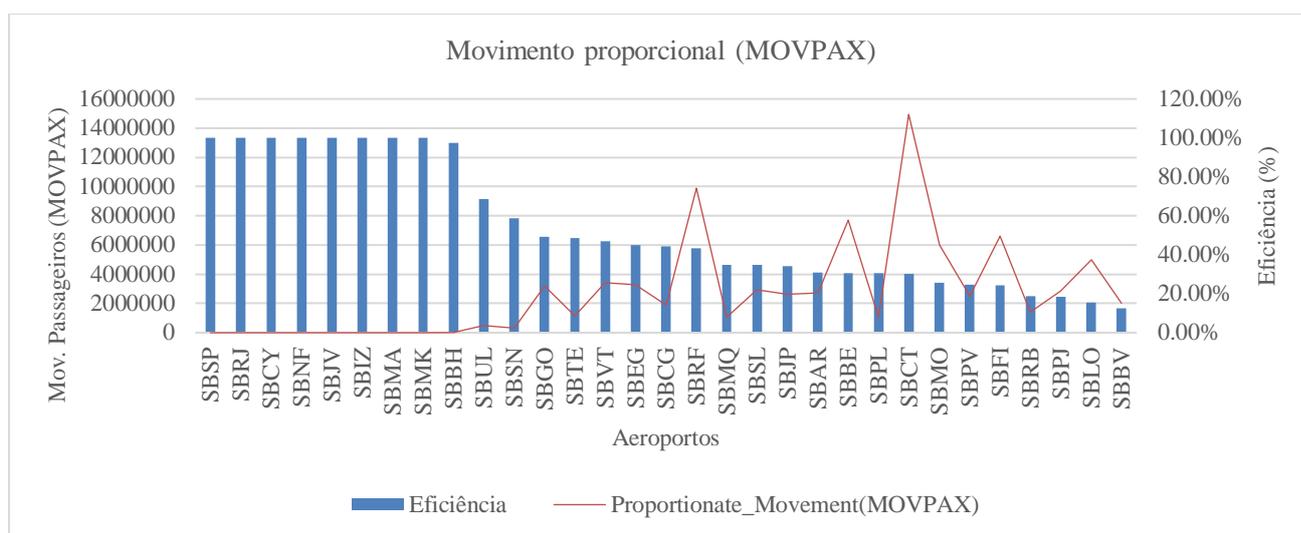


Figura 4.2: Análise de movimentos proporcionais da variável Movimento de Passageiros (MOVPAIX).

É possível notar que o Aeroporto de Curitiba (SBCT) apresenta um alto movimento positivo para a variável MOVPAIX, de 14,9 milhões de passageiros, indicando que esta seria a quantidade de passageiros necessários para que este aeroporto alcance a eficiência radial nesta variável. Interessante notar que este valor é exatamente o valor calculado como capacidade do Terminal de Passageiros (TPS) atual do SBCT, de acordo com o site da Infraero (INFRAERO, 2019).

Tabela 4.3: Resultados por clusters – Cenário de base.

Categoria de Aeroportos (DMU)	% Eficiência média	Nº de Aeroportos
Especial	63,70%	5
Classe 1	56,70%	4
Classe 2	45,23%	9
Classe 3	55,06%	13
Região		
S	54,02%	5
SE	85,50%	6
CO	53,03%	4
NE	43,50%	8
N	40,63%	8

De acordo com a Tabela 4.3, nota-se que, de maneira geral, os aeroportos com maior número de movimento de passageiros tendem a ser mais eficientes. Aeroportos do grupo Especial

possuem eficiência média cerca de 7% superior à categoria mais próxima, Classe 1 (56,70%). No entanto, aeroportos da Classe 3 mostram uma média acima daqueles da Classe 2, o que sugere que aeroportos da Classe 3 tendem a equilibrar um baixo número de movimento de passageiros/aeronaves com terminais e pistas menores em relação aos demais. Um fator que provavelmente contribui é o fato de que, dos aeroportos da Classe 2, 44% estão localizados na região Nordeste (SBMO, SBAR, SBJP e SBSL), onde existem aeroportos maiores relativamente próximos, como Salvador, Recife e Fortaleza, que concentram as principais demandas da região, fazendo com que o potencial de demanda (principalmente no setor do turismo) seja captado por grandes aeroportos da região Nordeste. Este fato sugere também que estes aeroportos da região Nordeste da Classe 2 possuem um grande potencial de melhoria de demanda por voos (principalmente comerciais), o que é evidenciado ao se observar as folgas (*slacks*) da variável de *output* “MOVAERO”, onde justamente os aeroportos de Maceió (SBMO), Aracajú (SBAR) e São Luís (SBSL) representam 3 dos 4 maiores indicadores de escassez (folgas) de movimento de aeronaves. Os aeroportos da região Sudeste tendem a ser mais eficientes, muito em função dos Aeroportos de Congonhas e Santos Dumont (maior ponte aérea do país) pertencerem a este grupo de aeroportos. Mais especificamente, estes dois aeroportos possuem pistas de pouso e decolagem (PPD) com extensão abaixo da média da amostra, ou seja, são bastantes eficientes pois processam alto número de aeronaves e passageiros mesmo com infraestrutura de menor porte quando comparados a outros aeroportos da amostra.

4.2.2 CENÁRIO 1 – MODELO PRINCIPAL (EFICIÊNCIA CARBONO-ENERGÉTICA)

Com a adição do consumo energético total (variável “CETOTAL”) como variável de entrada do modelo (*input*) e das emissões totais de CO₂ como variável indesejável de saída (*output* indesejável) a eficiência do cenário de base (operacional) é ajustada à análise proposta pela presente pesquisa através do modelo SBM-DEA. Neste cenário, um aeroporto considerado eficiente é aquele que, com sua atual infraestrutura e consumo energético, processa o máximo de aeronaves e passageiros possível ao mesmo tempo em que minimiza as emissões de CO₂. Portanto, por captar a capacidade de aeroportos em maximizar a sua operação (orientação a *output*) e ao mesmo tempo restringirem as suas emissões de CO₂ (*output* indesejável) no modelo SBM-DEA, esta é, aqui, denominada a eficiência carbono-energética dos aeroportos da amostra, por considerar, também, o consumo energético total como uma das variáveis de entrada (*input*).

Inicialmente, nota-se que 12 aeroportos passam a operar na fronteira de eficiência, com os aeroportos da Pampulha (SBBH), Uberlândia (SBUL), Vitória (SBVT) e Goiânia (SBGO), alcançando a fronteira de eficiência. Tal fato sinaliza que aeroportos da região Sudeste, de maneira geral, possuem uma tendência a melhor utilizar os seus recursos energéticos em conjunto com as suas características de infraestrutura e processamento de aeronaves e passageiros, uma vez que neste cenário todos aeroportos da região (dentre os 31 da amostra) alcançaram a fronteira de eficiência. A Figura 4.3 traz o comparativo dos escores de eficiência alcançados por ambos os cenários.

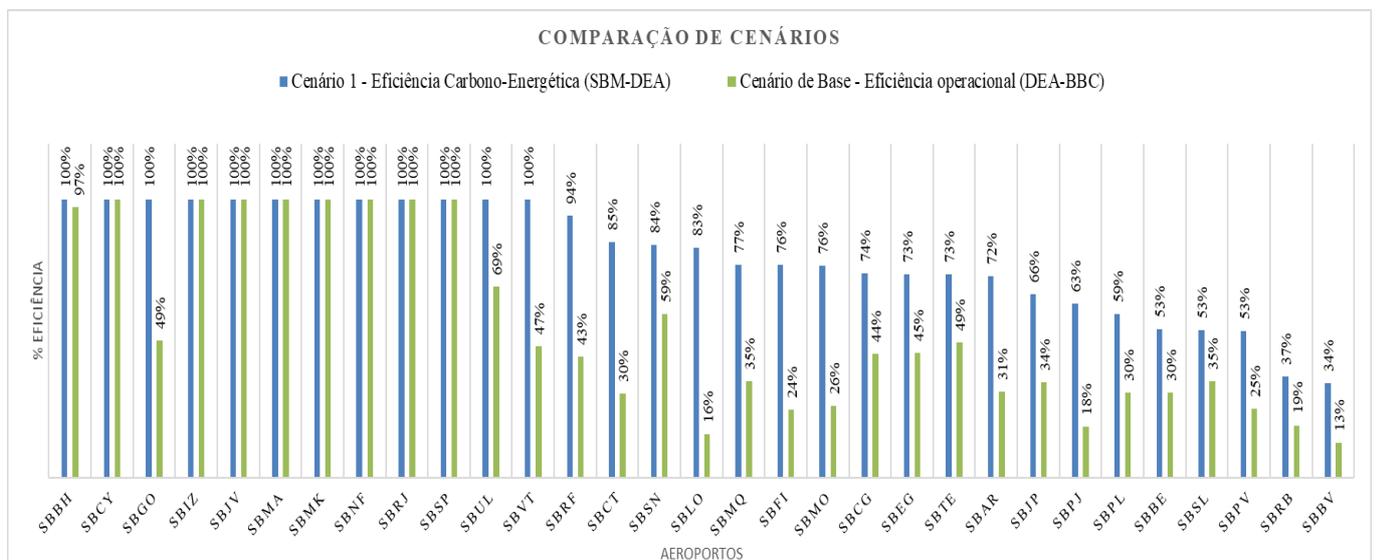


Figura 4.3: Comparação de escores de eficiência: Cenário de Base e Cenário 1 (Eficiência Carbono-Energética).

Nota-se uma melhoria média de 35% dos nos aeroportos da amostra, sugerindo que ao incluir as variáveis “CETOTAL” (*input*) e “EMCO2TOTAL” (*output* indesejável) os aeroportos aumentam se tornam mais eficientes. Em relação ao percentual de aumento da eficiência comparando os dois cenários, observa-se que os aeroportos da região Sul tiveram o maior aumento, em média de 58%, ao passo que aeroportos da região Norte mostraram o menor percentual médio de aumento da eficiência, de 26%. Isso reforça que aeroportos da região Norte sofrem com a falta de conectividade e por consequência possuem um baixo processamento de passageiros. O valor de 29% de melhoria de aeroportos da região Sudeste se dá em função de apenas 3 aeroportos terem melhorado de eficiência, pois os demais da região já estavam na fronteira de eficiência no modelo de base.

A exemplo de estudos anteriores (YU, 2004; YU *et. al.*, 2008; MARTINI *et. al.*, 2013) é observado um aumento no número de aeroportos eficientes quando também se leva em consideração os produtos indesejáveis, neste caso as emissões de CO₂. Por exemplo, no cenário de base (item 4.2.1), apenas 8 aeroportos estão na fronteira obtida sem *outputs* indesejáveis e sem considerar o consumo energético dos mesmos. Já no modelo de eficiência carbono-energética, 12 aeroportos figuram entre os aeroportos eficientes no modelo SBM-DEA.

A explicação tem dois motivos principais: em primeiro lugar, alguns aeroportos que produzem, de forma constante, poucos movimentos (ou seja, "aeroportos ineficientes" de acordo com a especificação de eficiência operacional) também dão origem a baixos níveis de emissões de CO₂, recuperando a eficiência quando essas externalidades negativas são incluídas na análise. Este é o caso dos Aeroportos de Maceió (SBMO) e Foz do Iguaçu (SBFI), que, com base nas folgas (*slacks*) do modelo de base, indicam escassez de movimento de aeronaves e que, ao serem incluídas as variáveis do modelo 1 (eficiência carbono-energética), os mesmos apresentaram dois dos maiores índices de melhoria da eficiência. Em segundo, conforme mencionado anteriormente, a característica das técnicas de eficiência não-paramétricas é que mais unidades se tornam eficientes quando fatores adicionais são incluídos na análise de programação linear. Assim, o número de aeroportos eficientes aumenta se compararmos as estimativas do modelo DEA-BCC (Cenário de base) com as SBM-DEA (Cenário 1), simplesmente porque adicionamos os *outputs* indesejáveis ao problema de otimização. A Tabela 4.4 mostra a avaliação da eficiência média para este cenário.

Tabela 4.4: Resultados por clusters – Cenário 1 (eficiência carbono-energética).

Categoria de Aeroportos (DMU)	% Eficiência média	Nº de Aeroportos
Especial	90%	5
Classe 1	88%	4
Classe 2	78%	9
Classe 3	75%	13
Região		
S	88.78%	5
SE	100.00%	6
CO	84.03%	4
NE	74.21%	8
N	63.73%	8

Com relação à análise de categorias (clusters) da Tabela 4.4, interessante notar que, diferentemente do cenário de base onde apenas o aspecto operacional é considerado, no cenário da eficiência carbono-energética os aeroportos da Classe 2 não representam o menor valor médio de eficiência, pois estes são os aeroportos da Classe 3, com 75%. Este é um forte indicio de que aeroportos menores, com menor número de voos e movimento de passageiros, tendem a ser os menos eficientes do ponto de vista carbono-energético, pois necessitam manter operacionais todos os sistemas do aeroporto (iluminação, ar condicionado, central de água gelada, dentre outros), independente do movimento de passageiros e aeronaves. Em contrapartida, aeroportos da Classe 2 possuem uma melhor eficiência carbono-energética por terem um gasto energético mais eficiente em função de grande parte do seu mix operacional de aeronaves ser composto por aeronaves de pequeno porte (jatos regionais e turbo-hélices) que emitem menor quantidade de CO₂, como o caso do Aeroporto da Pampulha (SBBH), que atualmente é destinado exclusivamente às operações da aviação regional e geral (que envolve aeronaves de pequeno porte e voos fretados).

Tabela 4.5: Folgas (*slacks*) do modelo do cenário 1.

