



## CAUSALIDADE DO TRANSPORTE AÉREO DOMÉSTICO DE PASSAGEIROS E A EFETIVIDADE ENERGÉTICA DO COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO

Manoela Gonçalves Cabo

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

Orientador: Elton Fernandes

Rio de Janeiro

Março de 2021

CAUSALIDADE DO TRANSPORTE AÉREO DOMÉSTICO DE PASSAGEIROS E  
A EFETIVIDADE ENERGÉTICA DO COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO

Manoela Gonçalves Cabo

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

Orientador: Elton Fernandes

Aprovada por: Prof. Elton Fernandes

Prof. Ronaldo Balassiano

Prof. Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Prof. Eduardo Lima Campos

Prof. Vicente Aprigliano Fernandes

Prof. José André de Moura Brito

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2021

Cabo, Manoela Gonçalves

Causalidade do Transporte Aéreo Doméstico de Passageiros e a Efetividade Energética do Combustível de Aviação / Manoela Gonçalves Cabo. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

X, 122 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Elton Fernandes

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 75-80.

1. Transporte Aéreo. 2. Crescimento Econômico. 3. Produtividade do Combustível de aviação. 4. Capacidade Ociosa. I. Fernandes, Elton. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, pois sem Ele nada seria possível.

A minha mãe Therezinha que sempre torceu, batalhou, acreditou, incentivou e investiu nos meus estudos. Ao meu padrasto Guaraci que sempre esteve ao lado dela me dando essa força e comemorando as vitórias. Ao meu saudoso pai e ao meu tio Nestor por terem ajudado a financiar parte da minha vida acadêmica. OBRIGADA mãe por tudo que fez!

Aos meus filhos, Carolina, João Vitor e Débora, por terem paciência de aguentar a mãe, muitas vezes estressada, por causa dos meus trabalhos, artigos e tese. Além de ter deixado muitas vezes de ficar com eles para estudar. Desculpem-me filhos, mas isso será recompensado.

Ao professor, orientador e amigo, Elton Fernandes por toda ajuda ao longo do doutorado, paciência e atenção que teve comigo nessa pandemia de 2020. Não poderia ter escolhido orientador melhor em toda minha vida.

As minhas amigas queridas Ariane, Renata, Daniela e outras por sempre estarem ao meu lado e compartilhando momentos de alegria e tristeza. As duas primeiras por me ajudarem desde o meu ensino médio, acho que sem elas não teria passado no vestibular.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## CAUSALIDADE DO TRANSPORTE AÉREO DOMÉSTICO DE PASSAGEIROS E A EFETIVIDADE ENERGÉTICA DO COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO

Manoela Gonçalves Cabo

Março/2021

Orientador: Elton Fernandes

Programa: Engenharia de Transportes

Esta tese mensura a causalidade entre transporte aéreo regular e crescimento econômico no Brasil e identifica na análise de eficiência do uso de combustível de aviação medidas orientadoras para órgãos formuladores de políticas e tomadores de decisão. Na primeira etapa se mostra a importância do desenvolvimento econômico para o transporte aéreo do país e na segunda se evidenciam formas de mitigar a necessidade de crescimento do setor frente ao novo cenário de sustentabilidade que se impõe para todos os países do Planeta.

Os resultados confirmam a hipótese de que há cointegração entre transporte aéreo e crescimento econômico, no entanto é uma causalidade bidirecional de longo e curto prazo para o tráfego aéreo doméstico e unidirecional de longo e curto prazo do crescimento econômico para transporte aéreo internacional. Na segunda etapa se considera o consumo de combustível e parâmetros de oferta do serviço de transporte aéreo regular doméstico, onde as políticas do país podem ser mais efetivas e onde os dados são mais completos. As oportunidades de melhorias de eficiência energética ficaram claras pela alta capacidade ociosa observada na utilização das aeronaves nos voos domésticos. Nesse cenário, identificou-se a necessidade de se buscar políticas mais efetivas com relação ao uso da capacidade de transporte das aeronaves nos voos domésticos, principalmente no que se refere ao transporte de carga. Os resultados indicam que se deve buscar políticas de sustentabilidade do setor que privilegiem a eficiência no uso da capacidade ociosa.

Abstract of Thesis presented to COPPE / UFRJ as a partial fulfilment of the requirements for the Doctor of Science degree (D.Sc.)

CAUSALITY OF DOMESTIC AIR PASSENGER TRANSPORT AND THE ENERGY  
EFFECTIVENESS OF AVIATION FUEL

Manoela Gonçalves Cabo

March/2021

Advisor: Elton Fernandes

Department: Transport Engineering

This thesis measures the causality between regular air transport and economic growth in Brazil and identifies, in the analysis of efficiency of the use of aviation fuel, guiding measures for policy makers and decision makers. The first stage shows the importance of air transport for the country's economic development and the second shows ways to mitigate the need for growth in the sector with the new sustainability scenario that is required for all countries on the Planet.

The results confirm the hypothesis that there is a cointegration between air transport and economic growth, however it is a long- and short-term bidirectional causality for domestic and unidirectional long- and short-term economic growth for international air transport. In the second stage, fuel consumption and supply parameters of the domestic scheduled air transport service are considered, where the country's policies may be more effective and where the data are more complete. The opportunities for energy efficiency improvements were made clear by the high idle capacity observed in the use of aircraft on domestic flights. In this scenario, the need was identified to seek more effective policies regarding the use of aircraft transport capacity on domestic flights, especially regarding cargo transportation. The results indicate that one must seek sector sustainability policies that favor efficiency in the use of capacity.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. TRANSPORTE AÉREO DE PASSAGEIROS.....	3
1.2. TRANSPORTE AÉREO DE CARGA .....	7
1.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO USO DO COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO .....	9
1.4. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO .....	11
1.5. OBJETIVO .....	14
1.5.1 OBJETIVO GERAL .....	16
1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.6. ESTRUTURA DO ESTUDO .....	17
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1 CAUSALIDADE ENTRE TRANSPORTE AÉREO DE PASSAGEIROS E CRESCIMENTO ECONÔMICO.....	19
2.2 EFETIVIDADE ENERGÉTICA DA UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEL .....	22
<b>3. METODOLOGIA DA PESQUISA</b> .....	<b>27</b>
3.1 CAUSALIDADE DE GRANGER DE PASSAGEIROS .....	28
3.2 DADOS EM PAINEL PARA EFETIVIDADE ENERGÉTICA DO COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO	32
3.2.1 MODELOS PARA DADOS EM PAINEL .....	34
3.2.1.1 MODELO GERAL .....	34
3.2.1.2 MODELO EFEITO FIXO .....	35
3.2.1.3 MODELO DE EFEITOS ALEATÓRIOS.....	37
3.2.1.4 HOMOCEDASTICIDADE (TESTE DE BREUSCH-PAGAN) .....	39
3.2.1.5 EFEITOS ALEATÓRIOS CORRELACIONADOS (TESTE DE HAUSMAN).....	39
3.2.1.6 RAZÃO DE VEROSSIMILHANÇA (TESTE DE CHOW) .....	40
3.2.2 METODOLOGIA ANALÍTICA DA CAPACIDADE OCIOSA.....	41

<b>3.3</b>	<b>BANCO DE DADOS .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3.1</b>	<b>DADOS DO MOVIMENTO DE PASSAGEIROS E CRESCIMENTO ECONÔMICO .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3.2</b>	<b>DADOS DA METODOLOGIA ANALÍTICA DE CAPACIDADE OCIOSA .....</b>	<b>45</b>
<b>4.</b>	<b>ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>VISÃO PANORÂMICA DO SETOR DE AVIAÇÃO CIVIL NO BRASIL.....</b>	<b>52</b>
<b>4.2</b>	<b>COINTEGRAÇÃO E CAUSALIDADE DE GRANGER ENTRE TRANSPORTE AÉREO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO NO BRASIL .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2.1</b>	<b>CAUSALIDADE ENTRE O PIB E O TRANSPORTE AÉREO DOMÉSTICO DE PASSAGEIROS</b>	<b>55</b>
<b>4.2.2</b>	<b>CAUSALIDADE ENTRE O PIB E O TRANSPORTE AÉREO INTERNACIONAL DE PASSAGEIROS.....</b>	<b>58</b>
<b>4.3</b>	<b>EFETIVIDADE ENERGÉTICA DA UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEL DE AVIAÇÃO NO TRANSPORTE AÉREO BRASILEIRO.....</b>	<b>61</b>
<b>4.3.1</b>	<b>ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS .....</b>	<b>61</b>
<b>4.3.2</b>	<b>ANÁLISE DO PAINEL .....</b>	<b>62</b>
<b>5.</b>	<b>DISCUSSÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>71</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>
	<b>ANEXO 1.....</b>	<b>81</b>
	<b>ANEXO 2.....</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXO 3.....</b>	<b>108</b>

## Lista de Figuras

Figura 1: Evolução da quantidade de passageiros transportados de 2009 a 2018: (a) mercado total; (b) mercado doméstico; (c) mercado internacional.

Figura 2: Evolução do ASK (Assentos-Quilômetros Oferecidos) de 2009 a 2018: (a) mercado doméstico; (b) mercado internacional.

Figura 3: Evolução da quantidade de carga aérea paga transportada – 2009 a 2018: (a) mercado total; (b) mercado doméstico; (b) mercado internacional. Fonte: ANAC – Anuário do Transporte Aéreo 2018.

Figura 4: Etapas de desenvolvimento da Pesquisa.

Figura 5. (a) Número de passageiros domésticos embarcados em milhões de passageiros, (b) Carga doméstica embarcada em milhões (kg) e (c) número de aeroportos.

Figura 6: Variance decomposition do  $\log gdp$  e  $\log paxdom$ .

Figura 7: Variance decomposition do  $\log gdp$  e  $\log paxint$ .

Figura 8. Coeficientes de efeito fixo de seção.

## Lista de Tabelas

- Tabela 1. Emprego e PIB relacionados ao transporte aéreo em uma amostra de países da América Latina e do Caribe em 2017.
- Tabela 2. A porcentagem das 4 principais companhias aéreas no RPK doméstico total do Brasil.
- Tabela 3. Frota de aeronaves de companhias aéreas brasileiras em 2000, 2007 e 2016.
- Tabela 4. Teste de raiz unitária aumentado Dickey-Fuller.
- Tabela 5. Resumo do teste de cointegração Johansen para PAXDOM.
- Tabela 6. Estimativas VEC para PAXDOM - Período 2000-2015.
- Tabela 7. Resumo do teste de cointegração Johansen para PAXINT.
- Tabela 8. Estimativas VEC para PAXINT - Período 1995-2015.
- Tabela 9. Estatísticas descritivas para as variáveis do modelo.
- Tabela 10. Estatísticas descritivas para as variáveis do modelo sem o logaritmo.
- Tabela 11. Evolução anual do *FPROD*, *IC*, *WF* e *ASIZE* de 2007 a 2016.
- Tabela 12. Testes de efeitos fixos redundantes (Chow-test).
- Tabela 13. Teste do multiplicador de Lagrange para efeitos aleatórios (Breusch-Pagan).
- Tabela 14. Teste de Hausman de efeitos aleatórios correlacionados.
- Tabela 15. Modelo de regressão de mínimos quadrados em dois estágios.
- Tabela 16. Efeito Fixo no período.

## 1. INTRODUÇÃO

Por cobrir 8,5 milhões de quilômetros quadrados (Km<sup>2</sup>) e abrigar 211,8 milhões de habitantes, o Brasil está posicionado como o quinto maior país do mundo tanto em extensão territorial quanto em termos populacionais<sup>1</sup>. Um país dotado de dimensões continentais requer um sistema de transportes eficiente, tanto para o escoamento da produção quanto para a efetiva integração nacional e internacional. O transporte aéreo trata-se, portanto, de um setor estratégico e catalizador de impactos diretos e indiretos sobre a economia brasileira.