Aeroporto (DMU)	Folgas (slacks) (CETOTAL)	Folgas (slacks) (TPS)	Folgas (slacks) (PPD)	Folgas (slacks) (MOVAERO)	Folgas (slacks) (MOVPAZ)	Folgas (slacks) (EMCO2TOTAL)
SBBH	0	0	0	0	0	0
SBCY	0	0	0	0	0	0
SBGO	0	0	0	0	0	0
SBIZ	0	0	0	0	0	0
SBJV	0	0	0	0	0	0
SBMA	0	0	0	0	0	0
SBMK	0	0	0	0	0	0
SBNF	0	0	0	0	0	0
SBRJ	0	0	0	0	0	0
SBSP	0	0	0	0	0	0
SBUL	0	0	0	0	0	0
SBVT	0	0	0	0	0	0
SBRF	-62509	-25803	-916	13803	0	0
SBCT	-21168	-76713	0	28242	628633	0
SBSN	0	0	-297	2551	76579	-1242
SBLO	-639	-34681	0	3565	432217	0
SBMQ	-1464	-1069	0	5113	197499	0
SBFI	-1434	-10725	-2	18799	0	0
SBMO	-13721	-11182	-457	17630	0	0
SBCG	0	0	-408	19109	117944	-158

SBEG	-76971	-62048	-351	24724	1202852	0
SBTE	0	0	-25	13867	0	-2086
SBAR	-6345	-2595	-66	14609	0	0
SBJP	-3609	0	-290	21325	0	0
SBPJ	-7783	-6688	-388	12778	509638	0
SBPL	-2441	-386	-1150	10094	204202	0
SBBE	0	0	-489	58237	3814028	0
SBSL	0	0	-61	37045	1137912	0
SBPV	0	0	-207	21142	960068	0
SBRB	0	0	-42	17663	808550	-708
SBBV	-2086	-384	-600	17531	738688	0

Nota-se que o modelo aponta que o Aeroporto de Manaus (SBEG) possui a maior folga (excesso) em relação à variável de *input* referente ao consumo energético total, o que é explicado devido à operação de seu Terminal de Logística de Cargas (TECA) de grande porte, além de um Terminal de Passageiros (TPS) de 97,2 mil m², o segundo maior da amostra, atrás apenas do TPS do Aeroporto de Curitiba (SBCT), com área de 112.433 m². Ainda, o porte de seu TPS faz com que possua um excesso nesta variável (TPS) atrás apenas do Aeroporto de Curitiba (SBCT). A esse respeito, interessante notar que o SBCT, embora o maior excesso (*slack*) em termos de área de seu terminal (TPS) o mesmo é capaz de consumir sua energia de forma mais eficiente do que o Aeroporto de Manaus (SBEG), uma vez que possui menor folga para a variável de consumo energético total (CETOTAL), fazendo deste um aeroporto mais eficiente em termos energéticos e ambientais. Há de se levar em conta também, que a região Norte possui os maiores fatores de emissão de CO₂ por consumo de energia elétrica (Tabela 4.5) o que também contribui para a diminuição da eficiência carbono-energética de aeroportos da região. No entanto, é preciso ressaltar que, em função de não ter sido escopo do presente trabalho a inclusão de carga transportada como um *output* desejável, o Aeroporto de Manaus é penalizado pois possui um grande volume de movimento de carga associado que não está contabilizado no modelo (apenas aeronaves e passageiros estão sendo considerados), o que aumentaria sua eficiência e resultaria em uma menor escassez (folga) de movimento de passageiros e aeronaves apresentada na Tabela 4.5.

Outro aspecto relevante é com relação às folgas da variável de emissões de CO₂. Apenas 4 aeroportos demonstram que há excesso de emissões de CO₂: Aeroportos de Campo Grande (SBCG), Rio Branco (SBRB), Santarém (SBSN) e Teresina (SBTE). De acordo com a análise das folgas (*slacks*) estes aeroportos demonstram não conseguir alocar as emissões de CO₂ nas demais variáveis de maneira a equilibra-las e alcançar a eficiência, e portanto, a variável

“EMCO2TOTAL” apresenta folgas. Em outras palavras, o modelo indica que estes aeroportos não possuem excesso em seu consumo de energia bem como na área de seus terminais (nota-se o valor “0” para as folgas destas variáveis) e, por este motivo, as emissões indesejáveis de CO₂ não conseguem ser contrabalanceadas pelos *inputs*, fazendo que que apareçam excessos na variável de emissão total de CO₂ para estes aeroportos. Ainda a respeito destes aeroportos, nota-se que há uma concentração entre aeroportos da Classe 3 (SBSN, SBTE e SBRB), reforçando que aeroportos menores tendem de fato a possuir menor eficiência carbono-energética, conforme demonstrado também na Tabela 4.4. Outra explicação a ser explorada é que, normalmente, aeroportos menores recebem equipamentos usados de grandes aeroportos, que necessitam com maior frequência substituí-los por novos equipamentos. Portanto, tal fato pode contribuir para um maior consumo de combustível fóssil proporcional e conseqüente aumento de ineficiência carbono-energética em aeroportos de menor porte, como aqueles da Classe 3.

Com o objetivo de determinar a influência das variáveis de entrada (*inputs*) no desempenho dos aeroportos, cada uma das variáveis de *input* do modelo DEA foi correlacionada ao grau de eficiência relativa obtido para o Cenário 1. A Tabela 4.6 mostra as correlações entre os recursos (variáveis de *input*) e o desempenho (eficiência) dos aeroportos.

Tabela 4.6: Correlação de variáveis de entrada com eficiência obtida.

Variáveis	PPD	TPS	CETOTAL
% Eficiência relativa	-0.516	.197	.148

Observa-se que o desempenho apresentou correlação negativa com o tamanho de pista de pouso e decolagem, indicando que quanto menores as pistas, maior o desempenho do aeroporto. Esta resposta indica que aeroportos com pistas menores tendem a ser mais eficientes, uma vez que necessitam de menos infraestrutura para processar um grande número de passageiros e aeronaves. No entanto para as variáveis de Terminal de Passageiros (TPS) e consumo energético total (CETOTAL), a correlação foi desprezível, muito provavelmente em função dos Aeroportos de Congonhas e Santos Dumont não terem tanta influência sobre os demais aeroportos nestas variáveis, como é o caso do tamanho de pista (PPD). Por terem pistas relativamente curtas e serem os aeroportos de maior movimento da amostra, o modelo tende a assumir a correlação negativa.

Com relação às mudanças que as variáveis devem sofrer para se alcançar a fronteira de eficiência, ou as metas para cada variável, a Figura 4.4 traz o percentual de redução (no caso dos *inputs*) ou aumento (no caso dos *outputs*) para cada variável.

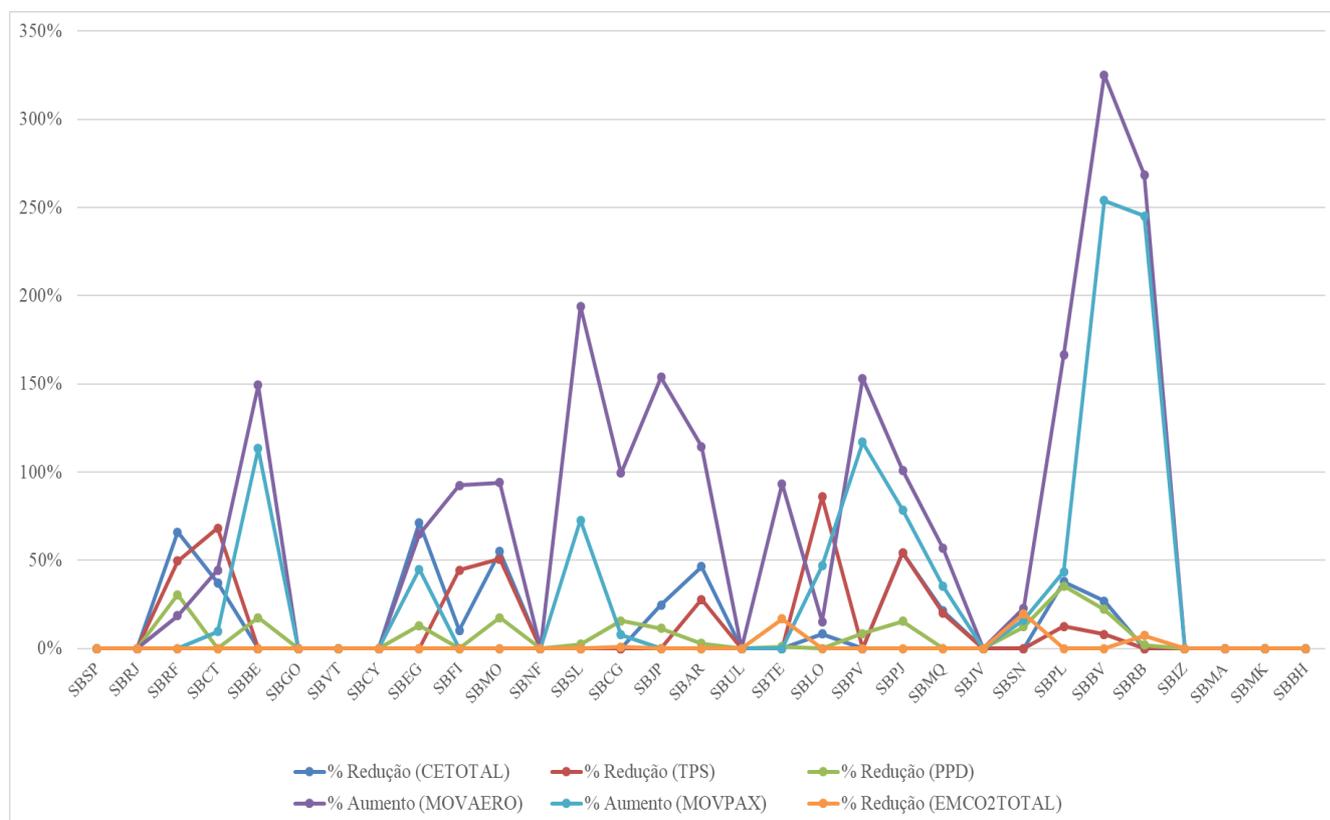


Figura 4.4: Projeção (metas) das variáveis do cenário 1, em percentual.

Em termos de redução nas variáveis de *input* nota-se que alguns terminais de passageiros como dos aeroportos de Curitiba (SBCT), Londrina (SBLO) e Palmas (SBPJ) possuem maiores percentuais de redução da variável TPS, indicando que estes terminais possuem margem para melhoria da eficiência em termos de processamento de passageiros e aeronaves, embora tanto os terminais quanto as pistas de pouso e decolagem sejam estruturas construídas e na prática não podem ser reduzidas, apenas melhor utilizadas ou ampliadas. Com relação ao consumo energético total, nota-se que os aeroportos de Manaus (SBEG), Recife (SBRF), Maceió (SBMO) e Aracaju (SBAR) possuem, em ordem decrescente, os maiores percentuais de redução. Com exceção do Aeroporto de Manaus (SBEG), todos os demais estão localizados na região Nordeste. Os aeroportos de Manaus (SBEG) e Recife (SBRF) possuem grandes estruturas de Terminal de Logística de Carga (TECA), o que leva a um maior consumo energético agregado. Além disso, fatores ligados à região como o clima, preço de combustíveis

fósseis, economia local ou mesmo o potencial turístico (aeronaves maiores) podem estar influenciando um alto consumo energético proporcional destes aeroportos.

De maneira geral, é possível observar que os aeroportos da amostra possuem um claro potencial para o aumento de sua demanda, principalmente em termos de movimento de aeronaves, que na maioria dos casos acompanha a demanda por passageiros, porém com percentuais inferiores. Este fato também indica um grande potencial de fomento à aviação na região Norte do país, onde, em ordem decrescente, os aeroportos de Boa Vista (SBBV), Rio Branco (SBRB) e Porto Velho (SBPV) mostraram os maiores potenciais de crescimento em número de passageiros. Portanto, com um aumento da demanda por voos nos aeroportos ineficientes segundo o modelo DEA, a sua eficiência carbono-energética seria também aumentada.

4.2.3 CENÁRIO 2 – (Poluentes Atmosféricos)

A Tabela 4.7 mostra os resultados do grau de eficiência e das folgas (*slacks*), considerando como *outputs* indesejáveis as emissões de poluentes atmosféricos. Este modelo considera a capacidade de aeroportos em processar o maior número possível de aeronaves e passageiros em conjunto com a minimização das emissões de poluentes locais associados à operação de aeronaves, que são as maiores fontes de emissão de poluentes atmosféricos em aeroportos.

Tabela 4.7: Folgas (slacks) do cenário 2 (poluentes atmosféricos).

DMU	EF.(%)	Folgas (slacks) (TPS)	Folgas (slacks) (PPD)	Folgas (slacks) (MOVAERO)	Folgas (slacks) (MOVPAZ)	Folgas (slacks) (EMCOAERO)	Folgas (slacks) (EMNOXAERO)
SBAR	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBBH	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBCY	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBGO	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBIZ	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBJV	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBMA	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBMK	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBMO	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBNF	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBRJ	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBSP	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBUL	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBVT	100.00%	0	0	0	0	0	0
SBRF	94.80%	-28713	-1145	7512	0	-21	0
SBCT	85.90%	-90161	0	27587	0	-42	0

SBBE	85.80%	-6200	-441	20915	0	0	-20
SBLO	83.60%	-35560	0	990	172908	-5	-12
SBFI	83.20%	-16021	-96	14023	0	0	-10
SBSN	82.90%	0	-300	2189	49525	-3	-8
SBMQ	80.10%	-1049	0	5304	216880	0	0
SBEG	76.70%	0	-370	30649	955849	-5	0
SBCG	76.00%	0	-334	24235	0	0	0
SBJP	75.20%	-1926	-389	14423	0	0	-16
SBTE	75.00%	0	-95	8593	0	-8	-21
SBPJ	69.60%	-7598	-400	11530	447397	-2	0
SBPL	65.10%	-409	-1150	10003	199420	0	-2
SBPV	59.50%	0	-226	20740	1002124	0	0
SBSL	58.70%	0	-69	39665	1047815	0	-9
SBRB	44.60%	0	-53	16443	717348	0	-11
SBBV	40.60%	-347	-596	17940	733404	0	0

De maneira geral, nota-se que os aeroportos possuem poucas folgas (excessos) nas emissões de poluentes atmosféricos. O fato da maior redução de CO (folgas) ser observada para os aeroportos de Curitiba (SBCT) e Recife (SBRF) indica que estes aeroportos sejam prioritários para ações de redução das emissões e melhoria operacional, como, por exemplo, a melhoria de procedimentos de tráfego de aeronaves em solo ou a adição de novas pistas de taxiamento (*taxyways*) que diminuam o tempo de taxiamento, uma vez que o CO é um poluente característico das fases de *taxi in* e *taxi out* do ciclo LTO. Em complemento, os resultados indicam que aeroportos que operam majoritariamente aeronaves de pequeno porte (ex.: SBBH, SBPV e SBBV) não apresentam excesso nas emissões dos poluentes. Os resultados mostram que os aeroportos de Maceió (SBMO) e Aracaju (SBAR) alcançam a fronteira de eficiência e este fato pode estar relacionado ao porte destes aeroportos, pois, mesmo estando na região Nordeste onde nos demais cenários foi a região com um dos menores índices de eficiência, estes são aeroportos de médio porte que operam aeronaves de grande porte. Portanto, a melhoria da eficiência em termos de passageiro processado por tonelada de poluente emitida faz com que, neste cenário, a ineficiência destes aeroportos seja compensada pelas variáveis de *input* e *output* (desejáveis).

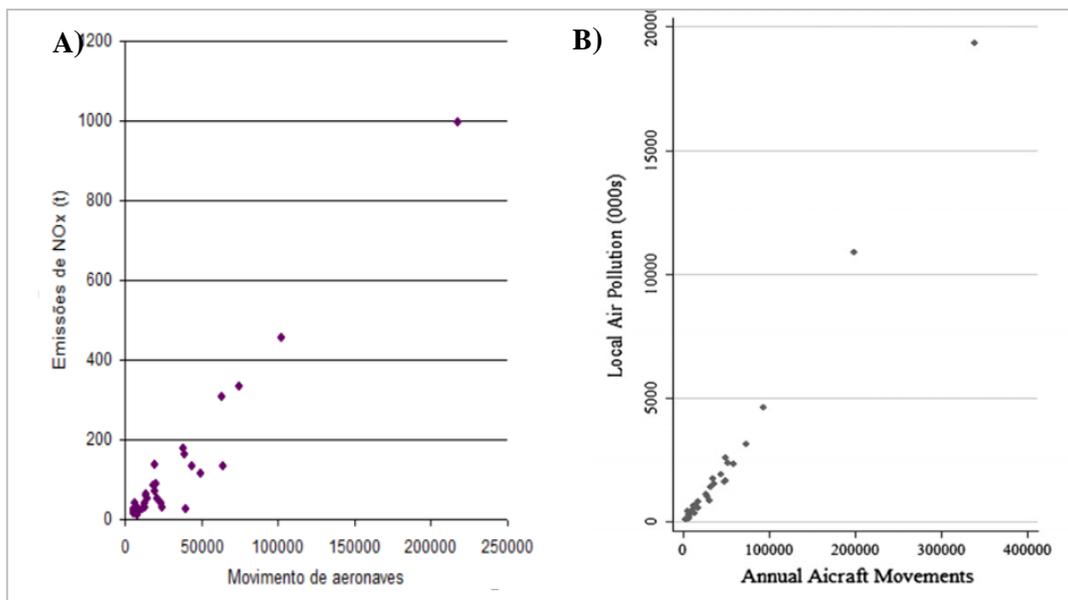


Figura 4.5: Comparativo de emissões de poluentes: A) do Autor e B) Martini *et. al.* (2013).

A Figura 4.5 mostra o comparativo com o estudo de Martini *et. al.* (2013) da relação entre as variáveis de poluição local com o movimento de passageiros. O perfil das duas variáveis, embora calculadas de maneiras distintas, mostra que há correlação positiva entre ambas, mesmo considerando aeroportos de porte bastante heterogêneos em comparação com a presente pesquisa, pois os movimentos de aeronaves do referido estudo são bastante superiores (o estudo utiliza 33 aeroportos italianos em sua amostra).

Nota-se também que as reduções necessárias nas emissões de NO_x são mais frequentes do que aquelas para o CO. Isso acontece devido ao fato da maior parte das emissões de NO_x estar relacionada às fases de *climb*, *take off* e *approach* do ciclo LTO, onde os motores operam em regimes de maior potência, uma vez que a formação desses óxidos é favorecida por condições de temperatura mais elevada, as quais ocorrem durante os regimes de alta potência. Nessas condições, a reação de combustão é mais eficiente, acarretando em um *trade-off* que resulta na diminuição das emissões de gases provenientes da queima incompleta do carbono presente no combustível (CO e COV, por exemplo) e aumenta as emissões dos óxidos de nitrogênio. Em que pese na fase *approach* a potência não seja tão elevada, as emissões desse gás se tornam relevantes em consequência do tempo em que as aeronaves permanecem nesse regime.

4.2.4 CENÁRIO 3 – (Emissões de CO₂ + Poluentes Atmosféricos)

Conforme mencionado, este modelo considera tanto a eficiência carbono-energética quanto a eficiência dos aeroportos apenas com emissões de poluentes atmosféricos (cenário 2), sendo o modelo com maior número de variáveis. A Tabela 4.8 mostra os resultados do grau de eficiência.

Tabela 4.8: Resultados do cenário 3.

DMU	Eficiência (%)	Folgas (slacks) (CETOTAL)	Folgas (slacks) (TPS)	Folgas (slacks) (PPD)	Folgas (slacks) (MOVAERO)	Folgas (slacks) (MOVPAE)	Folgas (slacks) (EMCOAERO)	Folgas (slacks) (EMNOXAERO)	Folgas (slacks) (EMCO2TOTAL)
SBAR	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBBH	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBCY	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBG0	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBIZ	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBIV	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBMA	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBMK	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBMO	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBNF	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBRJ	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBSP	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBUL	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBVT	100.00%	0	0	0	0	0	0	0	0
SBRF	95.60%	63539	28713	1145	7512	0	-21	0	-1081
SBCT	87.20%	25695	82841	0	19866	0	-48	-20	-7993
SBEI	85.10%	4052	16429	103	13656	0	-1	-10	-1407
SBMO	83.00%	1636	1127	0	4549	140217	-1	-3	-394
SBL0	82.40%	1699	35560	0	990	172908	-5	-12	-2951
SBSN	82.20%	383	0	300	2189	49525	-3	-8	-1618
SBBE	80.60%	15183	6200	441	20915	0	0	-20	-44340
SBEG	78.60%	91740	0	460	9021	0	-37	-69	-15314
SBCG	76.80%	2471	1244	503	8988	0	-17	-23	-5829
SBJP	76.30%	7576	3541	417	12967	0	-2	-17	-3329
SBTE	74.50%	2670	0	95	8593	0	-8	-21	-4709
SBPJ	73.00%	8358	7598	400	11530	447397	-2	0	-881
SBPL	69.90%	2464	409	1150	10003	199420	0	-2	-24
SBSL	64.40%	5256	0	66	39251	898860	-3	-14	0
SBPV	64.20%	6274	0	257	14684	489583	-14	-24	-6101
SBRB	49.20%	1291	0	53	16443	717348	0	-11	-1976
SBBV	46.30%	2086	384	600	17531	738688	0	0	0

Com relação ao grau ou escore de eficiência deste cenário, nota-se que, mesmo com o acréscimo das variáveis de poluição atmosférica, os mesmos aeroportos do cenário 2 possuem indicador de 100% de eficiência. Isso demonstra que, mesmo com a tendência de ser mais “benevolente” com os escores de eficiência ao serem acrescentadas variáveis no modelo DEA, o cenário 3 teve resultados bastante similares aos do cenário 2.

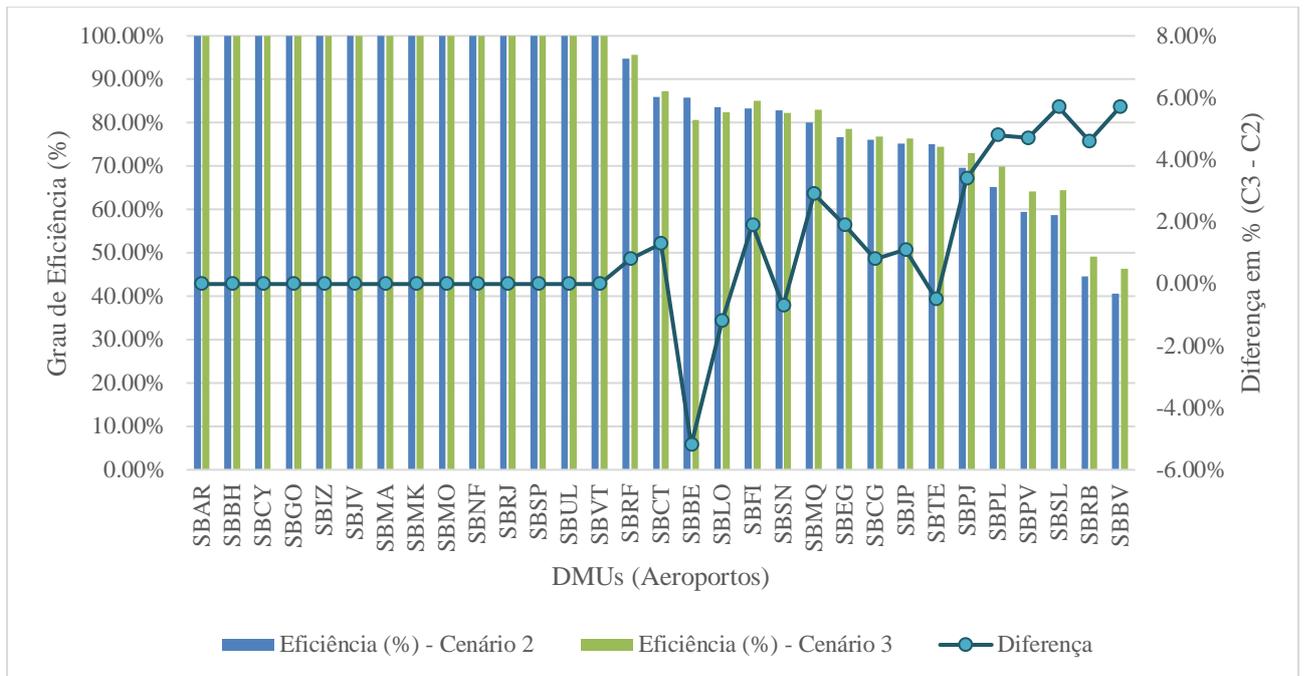


Figura 4.6: Comparação entre Cenário 2 (poluentes atm.) com Cenário 3 (CO₂ + poluentes atm.)

A Figura 4.6 traz um comparativo entre os dois cenários, mostrando o percentual de variação entre ambos a partir dos resultados do cenário 3. A partir de sua análise, nota-se que apenas 4 aeroportos obtiveram uma variação negativa na comparação entre os cenários, em ordem decrescente: aeroportos de Belém (SBBE), Londrina (SBLO), Santarém (SBSN) e Teresina (SBTE). Isto indica que, mesmo com todas as variáveis consideradas, estes aeroportos ainda assim foram mais eficientes no cenário 2, o que significa que possuem margem para melhoria da eficiência carbono-energética, além de corroborar com resultados de cenários anteriores onde aeroportos da região Norte (neste caso Belém e Santarém) tendem a ser menos eficientes e devem ser prioritariamente avaliados na busca por projetos e ações de melhoria da eficiência carbono-energética.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados e análises apresentadas, o presente estudo possibilitou uma análise da eficiência carbono-energética de 31 aeroportos brasileiros operados pela Infraero para o período de 2016-2018, além de elaboração e avaliação de cenários que consideram a emissão dos poluentes CO e NO_x das aeronaves. O estudo mostra-se relevante no campo de estudos ambientais em transportes, tendo em vista o caráter de ineditismo da aplicação da modelagem DEA (modelo SBM) relacionando o consumo energético e as emissões de CO₂ e de poluentes de aeroportos com seus aspectos operacionais (infraestrutura e processamento de aeronaves e passageiros).

Os aeroportos são de grande importância para a economia e conectividade de diversas regiões do Brasil e do mundo. Assim como quaisquer outros modos de transporte, a aviação e por conseguinte os aeroportos causam impactos ao meio externo. Para que possam cumprir adequadamente seu papel nas dinâmicas social e econômica nacionais, é necessário que apresentem continuamente condições apropriadas de uso para seus usuários e para aqueles que os circundam. No Brasil, a avaliação ambiental de aeroportos sob a ótica da eficiência é inexplorada, ainda que seja tema notoriamente relevante no contexto internacional em função, principalmente, de acordos acerca de restrições climáticas e de melhoria da qualidade do ar no entorno dos aeroportos. Entende-se que os resultados gerados por esta pesquisa foram satisfatórios e para alcançá-los, buscou-se determinar um escopo de avaliação adequado ante a abordagem pretendida.