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), a infraestrutura aeroviária do Brasil conta com cerca de 4 mil aeroportos e aeródromos. Deste total, 721 possuem pistas pavimentadas, incluindo áreas de desembarque. Este aspecto posiciona o Brasil como o segundo maior país do mundo em número de aeroportos, atrás apenas dos EUA.

O transporte aéreo é o único meio que torna possível o deslocamento fácil e seguro de cargas e pessoas em longas distâncias e em curto espaço de tempo. Por essa razão, sua indústria tem sido, cada vez mais, objeto de interesse de diversas organizações públicas e privadas ao longo das últimas décadas. Interesse este que se reflete praticamente em todas as partes do mundo e que abrange tanto as linhas de ligações áreas domésticas quanto as internacionais.

A maneira como se dá a contribuição da indústria do transporte aéreo para o desenvolvimento econômico de países e regiões é um tema que mobiliza grande debate entre os membros da comunidade científica que investigam e estudam o setor. De um lado, uma fonte de dados para esta argumentação consiste nos cálculos econômicos de impactos diretos, indiretos, induzidos e catalíticos do turismo sobre o Produto Interno Bruto (PIB) dos países. No Brasil, a Associação Brasileira de Empresas Aéreas (ABEAR) lidera esta discussão em seus relatórios periódicos (por exemplo, ABEAR, 2017). No entanto, em relatórios técnicos da ABEAR e de instituições internacionais, como a Air Transport Action Group (ATAG), as discussões sobre o impacto do transporte aéreo se

---

<sup>1</sup> De acordo com informações de 2020 fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

relacionam mais com a sua participação no PIB do país e do mundo do que com a questão da causalidade.

A Tabela 1 mostra estimativa, realizada pela ATAG (2018), para a renda (medida pelo PIB) e empregos gerados (de maneira direta e ampliada) pelo transporte aéreo em uma amostra de países da América Latina e do Caribe no ano de 2017. O Brasil se destaca nesta região como um dos principais mercados da indústria aeroviária, sendo responsável por aproximadamente 20% da geração de renda e de empregos. Cabe notar que, apesar das dimensões do seu mercado e das inúmeras e diversificadas atratividades turísticas, o Brasil não lidera as estatísticas catalíticas do turismo, sugerindo que o país apresenta gargalos que inibem a tradução do transporte aéreo em resultados turísticos.

Tabela 1. Emprego e PIB relacionados ao transporte aéreo em uma amostra de países da América Latina e do Caribe em 2017

País	Empregos (000s)					GDP (US\$ bilhões)				
	Direto	Indireto	Induzido	Catalítico de turismo	Total	Direto	Indireto	Induzido	Catalítico de turismo	Total
Argentina	71	79	51	129	330	3,7	2,3	1,5	4,2	11,7
Brasil*	167	253	119	300	839	4,8	5,0	2,3	6,5	18,6
Chile	33	71	28	59	191	2,2	2,1	0,9	1,8	7,0
Colômbia	71	76	22	432	601	1,0	0,9	0,3	5,3	7,5
República Dominicana	11	20	8	442	481	0,4	0,3	0,1	8,1	8,9
Equador	12	28	11	155	206	0,4	0,4	0,2	2,2	3,2
México	34	74	30	841	979	0,4	0,7	0,3	8,3	9,6
Peru	33	68	17	223	341	0,7	0,8	0,2	3,3	5,0

Fonte: ATAG, 2018. (\*) 2017 GDP estimado.

Do ponto de vista econômico, embora a primeira década do século XXI não marque o início do movimento de liberalização mais recente da economia brasileira, que teve seu início marcado pelo fim do regime de exceções que durou de 1964 a 1989 no país, este foi o período a partir do qual as informações microeconômicas sobre o transporte aéreo de passageiros passaram a estar disponíveis por rotas. Em 2011, consolidou-se a primeira rodada de concessões de grandes aeroportos brasileiros à gestão privada, o que ocorreu com ofertas de outorgas muito otimistas em relação à perspectiva da aviação comercial brasileira.

Alguns acontecimentos ocorreram durante este período e afetaram a indústria brasileira de aviação civil. Em 2011, o país vivia um ambiente de estabilidade política e crescimento econômico. O início da concessão dos principais aeroportos brasileiros, a escolha do país

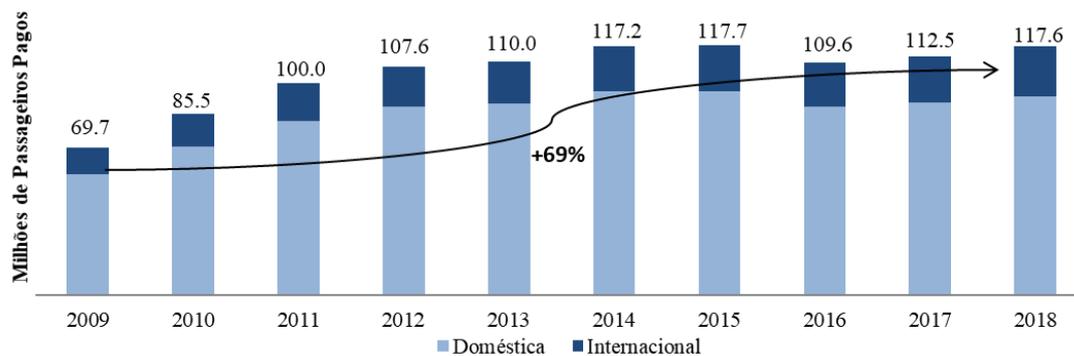
para sediar a Copa do Mundo de Futebol da FIFA 2014 e a escolha do Rio de Janeiro para sediar os Jogos Olímpicos de 2016, dentre outros fatores, levaram a um sentimento de otimismo em relação à evolução do transporte aéreo no Brasil. Esse clima de perspectivas econômicas positivas continuou até 2014, quando se iniciou um processo de crise econômica e política no país, culminando com o impeachment da presidente no final de 2016.

Desde então, o Brasil entrou em um dos períodos mais difíceis de sua história econômica, com a economia mostrando sinais de enfraquecimento e austeridade no aumento dos gastos de capital. Em 2015, entrou em recessão, com o PIB sofrendo queda de 3,8%, conforme o resultado divulgado pelo IBGE.