Diante da dualidade do tema, abordando questões ambientais e de transportes (aeroportos), foi necessário verificar o arcabouço acadêmico de trabalhos com enfoque similar, de forma a delimitar tanto os modelos quanto as variáveis a serem utilizadas na presente pesquisa. Dessa forma, foi feita uma discussão acerca dos eixos temáticos da pesquisa, onde buscou-se entender a melhor forma de explorar metodologicamente a construção de cenários para análise pretendida. Assim, foram propostos 4 cenários, sendo o primeiro uma linha de base para comparação e o principal deles o cenário onde o consumo energético dos aeroportos e as suas emissões de CO₂ foram considerados. Por fim, foram criados indicadores ambientais de aeroportos para comparação com estudo anterior e foram avaliados os resultados da eficiência carbono energética dos aeroportos da amostra coletada, além da eficiência sob demais aspectos considerados nos cenários.

A abordagem SBM-DEA foi escolhida para aplicação e sua implementação se deu por meio de um método composto por quatro etapas, incluindo a formação de um banco de dados de variáveis, necessárias para a obtenção das variáveis finais utilizadas nos modelos DEA. A avaliação do modelo principal apresentou que 12 aeroportos (ou 38% da amostra) são considerados eficientes do ponto de vista carbono-energético, mesmo considerando como pares os aeroportos de Congonhas e Santos Dumont (eficiência relativa), que possuem processamento de aeronaves e passageiros notadamente acima dos demais. Os aeroportos eficientes da amostra contemplaram todos aqueles localizados na região Sudeste (6 aeroportos) ao passo que apenas 1 dos 8 aeroportos da região Norte foi considerado eficiente. Este fato sinaliza que regiões mais desenvolvidas economicamente possuem maiores demandas por voos comerciais e de aviação geral, o que também gera maiores investimentos em suas infraestruturas. Logo, este cenário contribui para a sua eficiência em termos energéticos, uma vez que estes aeroportos são grandes consumidores de energia, mas também são capazes de processar, proporcionalmente, grandes quantidades de aeronaves e passageiros.

Nota-se que a DEA se propõe a avaliar a eficiência relativa de cada DMU em relação às unidades que compõem o universo avaliativo, de modo que as ineficiências não são absolutas. Os resultados da análise da eficiência carbono-energética bem como dos demais cenários e dos indicadores podem fornecer informações úteis para os formuladores de políticas do governo e administradores dos aeroportos. Uma melhor compreensão dos pontos fortes e fracos dos diferentes aeroportos pode capacitá-los a formular estratégias de desenvolvimento que possam melhorar o seu desempenho ambiental e energético.

Dessa forma, os resultados desta pesquisa podem servir para a autoridade aeroportuária, permitindo uma administração mais eficiente do ponto de vista carbono-energético, considerando as crescentes pressões ambientais do setor e das comunidades adjacentes aos aeroportos. Mais precisamente, pode auxiliar na tomada de decisão em respeito ao financiamento de projetos de eficiência energética e redução das emissões, definindo aeroportos prioritários para cada ação e estabelecendo diferentes políticas para diferentes categorias (cluster) de aeroportos, considerando suas particularidades locais, regionais bem como a sua integração com a rede. Em complemento, o fato do modelo DEA indicar quais aeroportos possuem menor eficiência carbono-energética pode auxiliar no monitoramento e controle do consumo de energia de aeroportos, numa ação que atualmente já é realizada nos aeroportos operados pela Infraero, através de seu Sistema de Gestão do Consumo de Energia – GCE.

Em complemento, as estimativas de emissões de CO₂ aeronaves referentes ao ciclo LTO bem como do uso das APU superam uma limitação de escopo justificada pela falta de dados do estudo de Kilkış e Kilkış (2016). Por fim, os resultados também indicaram que aeroportos menores, com menor número de voos e movimento de passageiros, tendem a ser os menos eficientes do ponto de vista carbono-energético, pois necessitam manter operacionais todos os sistemas do aeroporto (iluminação, ar condicionado, central de água gelada, dentre outros), independente do movimento de passageiros e aeronaves. Além disso, em análise por categoria de aeroportos, ficou evidenciado a importância do mix operacional de aeronaves para o seu nível de eficiência carbono-energética, pois aeroportos médios com predominância de aeronaves de pequeno porte (jatos regionais e turbo-hélices) emitem menor quantidade de CO₂ e tendem a ser mais eficientes.

5.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O modelo de Análise Envoltória de Dados – DEA geralmente tem algumas limitações, por esse motivo as limitações desta pesquisa são:

- Os resultados deste trabalho estão sujeitos ao determinismo e à eficiência relativa às melhores práticas da técnica de Análise Envoltória de Dados - DEA, ou seja, condicionadas às observações;
- Os resultados deste estudo estão condicionados às variáveis incluídas e às semelhanças destas variáveis, ou seja, esses resultados mudam conforme são incluídos ou excluídos novas variáveis ou novos aeroportos (DMUs);
- Dificuldades de acesso a informações consolidadas de aeroportos, tendo sido reduzido o escopo para 31 aeroportos públicos administrados pela Infraero;

5.2 RECOMENDAÇÕES A FUTURAS PESQUISAS

Este item é destinado à proposição de sugestões para futuras pesquisas:

- Aplicação de uma etapa de segundo estágio em DEA, buscando compreender relação de causalidade entre variáveis, que poderá ser realizada adicionando ao modelo variáveis *dummy* explicativas com as eficiências alcançadas pelos modelos;
- Inserção de outras variáveis nos modelos DEA, como: número de equipamentos de solo, número de posições de paradas de aeronaves, extensão das vias internas e movimentação de cargas;
- Aplicação de outros modelos DEA para comparação de resultados e melhoria da robustez do modelo SBM-DEA;
- Criação de cenários de medidas de eficiência energética, como, por exemplo, a implantação de plantas solares (energia fotovoltaica) em determinados aeroportos e avaliação da mudança do grau de eficiência carbono-energética considerando a redução no consumo de energia elétrica bem como a redução das emissões de CO₂ associadas a tais medidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER N, LIEBERT V, YAZHEMSKY E (2013) Benchmarking airports from a managerial perspective. *Omega* 41(2):442–458.
- AEROPUERTOS ESPAÑOLES Y NAVEGACIÓN AÉREA – AENA (2015). Annual Report and CR report 2015; AENA: Madrid, Spain, 2015. Disponível em: http://www.aena.es/InformeInteractivo_ing/files/assets/common/downloads/publication.pdf> Acesso em 15 de fev. de 2019).
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC (2019) Relatório de Demanda e Oferta do Transporte Aéreo 2018. <http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/demanda-e-oferta-do-transporte-aereo>. Acessado em 28 Jan 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL - ANAC (2014) - Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil. Ano base 2013. 1ª edição.
- AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL - ACI (2010). Guidance Manual: Airport GHG emissions management. Disponível em: <<http://www.aci.aero/Publications/Full-Publications-Listing/Guidance-Manual-Airport-Greenhouse-Gas-Emissions-Management>>.
- AIRPORTS COUNCIL INTERNATIONAL - ACI (2018). Airport Carbon Accreditation (ACA) - Annual Report 2017-2018.
- AIRPORT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM – ACRP (2011). Airport Performance Indicators.
- AIRPORT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM – ACRP (2012). Report 64: Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APUs and Alternative Systems, Transportation Research Board, Washington, D.C. 86p.
- ALBA, SERGIO ORTEGA, E MARIO MANANA. (2016). “Energy research in airports: A review”. *Energies* 9 (5): 1–19.
- ANP (2014). AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Anuário Estatístico Brasileiro Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, disponível em <http://www.anp.gov.br/wwwanp/?dw=73191> (Acessado em nov/2018).
- BAA. (2010). Heathrow and climate change. BAA Airports. Disponível em: <http://www.heathrowairport.com/static/Heathrow/Downloads/PDF/LHR_Climate_brochure.pdf>
- BANKER, R.D., CHARNES, A., COOPER, W.W., (1984). Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science* 30, 1078–1092.
- BARROS, C., (2008). Airports in Argentina: technical efficiency in the context of an economic crisis. *Journal of Air Transport Management*, 14 (6), 315–319.

- BAXTER, GLENN. (2018). An Assessment of Airport Sustainability , Part 2 — Energy Management at Copenhagen Airport, 1–27.
- BAZARGAN, MASSOUD, E BIJAN VASIGH. (2003). Size versus efficiency: A case study of US commercial airports. *Journal of Air Transport Management* 9 (3): 187–93.
- BENITO, ARTURO, E GUSTAVO ALONSO. (2018). Energy Efficiency in Air Transportation. 1st ed. Butterworth-Heinemann.
- BEZERRA, GEORGE C.L., E CARLOS F. GOMES (2018). Performance measurement practices in airports: Multidimensionality and utilization patterns. *Journal of Air Transport Management* 70: 113–25.
- BEZERRA, GEORGE C.L., E CARLOS F. GOMES (2016). Performance measurement in airport settings: a systematic literature review”. *Benchmarking* 23 (4): 1027–50.
- BOGETOFT, P., OTTO, L., 2010. Benchmarking with DEA, SFA, and R. Springer, New York.
- BRAUN, P.; JARDIM, C. D. S.; RÜTHER, R. (2007) Análise de Contribuição Energética de Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edificações: Aeroporto Internacional de Florianópolis. In: IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto, MG, Anais... Porto Alegre, RS: Anais do ENCAC 2007, 2007. p. 260-269.
- BRUNETTA, L., RIGHI, L. AND ANDREATTA, G. (1999). An operations research model for the evaluation of an airport terminal: SLAM (simple landside aggregate model). *Journal of Air Transport Management*, Vol. 5, pp. 161–175.
- CAVAIGNAC, LAURENT, E ROMAIN PETIOT. (2016). “A quarter century of Data Envelopment Analysis applied to the transport sector : A bibliometric analysis”. *Socio-Economic Planning Sciences*.
- CAVES, R.E. E GOSLING, G.D. (1999). Strategic Airport Planning. Pergamon, Elsevier Science, Amsterdam.
- CHAO, CHING CHENG, TAIH CHERNG LIRN, E HUNG CHUN LIN. (2017). “Indicators and evaluation model for analyzing environmental protection performance of airports”. *Journal of Air Transport Management* 63: 61–70.
- CHARNES, A.; COOPER, W.W.; RHODES, E. (1978). Measuring the efficiency of decision-making units. *European Journal of Operational Research*, v.2, n.6, p.429-444. 1978.
- CHEN, LILI, E FENG HE. (2017). “Measurements and factors of carbon emission efficiency”. *Polish Journal of Environmental Studies* 26 (5): 1963–73.
- CHERRY, J. (2008). Airport Council international (ACI): airports-actions on climate change. Presented at the GIACC 1st Meeting Group on International Aviation and Climate Change.
- COELLI, T.; PERELMAN, S. (1998). A comparison of parametric and non-parametric distance functions: with application to European railways. *European Journal of Operational Research*, v. 117, n. 2, p.326-339.

- COHEN, Y. (2015) Carbon Management at Airports. Dissertação de Mestrado. The Faculty of Graduate and Postdoctoral Studies, Resource Management and Environmental Studies, The University of British Columbia, Vancouver, Canadá.
- COOPER, W., SIEFORD, L., TONE, K., (2000). Data Envelopment Analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, Reference and DEA–Solver software. Kluwer Academic Publishers, Norwell.
- COOPER, W.W.; SEIFORD, L.; TONE, K.; ZHU, J. (2007). Some models and measures for evaluating performances with DEA: past accomplishments and future prospects. *Journal of Productivity Analysis*, v.28, n.3, p.151-163.
- COSTA A.; BLANES, L. M.; DONNELLY, C; KEANE, M. (2012). Review of EU airport energy interests and priorities with respect to ICT, energy efficiency and enhanced building operation. Twelfth International Conference for Enhanced Building Operations, Manchester, UK, October 23-26, 2012
- CURI, CLAUDIA, SIMONE GITTO, E PAOLO MANCUSO. (2011). “New evidence on the efficiency of Italian airports: A bootstrapped DEA analysis”. *Socio-Economic Planning Sciences* 45 (2): 84–93.
- DALEY, M.P.S., NAUGLE, M.D.F. (1979). Measurement and analysis of airport emissions. *Journal of Air Pollution Control Association*. 29, 113e116.
- DALEY, B., (2010). Air Transport and the Environment, first ed., Farnham.
- DAMACENA, EDGAR, PETER WANKE, E HENRIQUE CORREA. (2016). Infrastructure expansion in Brazilian airports: slack analysis using a distance friction minimization approach. *Decision* (0304-0941) 43 (2).
- DIMITRIOU, DIMITRIOS, ASIMINA VOSKAKI, E MARIA SARTZETAKI. 2014. Airports Environmental Management. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management* 7 (1): 1–14.
- DOGANIS, R. AND THOMPSON, G. (1974), Establishing airport cost and revenue functions, *Aeronautical Journal*, Vol. 78, pp. 285-304.
- DOGANIS, R., PEARSON, R. AND THOMPSON, G. (1978) Airport Economics in the Seventies. Research Report No. 5, Transport Studies Group, Polytechnic of Central London, UK.
- DOGANIS, R. AND NUUTINEN, H. (1983). Economics of European Airports. Research Report No. 9, Transport Studies Group, Polytechnic of Central London, UK.
- DOGANIS, R. AND GRAHAM, A. (1987) Airport Management: The Role of Performance Indicators. Research Report No. 13, Transport Studies Group, Polytechnic of Central London, UK.
- EASA (EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY) (2018). ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>>.