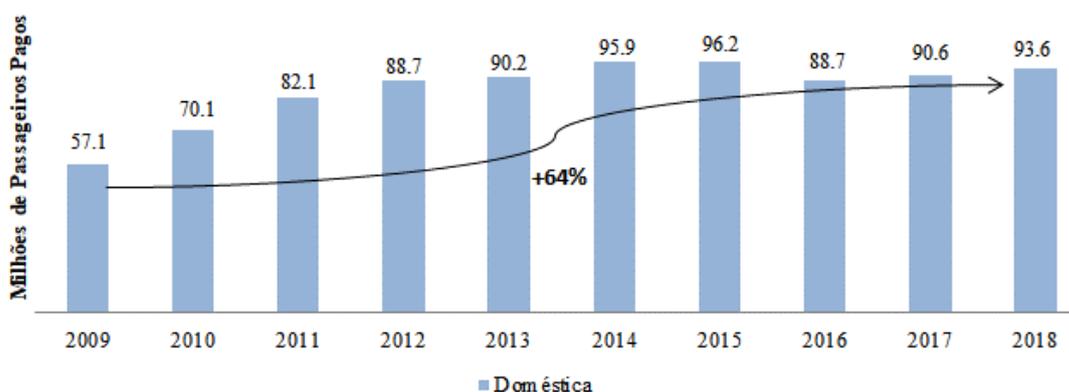
Uma série de medidas relacionadas ao transporte aéreo foram tomadas com o intuito de contribuir para a recuperação econômica, incluindo medidas liberalizantes de toda ordem, como, por exemplo, acordos bilaterais para distender os limites operacionais e ampliar as liberdades aéreas e nova rodada de concessões aeroportuárias. No entanto, essas medidas não foram suficientes para que o setor da aviação civil brasileira e a atividade econômica como um todo, de fato, apresentassem melhores resultados. As particularidades que caracterizam este período nos permitiram, portanto, examinar o setor no contexto de uma economia que atravessou ciclos de estabilidade, crescimento e recessão.

### *1.1. Transporte aéreo de passageiros*

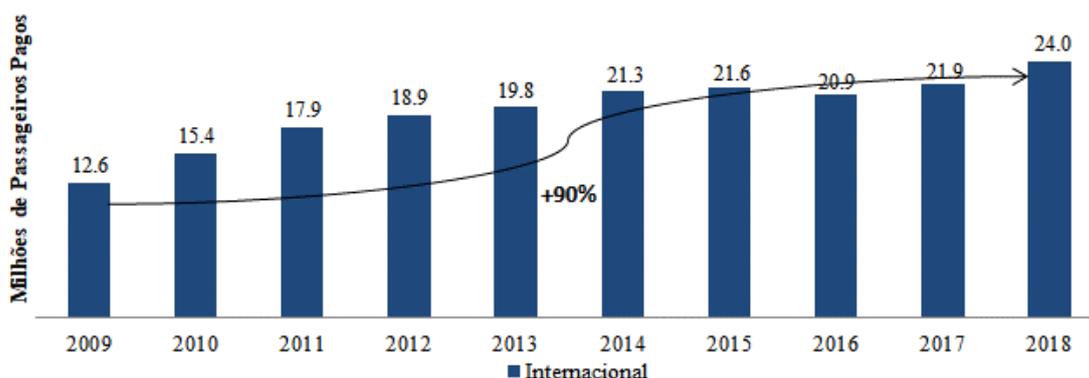
Uma breve análise sobre o mercado de aviação civil no Brasil, sintetizada pela Figura 1, obtida do Anuário do Transporte Aéreo 2018 da ANAC, evidencia que ocorreu uma queda significativa do transporte aéreo de passageiros, tanto em trechos domésticos quanto internacionais, no ano de 2016, retornando a patamares menores que o registrado no ano de 2013.



(a)



(b)

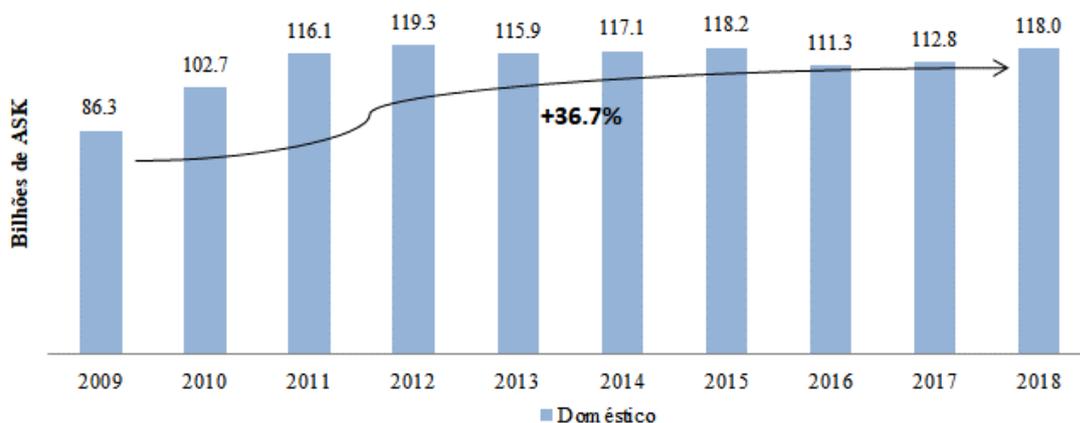


(c)

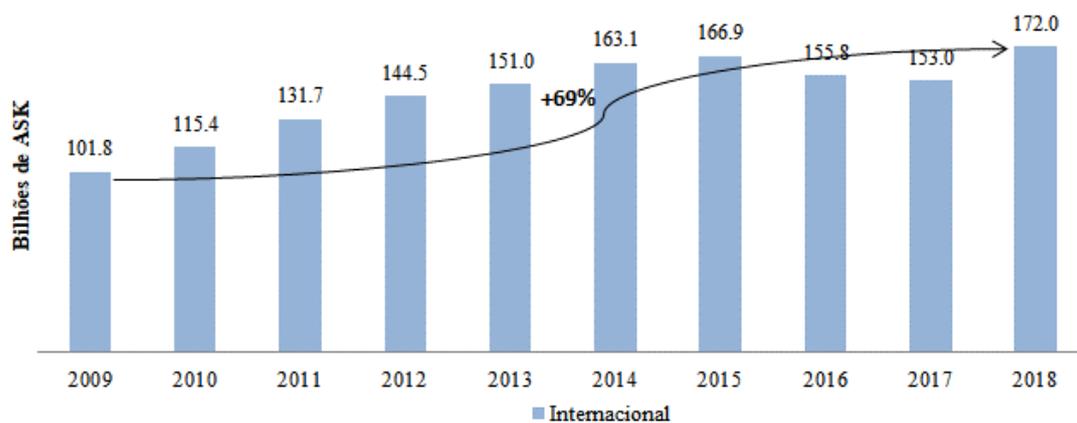
**Figura 1:** Evolução da quantidade de passageiros transportados de 2009 a 2018: (a) mercado total; (b) mercado doméstico; (c) mercado internacional. Fonte: ANAC – Anuário do Transporte Aéreo 2018.

A Figura 1 apresenta a evolução da quantidade de passageiros transportados, nos mercados doméstico e internacional, de 2009 a 2018. Nesse sentido, observou-se crescimento de 69%, nesse período, evolução significativa mesmo considerando o período de crise econômica do ano de 2016. Pode-se observar que, em 2018, 93.6 milhões

de passageiros foram transportadas no mercado doméstico, crescimento de 64% de 2009 a 2018. No mercado internacional, que representa em torno de 20% do total de passageiros, com crescimento de 90% de 2009 a 2018, bem superior ao mercado nacional, e a quantidade transportada foi de, aproximadamente, 24 milhões de pessoas em 2018.



(a)



(b)

**Figura 2:** Evolução do ASK (Assentos-Quilômetros Oferecidos) de 2009 a 2018: (a) mercado doméstico; (b) mercado internacional. Fonte: ANAC – Anuário do Transporte Aéreo 2018.

A figura 2 apresenta a evolução dos assentos por quilômetros oferecidos nos mercados doméstico e internacional, de 2009 a 2018. Fazendo a análise sob a ótica da oferta, observa-se um crescimento de 37% na oferta por assentos no mercado doméstico, crescimento muito inferior ao da demanda. Em contrapartida, no mercado internacional, essa oferta por assentos cresceu aproximadamente 69%, bem abaixo da demanda por

assentos entre 2009 e 2018. Esse fato evidencia a diferença da dinâmica entre os mercados doméstico e internacional. Diante deste contexto de crescimento do setor, a primeira parte deste estudo tem por objetivo analisar o mercado de passageiros e como a economia o influencia.

O Brasil é considerado um dos maiores mercados domésticos de transporte aéreo de passageiros do mundo. Estima-se que o mercado brasileiro se tornará o quarto maior até o ano de 2029, ficando atrás apenas dos EUA, China e Índia (Fernandes e Pacheco, 2016). Curiosamente, no entanto, o Brasil está fora das principais rotas de transporte aéreo internacional, diminuindo o potencial de internacionalização, tráfego e interação com os principais mercados globais.

Este estudo considerou o Produto Interno Bruto per capita, que, embora não seja uma medida perfeita, representa melhor o desenvolvimento econômico do país. Os cortes nas conexões e nas frotas aéreas brasileiras em 2016 corroboram com a análise de Fernandes e Pacheco (2010), mostram que suas análises estavam corretas. No entanto, sua pesquisa não considerou os passageiros embarcados e desembarcados em aeroportos nem o movimento internacional de passageiros. Uma contribuição e originalidade é a inclusão de passageiros internacionais à análise, pois, os movimentos internacionais e domésticos têm dinâmicas diferentes e, portanto, precisam ser analisados separadamente. A literatura sobre o assunto é em geral um consenso que existe uma relação entre o PIB e o transporte de passageiros, mas esse comportamento deve ser investigado ao longo do tempo e que essa relação varia a qualquer momento ou de país para país.

No ano de 2014 o Brasil sediou a Copa do Mundo e, em 2016, foi a vez das Olimpíadas. Com dois eventos de tão grande impacto sobre o fluxo de pessoas, em tão curto prazo, algo inédito para o país, houve uma grande demanda de pesquisa relacionada ao fluxo aéreo de passageiros, sobretudo para o dimensionamento de aeroportos ao incremento da demanda e para a adequação da infraestrutura. Não obstante, os estudos sobre transporte aeroviário ligados a questões ambientais foram poucos. Esta seria uma outra contribuição, sugerir medidas de curto prazo para a efetividade do combustível de aviação, de forma que o Brasil, um país em desenvolvimento, cresça sem a redução de crescimento do transporte aéreo e sem causar impactos ao meio ambiente.

Destaca-se como contribuição e originalidade da tese o dimensionamento da relação entre o movimento de passageiros domésticos e internacionais e o crescimento econômico medido pelo PIB. De outra forma inclui-se nessa análise a abordagem do uso do combustível de aviação, que com as tecnologias disponíveis, a redução das emissões de gases de efeito estufa resultaria em uma redução das atividades do transporte aéreo. Restando apenas, para um país em desenvolvimento como o Brasil, melhorar o desempenho do combustível de aviação, dando o caráter de sustentabilidade, mitigando os efeitos ambientais negativos que a atividade traz com o seu crescimento. Em suma, no curto prazo, o crescimento da atividade deve ser orientado para o uso eficiente do combustível de aviação e não somente para a redução das emissões.