- FALLAHI, A.; EBRAHIMI, R.; GHADERI, S. F. (2011). Measuring efficiency and productivity change in power electric generation management companies by using data envelopment analysis: A case study. *Energy*, v.36, n.11, p.6398-6405.
- FARREL, M. J. (1957). The measurement of productive efficiency. *Journal of the Royal Statistic Society, Series A (General)*, v. 120, p. 253-290.
- GILLEN, D., LALL, A., 1997. Developing measures of airport productivity and performance: an application of data envelopment analysis. *Transport. Res. E Logist. Transport. Rev.* 33 (4), 261–273.
- GLOBAL REPORTING INITIATIVE – GRI (2006). Sustainability Reporting Guidelines Ver. 3.1. Global.
- GRAHAM, ANNE (2009). How important are commercial revenues to today’s airports? *Journal of Air Transport Management*, 15(3), 106–111.
- GRAHAM, ANNE. (2018). *Managing airports : an international perspective*. Organizado por Routledge. 5th ed.
- GÜLLER, M.; GÜLLER, M. (2003). *From airport to airport city*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- HUMPHREYS, IAN, E GRAHAM FRANCIS. (2002). “Performance measurement : a review of airports” 1: 79–85.
- IFTIKHAR, YASER, ZHAOHUA WANG, BIN ZHANG, E BO WANG (2018). “Energy and CO2 emissions efficiency of major economies: A network DEA approach”. *Energy* 147: 197–207.
- IGNACCOLO, M. (2000). Environmental capacity: noise pollution at Catania-Fontanarossa international airport. *Journal of Air Transport Management*, Vol. 6 No. 4, pp. 191-199.
- IGNACCOLO, M. (2003). A Simulation model for airport capacity and delay analysis. *Transportation Planning and Technology*, Vol. 26 No. 2, pp. 135–170.
- INAMETE, U.B. (1993). Key Elements in Managing Airports: The Policy Environment and Increasing Efficiency”, *International Journal of Public Sector Management*, Vol. 6 No. 5, pp. 12–23.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. IPCC: Montreal, 2000.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 3, Volume 2. Mobile Combustion.
- INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION – IATA (2011). Vision 2050. Disponível em: <https://www.iata.org/pressroom/facts_figures/documents/vision-2050.pdf>

- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION - ICAO (2011). Airport Air Quality Manual, first ed. Doc. 9889. Disponível em: <<https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/environment-publications.aspx>>. Acessado em 21 de dezembro de 2018.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA (2017). World Energy Balances: Overview 2017 Edition. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyBalances2017Overview.pdf>, 2017.
- IONEL, I., APOSTOL, G., POPESCU, F., TALIANU, C., & APASCARITEP, M. (2010). AIR quality monitoring in an international romanian airport. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 11(3), 815–821.
- ISIKVEREN, A.T., SEITZ, A., VRATNY, P.C., PORNET, C., PLOETNER, K.O., HORNING, M., (2012). Conceptual studies of universally-electric systems architectures suitable for transport aircraft.
- JANIC, M., (2011). *Greening Airports: Advanced Technology and Operation*. Springer, London.
- JANIC, MILAN (2010). Developing an indicator system for monitoring, analyzing, and assessing airport sustainability. *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 10 (3): 206–29.
- JARACH, D. (2001). The evolution of airport management practices: towards a multi-point. *Journal of Air Transport Management*, Vol. 7, pp. 119–125.
- JARDINE, C. (2005). *Environmental Impact of Aviation Emissions*, Environmental Change Institute, Oxford University Centre for the Environment, 14p., 2005.
- JORDÃO, C. (2009). A sustainability overview of the best practices in the airport sector, Scientific papers of the University of Pardubice, Series D, Faculty of Economics and Administration.
- KEELER, T. (1970). “Airport costs and congestion”, *The American Economist*, Vol. 14, pp. 47–53.
- KHAN, K.; AZABANY, A.; WAQAR, A. (2014). Reductions in CO2 Emissions from Electricity Generation From Solar Energy at Sulaymanyah Airport In Kurdistan, Iraq. *Asian Journal of Science and Technology* Vol. 5, Issue 8, pp. 479-481.
- KILKIŞ, B. (2014). “Energy consumption and CO2 emission responsibilities of terminal buildings: A case study for the future Istanbul International Airport”. *Energy and Buildings* 76: 109–18.
- KILKIŞ, ŞAN, E ŞİIR KILKIŞ (2016). “Benchmarking airports based on a sustainability ranking index”. *Journal of Cleaner Production* 130: 248–59.
- KOÇ, SEYHANI, E VILDAN DURMAZ (2015). “Airport Corporate Sustainability : An Analysis of Indicators Reported in the Sustainability Practices”. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 181: 158–70.

- KRSTIĆ SIMIĆ, TATJANA, E OBRAD BABIĆ (2015). “Airport traffic complexity and environment efficiency metrics for evaluation of ATM measures”. *Journal of Air Transport Management* 42: 260–71.
- LAM, S. W.; LOW, J.M.W.; TANG, L.C. (2009). Operational efficiencies across Asia Pacific airports. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 45, n. 4, p. 654-665.
- LOBO, P., HAGEN, D.E., WHITEFIELD, P.D. (2012). Measurement and analysis of aircraft engine PM emissions downwind of an active runway at the Oakland International Airport. *Atmospheric Environment*. 61, 114 e 123.
- LOBO, P., WHITEFIELD, P.D., HAGEN, D.E., HERNDON, S.C., JAYNE, J.T., WOOD, E.C., KNIGHTON, W.B., NORTHWAY, M.J., MIAKE-LYE, R.C., COCKER, D., SAWANT, A., AGRAWAL, H., MILLER, J.W. (2007). The Development of Exhaust Speciation Profiles for Commercial Jet Engines, Final Report, 2007. Disponível em:<<http://www.arb.ca.gov/research/apr/past/04-344.pdf>>.
- LOVELL, C.A., SCHMIDT, S.S. (1993). The measurement of productive efficiency - techniques and applications. Oxford: Oxford University Press.
- LOZANO, S., GUTIÉRREZ, E., MORENO, P. (2013). “Network DEA approach to airports performance assessment considering undesirable outputs”. *Applied Mathematical Modelling* 37 (4): 1665–76.
- LOZANO, S., GUTIÉRREZ, E. (2011). “Slacks-based measure of efficiency of airports with airplanes delays as undesirable outputs”. *Computers and Operations Research* 38 (1): 131–39.
- LU, CHERIE, E PETER MORRELL (2006). “Determination and applications of environmental costs at different sized airports - Aircraft noise and engine emissions”. *Transportation* 33 (1): 45–61.
- MAHASHABDE, A., WOLFE, P., ASHOK, A., DORBIAN, C., HE, Q., FAN, A., LUKACHKO, S., MOZDZANOWSKA, A., WOLLERSHEIM, C., BARRETT, S.R., LOCKE, M., WAITZ, I.A., (2011). Assessing the environmental impacts of aircraft noise and emissions. *Progress in Aerospace Sciences* 47, 15e52.
- MALIGHETTI, P. et. al. (2007). An Empirical Investigation on the Efficiency, Capacity and Ownership of Italian Airports. *Rivista di Politica Economica*, 2007.
- MARTINI, GIANMARIA, ALESSANDRO MANELLO, E DAVIDE SCOTTI (2013). “The influence of fleet mix, ownership and LCCs on airports’ technical/environmental efficiency”. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 50 (1): 37–52.
- MARTINI, GIANMARIA, DAVIDE SCOTTI, E NICOLA VOLTA. 2013. “Including local air pollution in airport efficiency assessment: A hyperbolic-stochastic approach”. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 24: 27–36.

- MASIOL, MAURO, E ROY M. HARRISON (2014). “Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution : A review Aircraft Particle Emissions eXperiment”. *Atmospheric Environment* 95: 409–55.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES (2018). Fatores de Emissão de CO₂. Disponível em: <https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acessado em 15 de nov. de 2018.
- MIYOSHI, CHIKAGE, KEITH MASON, E GIANMARIA MARTINI (2018). “Enhancing the network efficiency: Air transport and sustainability”. *Journal of Air Transport Management* 69: 213–14.
- MMA. Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. (2016). Disponível em:<http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf>.
- MONSALUD A.; HOA, D.; RAKASB, J. (2014). Greenhouse gas emissions mitigation strategies within the airport sustainability evaluation process. *Sustainable Cities and Society* (2014).
- MORRELL, P. AND LU, C.H.Y. (2000). Aircraft noise social cost and charge mechanisms: a case study of Amsterdam Airport Schiphol”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 5, pp. 305–320.
- NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE 2011. Resource Guide to Airport Performance Indicators. Washington, DC: The National Academies Press.
- NITSCHKE, V. Airport Environment Protection Strategies and Approaches. In: International Congress of Airport Management, 2th, 1997, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: Rhein-Ruhr Flughafen Düsseldorf, 1997. p. 1-34.
- NOVAES, A. G. (2007). Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição. Elsevier, Rio de Janeiro, RJ, 400p.
- NUNES, L. M., Y. G. ZHU, T. Y. STIGTER, J. P. MONTEIRO, E M. R. TEIXEIRA. 2011. “Environmental impacts on soil and groundwater at airports: Origin, contaminants of concern and environmental risks”. *Journal of Environmental Monitoring* 13 (11): 3026–39.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). Facts. Disponível em: <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>>. 2016.
- OUM, TAE H., JIA YAN, E CHUNYAN YU. 2008. “Ownership forms matter for airport efficiency: A stochastic frontier investigation of worldwide airports”. *Journal of Urban Economics* 64 (2): 422–35.
- OZBEK, M. E.; GARZA, J. M. & TRIANTIS, K. (2009) Data Envelopment Analysis as a Decision-Making Tool for Transportation Professionals. *J. Transp. Eng.*, vol. 135, iss. 11, pp. 822-831.

- PACHECO, R. R., E E. FERNANDES (2003). Managerial efficiency of Brazilian airports. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 37 (8): 667–80.
- PARKER, D., 1999. The performance of BAA before and after privatization: a DEA study. *Journal of Transport, Economics and Policy* 33, 133e146
- PENN, S. L., ARUNACHALAM, S., TRIPODIS, Y., HEIGER-BERNAYS, W., & LEVY, J. I. (2015). A comparison between monitoring and dispersion modeling approaches to assess the impact of aviation on concentrations of black carbon and nitrogen oxides at Los Angeles International Airport. *Science of the Total Environment*, 527–528, 47–55.
- PERELMAN, SERGIO, E TOMÁS SEREBRISKY. 2012. “Measuring the technical efficiency of airports in Latin America”. *Utilities Policy* 22: 1–7.
- PITT, M. AND SMITH, A. (2003). An assessment of waste management efficiency at BAA airports. *Construction Management and Economics*, Vol. 21 No. 4, pp. 421–431.
- PO-LIN LAI, ANDREW POTTER, E MALCOLM BEYNON. (2012) The Development of Benchmarking Techniques in Airport Performance Evaluation Research. *Transportation Journal*.
- RIBEIRO, F.N.D., SALINAS ,D.T.P., SOARES, J. , OLIVEIRA, A. P., MIRANDA, R. M., e SOUZA, L.A. T. (2016) The Evolution of Temporal and Spatial Patterns of Carbon Monoxide Concentrations in the Metropolitan Area of Sao Paulo, Brazil. *Advances in Meteorology* .Volume, 2016.
- ROCHA, A. C. (2012) Estimativa Simulada das Emissões Atmosféricas Diárias da Aviação Civil Regular no Brasil em um Dia Específico. São José dos Campos: INPE, 2012. Dissertação de Mestrado.
- RUTHER, RICARDO, E PRISCILA BRAUN. (2009). “Energetic contribution potential of building-integrated photovoltaics on airports in warm climates” 83: 1923–31.
- SCHÜRMAN, G., SCHÄFER, K., JAHN, C., HOFFMANN, H., BAUERFEIND, M., FLEUTI, E., & RAPPENGLÜCK, B. (2007). The impact of NO_x, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. *Atmospheric Environment*, 41(1), 103–118.
- SCOTTI, DAVIDE, MARTIN DRESNER, GIANMARIA MARTINI, E CHUNYAN YU. (2014). Incorporating negative externalities into productivity assessments of US airports. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 62: 39–53.
- SECRETARIA DE AVIAÇÃO CIVIL – SAC (2019). Sistema Hórus. Disponível em: <<https://horus.labtrans.ufsc.br/gerencial/>>. Acessado em 15 de jan. de 2019.
- SEEG (2019). Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Disponível em: <<http://www.seeg.eco.br>> Acesso em 21 jan. de 2018.
- SIMAR L, WILSON PW (2004). Performance of the bootstrap for DEA estimators and iterating the principle. In: Cooper WW, Seiford LM, Zhu J, editors. *Handbook on data envelopment analysis*. Boston: Kluwer International Series; p. 265 e 98.

- SKOULLOUDIS, ANTONIS, KONSTANTINOS EVANGELINOS, E STAVROS MORAITIS. (2012). “Journal of Air Transport Management Accountability and stakeholder engagement in the airport industry: An assessment of airports’ CSR reports”. *Journal of Air Transport Management* 18 (1): 16–20.
- SOARES DE MELLO, J.C.; ANGULO MEZA, L.; GOMES, E. G. E BIONDI NETO, L. CURSO DE ANÁLISE (2005). *Envoltória de Dados. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Gramado, 2005.
- SOMCHAROENWATTANA, WANTANA, CHRISTOPH MENKE, E DARUNPORN KAMOLPUS. 2011. “Study of operational parameters improvement of natural-gas cogeneration plant in public buildings in Thailand” 43: 925–34.
- SOMCHAROENWATTANAA,W.; MENKEA, C.; KAMOLPUSB, D.; GVOZDENAC, D. Study of operational parameters improvement of natural-gas cogeneration plant in public buildings in Thailand. *Energy Build.* 2011, 43, 925–934.
- SOUZA, A.L.L.; PACHECO, R.R.; FERNANDES, E. (2009). A comparative airport performance analysis at world level. *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society*, v. 5, n. 1, p. 37-53, 2009.
- STORTO, CORRADO LO. 2018. “The analysis of the cost-revenue production cycle efficiency of the Italian airports: A NSBM DEA approach”. *Journal of Air Transport Management* 72 (May): 77–85.
- TEOH, LAY ENG, E HOOI LING KHOO (2016). “Green air transport system: An overview of issues, strategies and challenges”. *KSCE Journal of Civil Engineering* 20 (3): 1040–52.
- TOVAR, B., MARTÍN-CEJAS, R.R. (2009). Are outsourcing and non-aeronautical revenues important drivers in the efficiency of Spanish airports? *Journal of Air Transport Management.* 15 (5), 217–220.
- WANG, T.F.; SONG, D.W.; CULLINANE, K. (2002). The applicability of data envelopment analysis to efficiency measurement of container ports. In: *Proceedings of the international association of maritime economists conference*, p. 13-15.
- WANKE, PETER F. (2012). Capacity shortfall and efficiency determinants in Brazilian airports: Evidence from bootstrapped DEA estimates. *Socio-Economic Planning Sciences* 46 (3): 216 - 29.
- WANKE, PETER F. (2013) Physical infrastructure and flight consolidation efficiency drivers in Brazilian airports: A two-stage network-DEA approach. *Journal of Air Transport Management*, 31, 1-5.
- WHITBREAD, M. (1971). “A framework for the efficient production of airport services”, *Reg. Studies*, Vol. 5 No. 3, pp. 121–134.
- YANG, C.; JIN, X.; DU, Z.; FAN, B.; YANG, X. Modeling and simulation of the airport terminal air conditioning system based on Energyplus. *J. Shanghai Jiaotong Univ.* 2010, 44, 745–748.