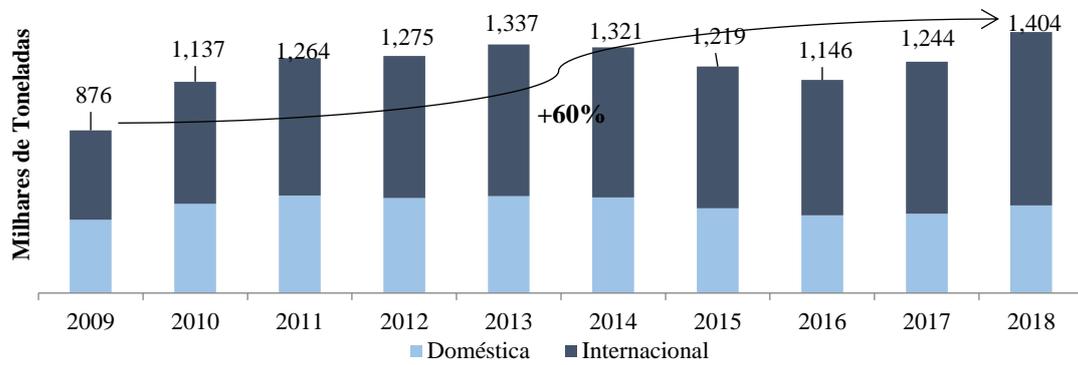
### *1.2. Transporte aéreo de carga*

O fluxo de carga movimentado pelas ligações aeroviárias é um importante nicho do setor aéreo. Contudo, o transporte aéreo de carga no Brasil é um mercado ainda pouco desenvolvido quando comparado a outros países do mundo, embora seja uma atividade fundamental para garantir o traslado ágil, tempestivo e seguro requisitado por determinados tipos de mercadorias. Fundamental para a competitividade das empresas aéreas e o desenvolvimento da economia, estudos voltados a uma melhor compreensão do transporte aéreo de carga são de grande valia para a pesquisa científica relacionada à aviação civil.

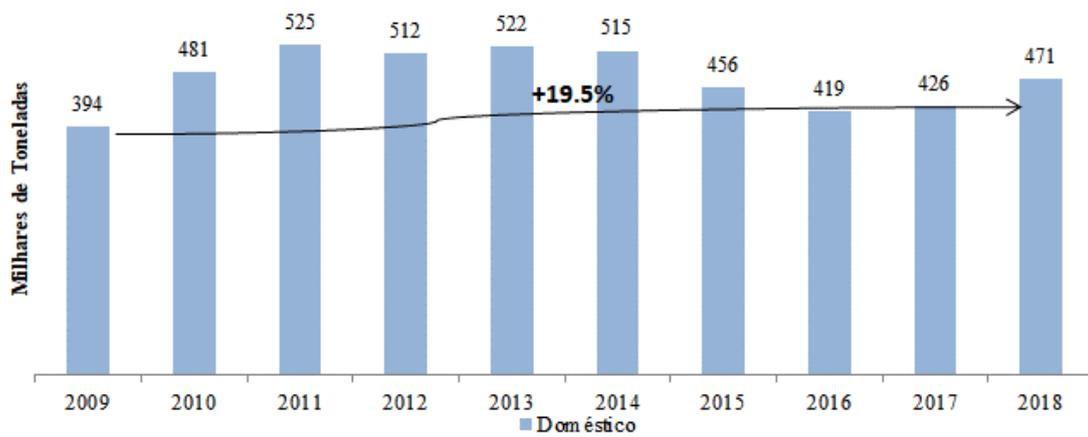
O transporte aéreo de cargas tem sido objeto de grande interesse para diversas organizações públicas e privadas nos últimos anos. Com a globalização, o acirramento da competição nos mercados faz com que, cada vez mais, as empresas necessitem oferecer o melhor preço com o menor tempo de entrega da mercadoria. Daí a importância da logística just-in-time (JIT) para alavancar o setor de carga aérea (Azadian, Murat et al. 2012).

O presente estudo é desenvolvido em um momento em que o transporte aéreo de carga está em pleno desenvolvimento e, desde 1970, dobra o seu volume a cada 10 anos (Chang, Yeh et al. 2007). Além disso, segundo o World Air Cargo Forecast (WACF), publicado pela Boeing, a previsão para o tráfego aéreo mundial de carga é de crescimento médio de

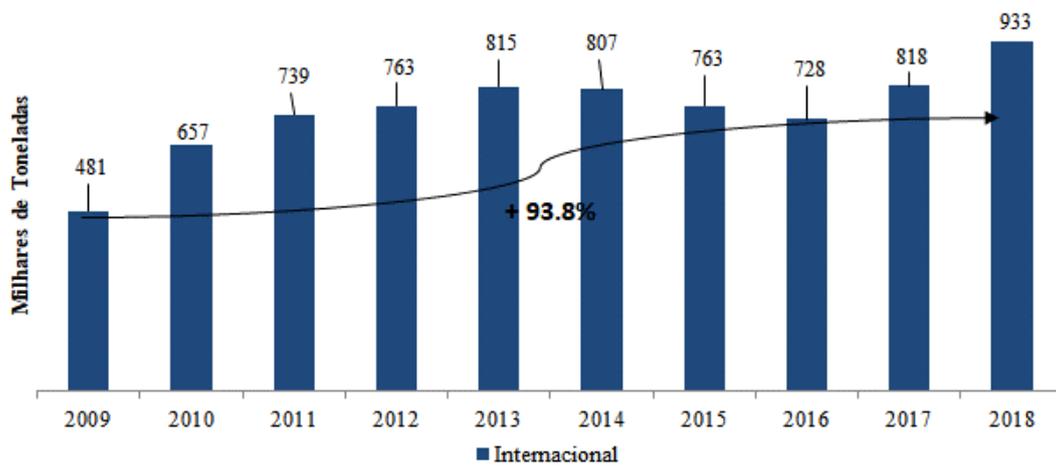
4.7% ao ano nos próximos 20 anos, com a duplicação da receita de toneladas por quilômetros em relação ao observado em 2013 (Boeing 2015).



(a)



(b)



(c)

**Figura 3:** Evolução da quantidade de carga aérea paga transportada – 2009 a 2018: (a) mercado total; (b) mercado doméstico; (c) mercado internacional. Fonte: ANAC – Anuário do Transporte Aéreo 2018.

Segundo o Anuário do Transporte Aéreo de 2018, realizado pela ANAC, a quantidade de carga paga transportada no mercado doméstico, em toneladas, registrou crescimento médio de 2% ao ano entre 2009 e 2018. A Figura 3 revela que, em 2018, 471 mil toneladas foram transportadas no mercado doméstico, representando crescimento de 19,5% no período. A quantidade de carga paga transportada no mercado internacional vem registrando crescimento ainda maior, em média 9% ao ano nos últimos dez anos, atingindo 933 mil toneladas no ano de 2018 (alta de 94% desde 2009) e totalizando crescimento de 60% em ambos os mercados.

No Anexo 1 pode-se observar a Matriz de Transporte de Cargas, desenvolvida pelo Ministério dos Transportes. Em 2014, o transporte aéreo de cargas correspondia a 0,3% total de carga transportada, no entanto a previsão é que aumente para 1% até 2025. Esse tipo de transporte tem por característica o transporte de carga de maior valor, mais de 35% do valor de carga transporte mundialmente é do transporte aéreo e menor volume, menos de 1% do volume deve-se a esse modal (Anexo 1).

### 1.3. Eficiência energética no uso do combustível de aviação

A sustentabilidade do desenvolvimento é um tema estratégico, o que exige que a dimensão ambiental seja considerada nos mais diversos ramos da pesquisa científica. Desde a Primeira Guerra Mundial, o setor de aviação comercial experimentou inúmeras melhorias que agora permitem que pessoas e mercadorias cheguem ao outro lado do mundo em poucas horas e consumindo muito menos combustível do que no passado. As melhorias no tocante à capacidade de carga e à eficiência energética foram significativas e, nesse cenário, as companhias aéreas comerciais foram capazes de prosperar e promover grandes benefícios para a economia mundial. No entanto, este setor tem ainda pela frente importantes desafios ambientais que se devem ao uso intensivo do combustível de aviação. O Brasil é um dos maiores mercados domésticos de passageiros aéreos no mundo e ainda possui grande potencial de crescimento, considerando seus ativos estratégicos,

dentre os quais as dimensões territoriais, o contingente populacional e as potencialidades econômicas.

A pesquisa orientada a melhorar a eficiência do uso do combustível de aviação tem sido um esforço contínuo de empresas do segmento de aviação e, principalmente, de fabricantes de aeronaves e turbinas. Contudo, na prática necessita-se de um grande esforço para o desenvolvimento de novos combustíveis, a sua autorização de uso pelas autoridades competentes e, por fim, a efetiva adaptação de motores e turbinas, o que leva um longo tempo e exige empenho cooperativo entre os diversos atores da indústria de transporte aéreo. Por outro lado, pesquisas relacionadas ao tema da eficiência no consumo de combustível podem contribuir com a sustentabilidade ambiental, a econômica e a parte social das atividades de transporte aéreo em todo o mundo, principalmente em países emergentes como o Brasil.

O setor de aviação está na vanguarda quando se trata de reduzir ou mitigar os impactos ambientais adversos provenientes de suas atividades. As pressões do mercado, incluindo medidas regulatórias e concorrência, exigem melhorias na produtividade dos negócios relacionados aos mais variados stakeholders da indústria, sejam eles fornecedores de materiais (como fabricantes de turbinas e aeronaves), prestadores de serviços (como a navegação aérea), operadores terrestres (como aeroportos) ou as principais entidades da cadeia produtiva – as próprias companhias aéreas (Fernandes e Pacheco, 2016).

Até certo ponto, os objetivos ambientais e financeiros das companhias aéreas são convergentes com o principal custo operacional da empresa, a capacidade ociosa (Doganis, 2009). A capacidade ociosa é uma preocupação grande na aviação civil, pois pode resultar em aumento das necessidades de capital e dos custos operacionais relacionados tanto ao transporte de passageiros quanto ao de carga. No entanto, Schnell (2005) sugere que as empresas aéreas intencionalmente mantêm recursos ociosos para atender a demanda incerta, internalizar oportunidades de crescimento antecipado e lidar com a concorrência. Isso acontece mesmo com o efeito negativo sobre o custo das companhias aéreas, aumentando o principal componente de custo operacional, que é o combustível. Nesse sentido, uma medida importante de eficiência no transporte aéreo é o peso transportado pelo combustível queimado.

Embora o transporte aéreo não esteja na lista das atividades econômicas que mais poluem o planeta, seu principal efeito ambiental ocorre em grandes altitudes, um local muito específico e que é alvo de grande preocupação para os ambientalistas (Daley, 2016). Como resultado, devido a seus possíveis impactos adversos, as atividades de transporte aéreo foram monitoradas com considerável atenção no período recente.

No Brasil, a queima de combustível no transporte aéreo doméstico constitui a principal fonte de poluição deste setor. Nesse sentido, a segunda parte deste estudo examina como o desempenho do transporte aéreo progrediu em termos de consumo de combustível de aviação e discute as perspectivas para o futuro. Um problema não resolvido é determinar se há espaço para melhorar o desempenho com as tecnologias existentes. A observação de dados reais em um mercado como o do Brasil, estimado para se tornar o quarto maior mercado mundial até o final da década de 2020, pode gerar informações importantes sobre o cenário global.

A contribuição científica dessa parte do trabalho está concentrada no uso de um método objetivo para determinar padrões de tendência de desempenho em um setor importante para a questão da sustentabilidade e, assim, abrir uma discussão sobre possíveis medidas setoriais que possam levar a novos ganhos de produtividade, um fator essencial para uma indústria com perspectivas de altas taxas de crescimento nos próximos anos. No âmbito de uma economia que necessita que a atividade de transporte aéreo cresça, é importante se observar os ganhos de produtividade da utilização dos recursos, uma vez que a simples redução do uso desses recursos pode implicar em efeitos econômicos negativos para a sociedade, pela própria inibição do crescimento do setor.