- YIM, S.H.L.; STETTLER, M.E.J.; BARRETT, S.R.H. (2013). Air quality and public health impacts of UK airports. Part II: impacts and policy assessment. *Atmospheric Environment*. 67, 184 e 192.
- YU, M.M. (2010). Assessment of airport performance using the SBM-NDEA model. *Omega*, v. 38, n. 6, p. 440-452.
- YU, MING MIIN. (2004). “Measuring physical efficiency of domestic airports in Taiwan with undesirable outputs and environmental factors”. *Journal of Air Transport Management* 10 (5): 295–303.
- ZAKRZEWSKI, D.M. (2008), “Assessing privatized airport performance from stakeholder viewpoints: a study of Sydney Airport”, in Epstein, M.J. and Farrell, A.M. (Eds.), *Performance Measurement and Management Control: Measuring and Rewarding Performance*, Emerald Group Publishing Limited, pp. 253–272
- ZHOU, P., ANG, B.W., POH, K.L. (2008). A survey of data envelopment analysis in energy and environmental studies. *Eur. J. Oper. Res.* 189 (1), 1–18.

APÊNDICE 1 - Revisão Sistemática da Literatura – RSL

GERENCIAMENTO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS (POLUENTES E GEE) E MEDIDAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AEROPORTOS: CONSOLIDAÇÃO DOS DESAFIOS E SOLUÇÕES APONTADOS POR MEIO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Arthur Neiva Fernandes
Universidade de Brasília
Programa de Pós-Graduação em Transportes

RESUMO

Frente ao aumento da demanda por voos comerciais domésticos e internacionais, os aeroportos estão se tornando grandes complexos aeroportuários, aumentando a demanda por energia primária e conseqüentemente a o seu impacto ao meio ambiente.

O presente trabalho tem por objetivo principal fazer uma revisão sistemática da literatura referente ao gerenciamento das emissões atmosféricas (poluentes e gases de efeito estufa) e ações de eficiência energética associados à operação aeroportuária. Um dos objetivos é identificar as relações entre as emissões atmosféricas e as práticas de eficiência energética em aeroportos, bem como lacunas existentes na literatura no tema.

Os resultados revelam que, embora diversas avaliações mostrem que o maior contribuinte para as emissões é o movimento de aeronaves, a contribuição da operação de aeroportos para a qualidade do ar ainda é incerta. A maioria dos trabalhos se concentra na análise das emissões relacionadas com aeronaves e poucos trabalhos apresentam o cenário amplo das emissões aeroportuárias, considerando a energia primária total.

ABSTRACT

Faced with increased demand for domestic and international commercial flights, airports are becoming large airport complexes, increasing the demand for primary energy and consequently its impact on the environment.

The main objective of this work is to systematically review the literature on the management of atmospheric emissions (pollutants and greenhouse gases) and energy efficiency actions associated to the airports operations. One of the objectives is to identify the relationships between atmospheric emissions and energy efficiency practices at airports, as well as existing literature gaps on these topics.

The results show that although several evaluations show that the largest contributor to emissions is aircraft movement, the contribution of airport operations to air quality is still uncertain. Most of the work focuses on analyzing emissions related to aircraft, and few studies present the broad scenario of airport emissions, considering total primary energy.

1. INTRODUÇÃO

Durante as duas últimas décadas, o consumo de energia primária e as emissões de CO₂ cresceram 50% em todo o mundo (International Energy Agency, 2011). Esse rápido aumento no consumo de energia provavelmente terá um impacto ambiental significativo no futuro próximo e pode até causar problemas de abastecimento em algumas áreas.

No cenário global, o setor de transportes é responsável por 29 % do consumo total de energia primária, à frente do setor residencial (22%) e atrás apenas do setor industrial, responsável por 37% do consumo total (International Energy Agency, 2015).

No cenário brasileiro a proporção é similar, porém o setor dos transportes aumenta sua contribuição para 32,2% do consumo total de energia primária, atrás apenas do setor industrial com 32,5%, segundo dados do Balanço Energético Nacional – BEN de 2016.

A aviação contribui com cerca de 3% para as emissões antropogênicas globais de GEE, enquanto dois terços das emissões da aviação podem ser atribuídos aos voos internacionais (Gössling e Upham, 2009). Embora a contribuição da aviação para as emissões antropogênicas globais de GEE seja relativamente baixa, devido ao rápido crescimento do setor de viagens aéreas e por este ser um setor de rápido crescimento num contexto de interconectividade global que melhora os padrões de hiper mobilidade, espera-se que a contribuição do setor aumente no futuro próximo (Stefan Gössling et al., 2009).

Frente ao aumento da demanda por voos comerciais domésticos e internacionais, os aeroportos estão se tornando grandes complexos aeroportuários, os chamados “aerotrópolis” ou “aeroporto-cidade”, aumentando seus níveis de emissões.

De maneira similar, a demanda por energia elétrica é crescente nestes complexos, o que aumenta a necessidade por uma operação do aeroportuária mais eficiente do ponto de vista do consumo de energia.

Portanto, em meio à crescente preocupação sobre as emissões relacionadas com os aeroportos e à luz do crescente aumento no custo de combustível, operadores aeroportuários e companhias aéreas tem investigado diversas medidas para se reduzir as emissões relacionadas com as aeronaves e consumo de combustível (ACRP, 2012).

Como consequência do aumento do tráfego aéreo, existe um aumento no consumo de combustíveis, elevando assim as emissões de gases poluentes na atmosfera. Com os avanços tecnológicos observados nas últimas décadas, houve uma melhoria na eficiência dos motores das aeronaves, acarretando na redução do consumo de combustível e emissão de gases poluentes.

Os impactos causados pela aviação são maiores que concentrações de emissões quando originadas ao nível do solo. Tal fato ocorre porque as emissões em altitudes desencadeiam uma série de processos químicos e físicos diferenciados quando comparados com os efeitos em baixas altitudes (Jardine, 2005).

Visando permitir o conhecimento do estado da arte de pesquisa acerca de emissões atmosféricas e energia com aplicação em aeroportos, este artigo consolidou estudos científicos acerca do tema mediante revisão sistemática da literatura. O objetivo foi sintetizar estudos sobre práticas de gerenciamento das emissões atmosféricas (poluentes e GEE) e de eficiência energética implementadas em aeroportos.

2. MÉTODO DE PESQUISA

A partir da contextualização do tema, o presente artigo utilizou a Revisão Sistemática da Literatura - RSL como forma de estruturar os desafios e soluções a respeito dos temas com aplicação em aeroportos. Essa é uma técnica investigativa sobre determinado tema, realizada por meio da busca de dados da literatura de forma coordenada, permitindo a apreciação crítica e a síntese das informações mais relevantes para a pesquisa (Sampaio e Mancini, 2007). O período de análise ocorreu entre os dias 20 e 25 de novembro de 2017. O objetivo principal da RSL foi prover um panorama geral dos estudos relacionados a emissões e energia com aplicação em aeroportos, para, posteriormente, ser procedida uma análise exploratória na literatura a fim de se identificar trabalhos específicos para o tema da dissertação.

3. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO E RESULTADOS ENCONTRADOS

Nesta seção será descrita cada fase da Revisão Bibliográfica Sistemática bem como os resultados obtidos procedimento escolhido.

3.1. Etapa 1 – Planejamento da Revisão

3.1.1 Identificar a necessidade da revisão

Aeroportos no mundo tem buscado melhorar sua eficiência tanto motivados por questões econômicas quanto por questões ambientais. Neste último aspecto, com a crescente demanda pelo transporte aéreo, novas tecnologias são primordiais para o alcance de uma operação aeroportuária ambientalmente eficiente e responsável.

As mudanças climáticas derivadas do setor de transporte aéreo vem sendo objeto de estudo por diversos pesquisadores do clima nos últimos anos, e nesse aspecto os aeroportos possuem papel fundamental de possibilitar todas as operações aeronáuticas com níveis pré-determinados de segurança.

Portanto, revisão visa responder às seguintes questões relativas ao tema: 1) Quais as ações de gerenciamento das emissões atmosférica e de eficiência energética são adotadas por administradores aeroportuários? 2) Quais as características e relações entre as emissões locais e globais relacionadas com a operação aeroportuária? 3) Quais as relações entre as emissões de GEE e as práticas de eficiência energética em aeroportos? 4) Quais as lacunas existentes na literatura com foco de aplicação em aeroportos?

3.1.2 Elaborar a proposta de revisão

O objetivo da realização dessa revisão de literatura é identificar e apresentar as pesquisas existentes acerca do gerenciamento das emissões (poluentes e GEE) e medidas de eficiência energética em aeroportos no mundo, através de uma abordagem de análise da combinação de palavras chave pré definidas.

3.1.3 Desenvolver protocolo de revisão

Nesta etapa foram definidas as premissas da revisão, no formato de protocolo de revisão, utilizando-se a ferramenta StArt (*State of the Art through Systematic Review*). StArt é uma ferramenta computacional que apoia o desenvolvimento de revisões sistemáticas melhorando

a qualidade da aplicação do protocolo de pesquisa, já que, após sua definição, ele é cadastrado na ferramenta e durante a aplicação dos critérios, fica bastante visível quais foram os textos selecionados, quais foram excluídos, prioridade de leitura, entre outras informações que auxiliam na condução da pesquisa.

Para identificar os trabalhos aceitos para a revisão foi realizada a busca de combinações de palavras-chaves (strings) pré-definidas conforme a Tabela 1. A pesquisa foi realizada na base *Scopus* em função da mesma apresentar apenas trabalhos em suas versões finais e de abranger em sua base os principais periódicos dos temas.

3.1.3.1 Fases da pesquisa de palavras chave

Visando obter um panorama geral para a pesquisa e, após sua avaliação, obter um panorama específico, a fase de buscas de combinações entre palavras-chaves com (*strings*) foi segregada em duas fases, a saber:

Fase 1 – Combinação primária de strings

Busca da combinação da *string* Airport* (AND) com as seguintes: Emission*; “Carbon Dioxide” e “Air pollution”.

Nesta fase a busca das *strings* foi realizada nos campos “título, abstract e palavras-chave”, no período total de horizonte temporal disponível na base, documentos em inglês e para todos os tipos de documento.

Os objetivos desta primeira fase foram:

- Avaliar a amplitude temporal do tema;
- Identificar ano base para subsidiar as pesquisas da Fase 2 (combinação secundária de *strings*);
- Identificar palavras-chaves aderentes não consideradas.

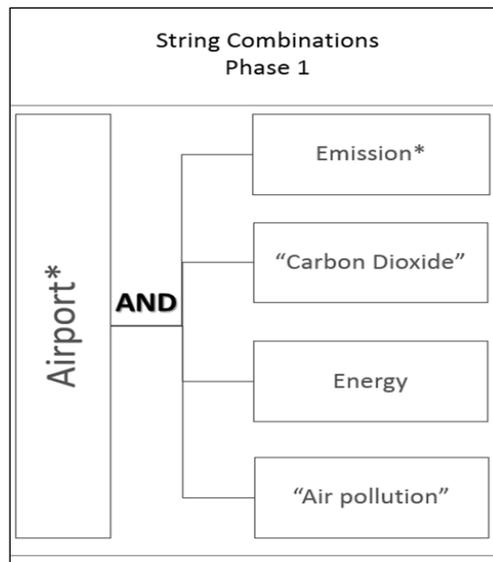


Figura 1: Fase 1 da busca de combinações de strings

Fase 2 – Combinação secundária de *strings*

Busca da combinação da *string* Airport* (AND) com a combinação entre as seguintes *strings*: Emission* AND “Carbon Dioxide”; Emission* AND “Energy”; Emission* AND “Air pollution”; “Carbon Dioxide” AND Energy; “Carbon Dioxide” AND “Air pollution”; Energy AND “Air pollution.

Diferentemente da fase anterior, a busca das *strings* foi realizada nos campos “título, abstract e palavras-chave” com exceção da palavra-chave “Airport*”, que foi buscada apenas no campo “título”. Para cada combinação secundária de *strings* considerou-se a média do horizonte temporal identificado pela Fase 1 e foram buscados apenas artigos e revisões em inglês.

Nessa fase, através da leitura dos títulos e resumos dos artigos, foram aplicados os seguintes critérios qualitativos de exclusão (E):

- (E) Artigos com foco apenas em aeronaves;
- (E) Artigos duplicados;
- (E) Artigos com tema fora do contexto da revisão;

Os objetivos desta segunda fase foram:

- Avaliar as premissas definidas pela Fase 1;
- Aplicar critérios qualitativos de exclusão de artigos;
- Seleção primária para a revisão sistemática.

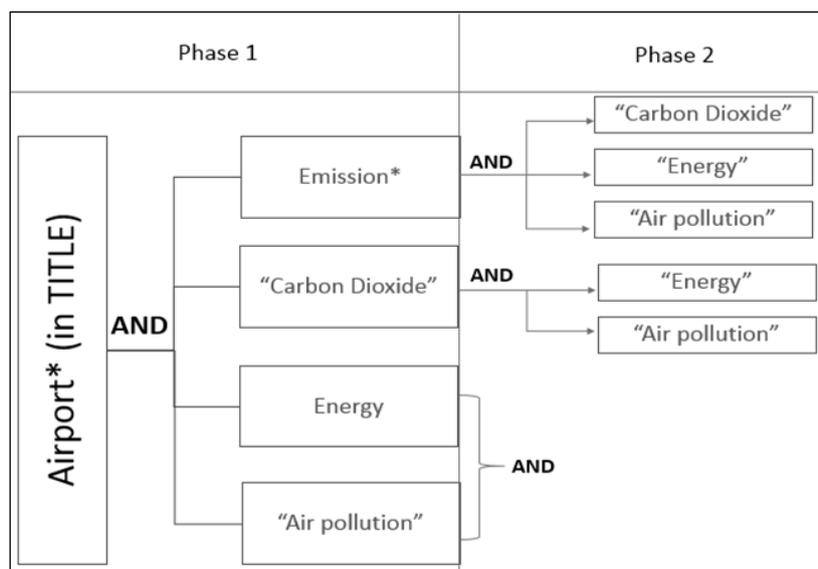


Figura 2: Fase 2 da busca de combinações de strings.

3.2. Etapa 2 – Execução da RSL

A execução dessa atividade foi realizada conforme definição do protocolo no item 3.1.3.1.

3.2.1 Fase 1

Seguindo o roteiro apresentado no protocolo, nessa etapa foram buscadas na base de dados *Scopus* as combinações da *string* Airport* (AND) com as seguintes: Emission*; “Carbon Dioxide” e “Air pollution”. Nesta fase a busca das *strings* foi realizada nos campos “título, abstract e keywords”, no período total de horizonte temporal disponível na base, documentos em inglês e para todos os tipos de documentos.

3.2.1.1 Fase 1 - Amplitude temporal do Tema

Nessa etapa foram buscadas na base de dados *Scopus* as palavras-chave em formato de *strings* da Fase 1, conforme a seguir: Airport* (AND) com as seguintes: Emission*; “Carbon Dioxide” e “Air pollution”.

A Figura 3 mostra o exemplo de resultado obtido, indicando que no ano de 2006 houve um aumento significativo no quantitativo de publicações para a combinação de *string* Airport* (AND) “Carbon Dioxide”.

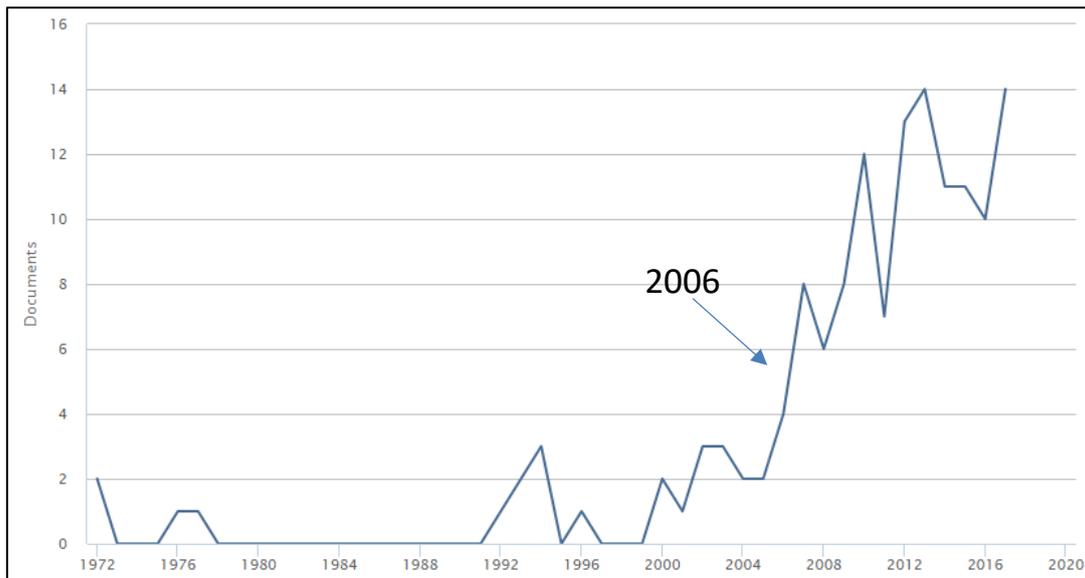


Figura 3 – Avaliação temporal para a combinação de *string* da Fase 1

Essa análise foi realizada para cada combinação de *string* da Fase 1, permitindo a identificação da evolução temporal e ano de maior influência para cada combinação, conforme Figura 4.

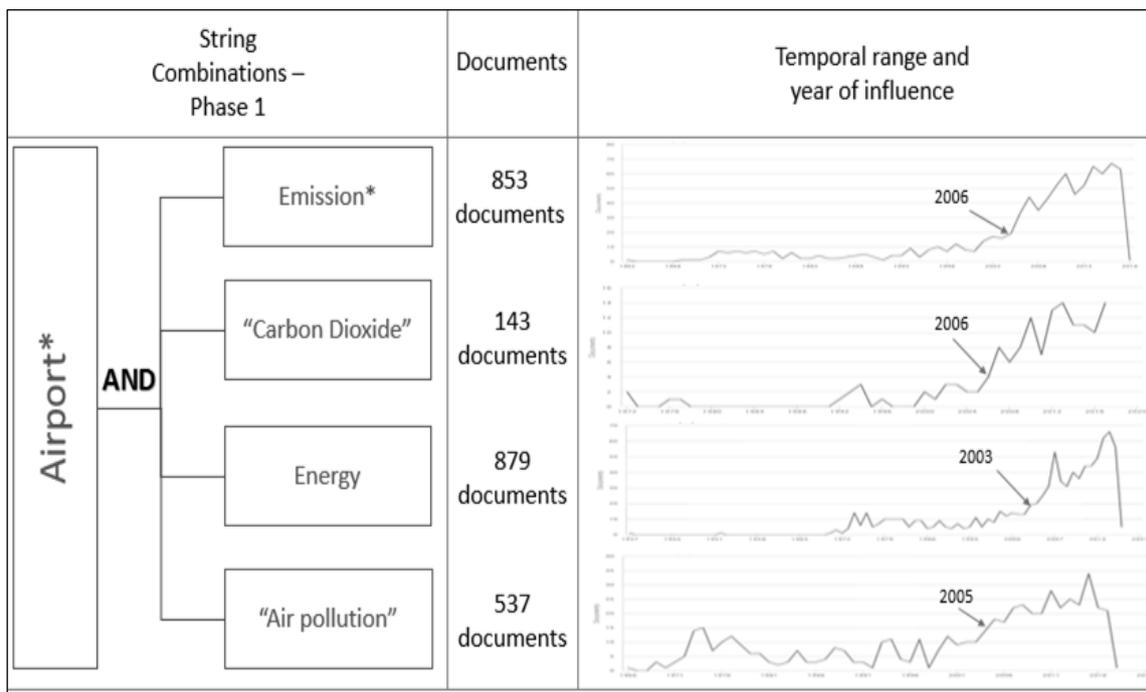


Figura 4: Fases da busca de combinações de strings.

3.2.1.2 Fase 1 – Análise de palavras-chaves aderentes

Nessa etapa, para cada resultado de combinação de *strings* foram extraídas as palavras chaves dos autores e indexadas e foram geradas as imagens de frequência de palavras-chaves por meio

do programa *TagCrowd* que, a partir das palavras-chaves dos artigos encontrados, gera uma imagem com as palavras que mais se repetem, conforme exemplo da Figura 5.

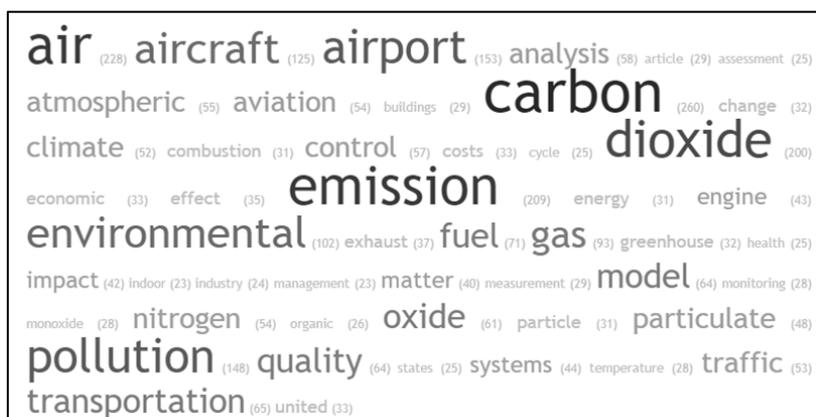


Figura 5 – Mapeamento de palavras chave para a *string* Airport* (AND) “Carbon Dioxide”.

Após esse mapeamento das palavras-chaves mais frequentes em cada combinação de *strings*, foram desconsideradas as palavras chave utilizadas na própria pesquisa e foi elaborado um ranking por frequência, de forma a comparar as frequências das seis primeiras palavras-chaves em cada combinação, conforme o exemplo da Figura 6.

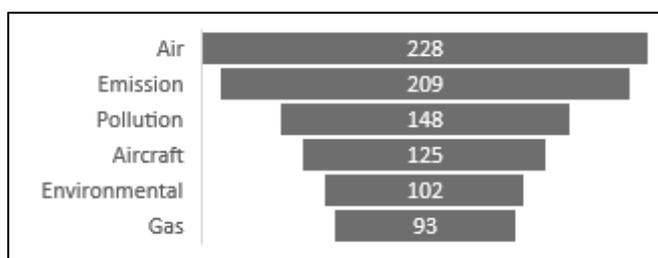
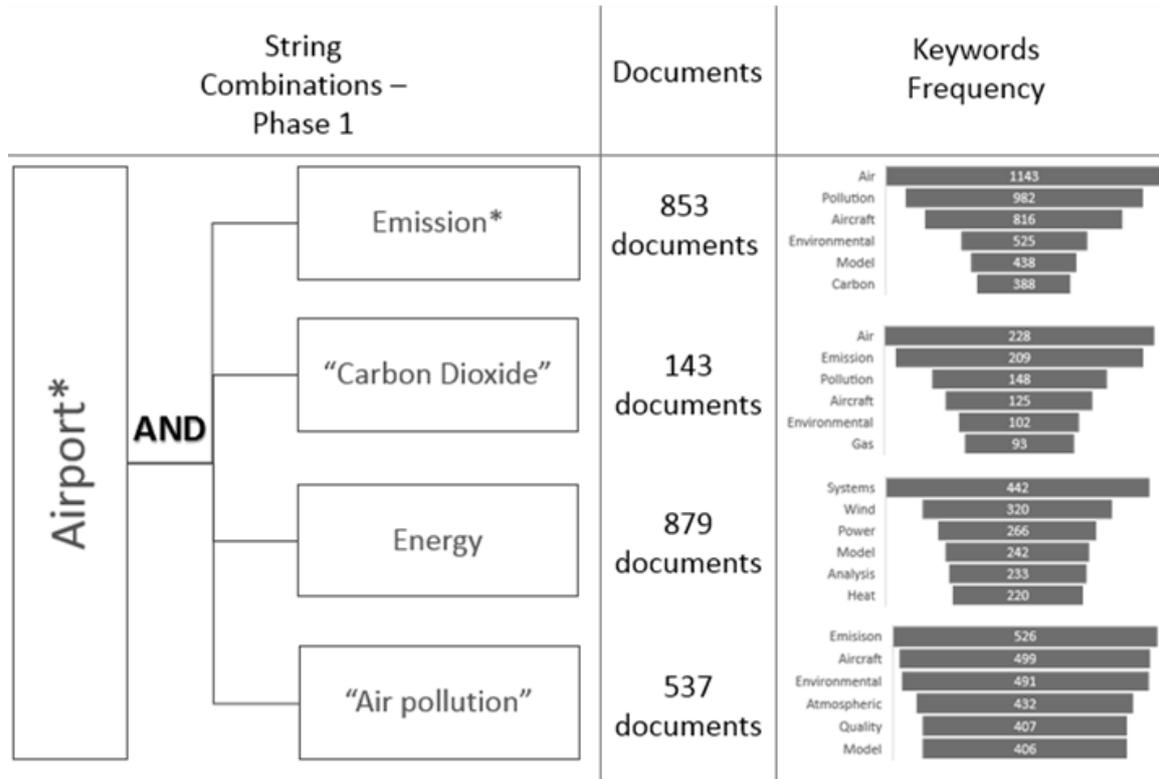


Figura 6 – Frequências de palavras-chave para a *string* Airport* (AND) “Carbon Dioxide”.

Ao final de cada análise foi elaborado um quadro comparativo entre todas as palavras-chave mais frequentes encontradas com auxílio do *TagCrowd* para combinação de strings da Fase 1, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Fases da busca de combinações de *strings*.



3.2.2 Fase 2

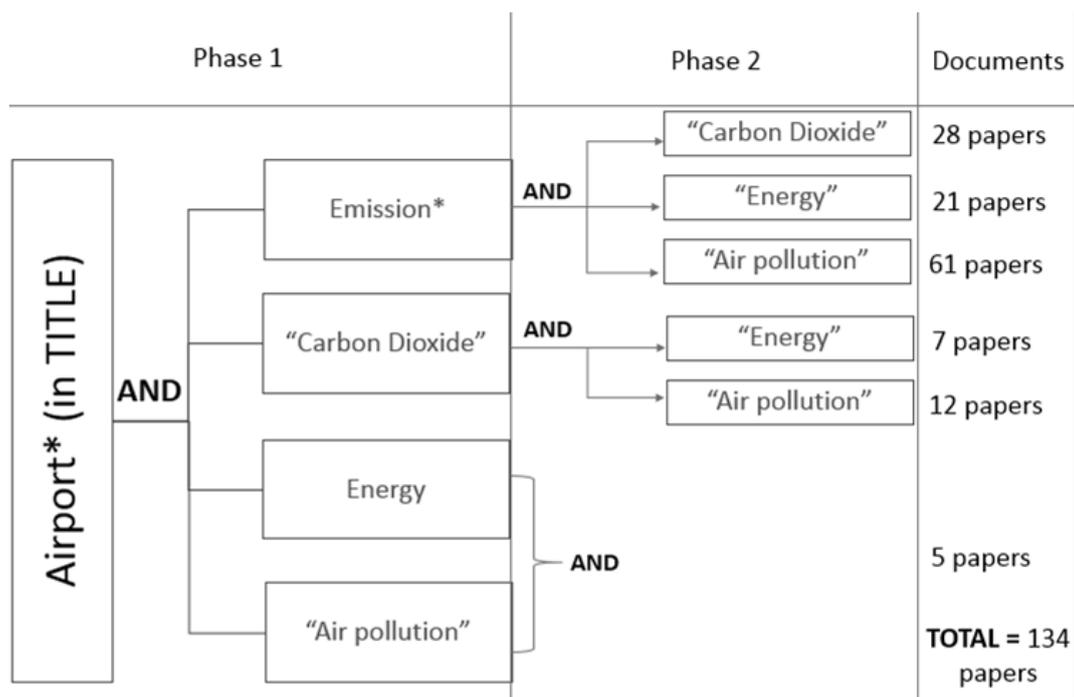
Seguindo a definição do protocolo, nessa etapa foram buscadas na base de dados *Scopus* as palavras-chave em combinação no formato de *strings*, conforme a seguir: combinação da *string* Airport* (AND) com a combinação entre as seguintes *strings*: Emission* AND “Carbon Dioxide”; Emission* AND “Energy”; Emission* AND “Air pollution”; “Carbon Dioxide” AND Energy; “Carbon Dioxide” AND “Air pollution”; Energy AND “Air pollution”.

3.2.2.1 Fase 2 – Busca da combinação secundária de *strings*

Diferentemente da fase anterior, a busca das *strings* foi realizada nos campos “título, abstract e keywords” com exceção da palavra-chave “Airport*”, que foi buscada apenas no campo “título”.

Para cada combinação secundária de *strings* considerou-se a média do horizonte temporal identificado pela Fase 1 e foram buscados apenas artigos e revisões em inglês. A Tabela 2 mostra o quantitativo de resultados para essa fase da revisão.

Tabela 2: Fase 2 da busca entre combinações de *strings*.



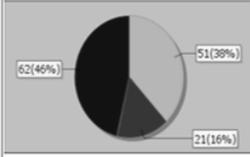
3.2.2.2 Fase 2 – Seleção primária de artigos

Essa parte da revisão busca identificar artigos selecionáveis para a revisão, bem como aplicar os critérios qualitativos de exclusão definidos na etapa do protocolo de revisão. A partir dos 134 artigos identificados pela Fase 2 foram analisados seus títulos e resumos para aplicação dos critérios de exclusão abaixo, conforme definido no protocolo:

- (E) Artigos com foco apenas em aeronaves;
- (E) Artigos duplicados;
- (E) Artigos com tema for a do contexto da revisão;

Com auxílio da ferramenta StArt foram aplicados os critérios de exclusão acima, e a extração dos dados foi sintetizada na Tabela 3.

Tabela 3 - Fase 3 da busca entre combinações de *strings*.

Phase 1	Phase 2	Documents	Qualitative Filters and Accepted papers (Ap)
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;">Airport* (in TITLE)</div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">AND</div> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Emission*</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Carbon Dioxide"</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">Energy</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Air pollution"</div> </div> </div>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">AND</div> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Carbon Dioxide"</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Energy"</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Air pollution"</div> </div> </div>	28 papers	(E) Papers focused only in aircraft emissions
	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">AND</div> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Energy"</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Air pollution"</div> </div> </div>	21 papers	(E) Duplicated papers
	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">AND</div> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Energy"</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Air pollution"</div> </div> </div>	61 papers	(E) Out of review context by abstract reading
	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">AND</div> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Energy"</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Air pollution"</div> </div> </div>	7 papers	 <p> Accepted Rejected Duplicated </p>
	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;">AND</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">"Air pollution"</div> </div>	12 papers	
		5 papers	
		TOTAL = 134 papers	$Ap = \sum_{papers} - (Dp + Rp)$ $Ap = 134 - (62 + 21)$ $Ap = 51$

3.2.2.3 Fase 2 – Seleção final de artigos

Após a aplicação dos critérios de exclusão foram identificados 51 artigos, os quais foram avaliados com maior profundidade, contribuindo para o melhor entendimento dos temas na literatura e para apoiar a realização de posterior revisão exploratória da literatura com objetivo de capturar trabalhos importantes e que possam estar de fora deste escopo.

Como exemplo, foram criados *clusters* temáticos de alguns dos trabalhos mais relevantes, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4: Relação do tipo de abordagem relacionada a aeroportos

Clusters	Autores e Artigos	Contribuições
APU	Schafer, K., Jahn, C., Sturm, P., Lechner, B., Bacher, M., 2003. Aircraft emission & measurements by remote sensing methodologies at airports. Atmos. Environ. 37 (37), 5261e5271.	Declarou que as emissões de APU terrestres nos prédios de serviços do aeroporto não podem ser negligenciadas em comparação com as principais emissões do motor das aeronaves
	Fleuti, E., Hofmann, P., 2005. Airport Local Air Quality Studies, ALAQS Case Study: Zürich Airport 2004, a Comparison of	Relataram que, embora os gases de escape da aeronave representassem a maioria dos CO, hidrocarbonetos e NOx (89%, 45%, 82%, respectivamente, das emissões totais), uma porcentagem significativa era de APUs, GPUs, <i>start-up-idle</i> ,

	<p>Modelled and Measured Air Quality. Tech. Rep. EEC/SEE/2005/017, EUROCONTROL.</p>	<p>handling / GSE, tráfego aéreo e fontes estacionárias, como APUs representam cerca de metade do total de emissões de motores não aeronáuticos.</p>
	<p>Stettler, M.E.J., Eastham, S., Barrett, S.R.H., 2011. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: emissions. Atmos. Environ. 45, 5415e5424.</p>	<p>Informou que 19% das emissões totais de NOx do aeroporto de Londres Heathrow são devidas ao uso de APUs e que estes contribuem com 6% to total PM2.5 emissions nos principais aeroportos do Reino Unido.</p>
GSE	<p>Unal, A., Hu, Y., Chang, M.E., Odman, M.T., Russell, A.G., 2005. Airport related emissions and impacts on air quality: application to the Atlanta International Airport. Atmos. Environ. 39, 5787e5798.</p>	<p>Estimou que os impactos sobre o ozônio e PM2.5 dos GSE no Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport são pequenos em comparação com os impactos da aeronave no mesmo aeroporto</p>
	<p>Schürmann, G., Sch€ afer, K., Jahn, C., Hoffmann, H., Bauerfeind, M., Fleuti, E., Rappenglück, B., 2007. The impact of NOx, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. Atmos. Environ. 41, 103e118.</p>	<p>Calculou que as concentrações de NO no aeroporto de Zurique foram dominadas pelas emissões dos veículos de suporte terrestre (GSE)</p>
Energy	<p>Alba, S.O., Manana, M. Energy Research in Airports: A Review. Energies 2016, 9, 349; Energies Engineering and Policy Journal.</p>	<p>Atestou que devido à influencias de diversos fatores, as características do consumo de energia de um aeroporto são estocásticas, não-linear e dinâmica. Os sistemas de climatização de ar, iluminação e TIC são geralmente os consumidores de energia mais importantes nos aeroportos. Uma das medidas mais importantes relacionadas à conservação e à eficiência energética nos aeroportos está associada à realização de uma auditoria energética das instalações.</p>
CO₂ Emissions	<p>Birol Kilkıs. Energy consumption and CO₂ emission responsibilities of terminal buildings: A case study for the future Istanbul International Airport. Energy and Buildings 76 (2014) 109–118.</p>	<p>Verificou que a análise somente do edifício do terminal não seria capaz de expressar o seu verdadeiro impacto sobre clima. Mesmo assim, trabalhos anteriores têm limitado a sua análise de desempenho de energia para o próprio edifício terminal.</p>

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS ENCONTRADOS E CONCLUSÕES

O principal objetivo desta revisão foi proporcionar uma visão geral sobre gerenciamento das emissões e suas interações com as medidas de eficiência energética em aeroportos. Foi possível resumir contribuições dos principais artigos identificados. A informação disponível sobre o impacto da qualidade do ar diretamente associada aos aeroportos ainda é incerta, devido às lacunas na literatura. A maioria dos trabalhos se concentrou em escape do motor de aeronave durante os ciclos de LTO com associações com a fase de solo da aeronave, no que diz respeito ao aeroporto.

Diante do exposto observou-se que:

- a) Aeroportos contribuírem com cerca de 5% das emissões globais de CO₂ da aviação (95% das emissões de GEE dos aeroportos são emissões de CO₂).
- b) Emissões relacionadas ao movimento de aeronaves são os maiores contribuintes no contexto aeroportuário;
- c) Devido à interdependência tecnológica de aeroportos e aeronaves, os aeroportos podem desempenhar um papel importante e fazer parte da solução global;
- d) A sustentabilidade ambiental do transporte aéreo não deve apenas ser avaliada com relação às aeronaves (contribuintes majoritários das emissões do setor), mas também deve considerar a complexa operação de aeroportos e suas interações com o meio ambiente;
- e) As emissões associadas às atividades aeroportuárias possuem característica locais e também um caráter global, associado com a geração de energia elétrica para consumo dos sistemas do aeroporto;
- f) Modelos específicos de dispersão são ferramentas amplamente utilizadas por operadores aeroportuários para realização de estudos de emissões;
- g) No campo de energia, somente a análise do edifício do terminal não seria capaz de expressar o seu verdadeiro impacto sobre o meio ambiente. Mesmo assim, trabalhos anteriores têm limitado a sua análise de desempenho de energia para o próprio edifício terminal;
- h) Uma das medidas mais importantes relacionadas à conservação e à eficiência energética nos aeroportos está associada à realização de uma auditoria energética das instalações.

Com esta auditoria, a maneira como um aeroporto consome energia é analisada e torna-se mais fácil propor medidas para melhorar o desempenho energético;

- i) Nos estudos em aeroportos o consumo de energia é principalmente focado nos terminais, embora estes sejam apenas uma parte do aeroporto inteiro. Assim, uma maior profundidade em todos os aspectos que influenciam o desempenho energético em aeroportos é um promissor campo de investigação futura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEEE, 2016. The 2016 International Energy Efficiency Scorecard. July 2016. Report E1602, disponível em <<http://aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/e1602.pdf>>.
- ACRP, 2012. AIRPORT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM (ACRP): Report 64 – Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APUs and Alternative Systems, Transportation Research Board, Washington, D.C. 86p
- EPE (2016). Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro, 2016.
- FLEUTI, E., HOFMANN, P., 2005. Airport Local Air Quality Studies, ALAQS Case Study: Zürich Airport 2004, a Comparison of Modelled and Measured Air Quality. Tech. Rep. EEC/SEE/2005/017, EUROCONTROL.
- GÖSSLING, S., UPHAM, P. (2009). Climate Change and Aviation (First). London: Earthscan.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. International Energy Outlook 2011. Disponível online: <https://www.iea.org/publications/freepublications/.../WEO2011_WEB.pdf> Acessado em 15 de Março de 2017;
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Energy Balances: Overview 2017 Edition. Disponível em <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WorldEnergyBalances2017Overview.pdf>> Acessado em 29 de Maio de 2017.
- KILKIŞ, B. (2014). Energy consumption and CO2 emission responsibilities of terminal buildings: A case study for the future Istanbul International Airport. Energy and Buildings, 76(October), 109–118
- KLUCZEK, A., & OLSZEWSKI, P. (2016). Energy audits in industrial processes. Journal of Cleaner Production, 142, 3437–3453.
- ORTEGA ALBA, S.; MANANA, M. (2016). Energy Research in Airports: A Review. Energies 2016, 9, 349.
- SAMPAIO, RF e MANCINI, MC (2007). Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. Rev. bras. fisioter. [online]. 2007, vol.11, n.1, pp.83-89.
- SCHAFER, K., JAHN, C., STURM, P., LECHNER, B., BACHER, M., 2003. Aircraft emission & measurements by remote sensing methodologies at airports. Atmos. Environ. 37 (37), 5261e5271.
- SCHÜRMAN, G., SCHAFER, K., JAHN, C., HOFFMANN, H., BAUERFEIND, M., FLEUTI, E., RAPPENGLÜCK, B., 2007. The impact of NOx, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich airport. Atmos. Environ. 41, 103e118.
- STETTLER, M.E.J., EASTHAM, S., BARRETT, S.R.H., 2011. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: emissions. Atmos. Environ. 45, 5415e5424.
- UNAL, A., HU, Y., CHANG, M.E., ODMAN, M.T., RUSSELL, A.G., 2005. Airport related emissions and impacts on air quality: application to the Atlanta International Airport. Atmos. Environ. 39, 5787e5798.

Arthur Neiva Fernandes (arthurneiva@aluno.unb.br)

Programa de Pós-Graduação em Transportes, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília - UnB
Anexo SG-12, 1º andar, UNB, Asa Norte, CEP: 70.910-900, Brasília-DF, Brasil.