#### *1.4. Contextualização do estudo*

Com base nessas informações, diante de um setor promissor, que registra trajetória de crescimento desde 2009 e que sinaliza com boas perspectivas de futuro (cenário retratado pela Figura 1), e motivado pela relativa escassez, na literatura científica, de pesquisas com aplicação de técnicas de modelagem avançadas, como modelagem de dados em painel; causalidade de Granger para passageiros internacionais; introdução do conceito de efetividade energética com foco em variáveis de serviços; em especial no Brasil, que este trabalho foi desenvolvido. A presente tese examina a causalidade entre transporte

aéreo e crescimento econômico no Brasil e, complementarmente, busca na análise da eficiência de combustível deste modo de transporte orientar os órgãos reguladores e tomadores de decisão do setor na formulação de medidas e políticas de estímulo da atividade em consonância com as exigências ambientais que se tornam, a cada dia, mais impositivas.

O trabalho está desenvolvido em duas etapas. A primeira aborda a causalidade entre transporte aéreo (doméstico e internacional) e crescimento econômico no Brasil, buscando evidenciar e mensurar a importância do transporte aéreo, um setor de caráter estratégico, para o desenvolvimento econômico do país. Nela se utiliza o total de passageiros embarcados e desembarcados como proxy para a atividade de transporte aéreo, e o Produto Interno Bruto (PIB) é o indicador utilizado para mensurar o desenvolvimento econômico.

Já a segunda etapa do trabalho aborda formas de garantir a sustentabilidade ambiental do crescimento do setor, uma necessidade que se impõe para toda a humanidade, sobretudo em um cenário no qual serão cada vez mais visíveis e percebidos os efeitos decorrentes das mudanças climáticas. Nesta etapa se considera o consumo de combustível e parâmetros de oferta do serviço. As melhorias na capacidade de carga e na eficiência energética foram significativas nas últimas décadas, possibilitando às companhias aéreas comerciais prosperar e contribuir com o crescimento da economia mundial. No entanto, nos anos recentes os desafios ambientais enfrentados pelo setor aéreo tornaram-se cada vez mais imperativos, devido, sobretudo, ao uso intensivo de combustível de aviação. Através de uma abordagem econométrica, discute-se nesta segunda etapa a temática da produtividade parcial do combustível. Os resultados mostram que a redução da capacidade ociosa é uma das melhores formas de alcançar eficiência de combustível a curto prazo, reduzindo os impactos ambientais e com efeitos econômicos positivos nas atividades comerciais de transporte aéreo.

Os resultados encontrados nestas duas etapas do trabalho poderão servir de subsídio para o processo decisório no âmbito dos diversos atores atuantes ou com influência sobre o setor aéreo, bem como insumo para novas pesquisas associadas. Tais informações são relevantes para decisões relacionadas a políticas de incentivos e alocação de recursos na infraestrutura do transporte aéreo no Brasil, dado que o setor é intensivo em três recursos econômicos essenciais: capital financeiro, tecnologia e capital humano. O grande

diferencial do presente estudo, portanto, é a conciliação de uma abordagem de causalidade econômica com a abordagem ambiental de produtividade do combustível de aviação como um elemento importante nas emissões de poluentes e nos custos dos negócios.

Esta tese está construída a partir da unificação da pesquisa desenvolvida sobre transporte aéreo. Fruto deste trabalho de investigação científica, foram derivados dois artigos publicados em revistas internacionais consagradas no meio acadêmico e um artigo apresentado na Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte (ANPET).

O primeiro artigo, denominado “Economic Growth Relations to Domestic and International Air Passenger Transport in Brazil” (Cabo et al. 2018), examinou a relação de cointegração e causalidade entre crescimento econômico e transporte aéreo regular de passageiros, doméstico e internacional, no Brasil. O segundo artigo, publicado na revista científica *Sustainability*, intitulado “Energy Effectiveness of Jet Fuel Utilization in Brazilian Air Transport” (Cabo et al. 2020), discute a produtividade parcial do combustível de aviação no tráfego aéreo doméstico brasileiro, propondo um método econométrico para apoiar as decisões dos órgãos reguladores e das companhias aéreas. O terceiro é o artigo “Modelo para o fluxo de carga transportada entre as cidades brasileiras: abordagem com dados em painel” (Cabo et al 2016), apresentado no 30º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET).

Como primeiro passo, nos três estudos foram desenvolvidas pesquisas para a identificação de variáveis significativas, nas dimensões macroeconômica, geográfica e setorial, para criação de uma base de dados adequada. Em seguida, após a realização de simulações, foram propostos modelos baseados em análise multivariada e em estudos das séries temporais resultantes da pesquisa, tendo-se como objetivos estimar: a efetividade energética da utilização de combustível de aviação no transporte aéreo; a causalidade entre o desenvolvimento econômico e transporte de passageiros domésticos e internacionais; e um modelo para o fluxo aéreo de carga.

Nesse contexto, verifica-se que a produtividade do combustível pode ser eficiente utilizando a capacidade ociosa tanto de passageiros como de carga de porão. Como a capacidade ociosa do transporte de passageiros é pequena, realizou-se estudo de causalidade entre passageiros e crescimento econômico. Por fim, tendo em vista o fato de

que existe grande capacidade ociosa no transporte de carga, desenvolveu-se estudo sobre a movimentação de carga, que pode ser explicada estatisticamente por outros dados socioeconômicos e demográficos, além de seu passado histórico.

Quando uma companhia aérea decide operar em uma rota específica, deve tomar decisões sobre qual aeronave usar e com que frequência usar uma rota específica. Neste estudo, todas as variáveis foram indicadas por suas médias anuais em cada rota. Givoni e Rietveld (2006) mostram que a escolha do tamanho da aeronave pelas companhias aéreas depende das características da rota e não das características do aeroporto. Por conseguinte, o tamanho da aeronave e a frequência de voos podem ser vistos como representando o lado da oferta das características da rota.

### *1.5. Objetivo*

Esta tese tem por objetivo suprir este gap na literatura, a saber, considerar tanto passageiros embarcados como desembarcados e acrescentar o fluxo de passageiros internacionais. A literatura sobre o assunto, em geral, converge para o fato de que existe uma relação entre PIB e transporte aéreo de passageiros, mas o comportamento dessa relação é característica para cada país e precisa ser investigada periodicamente, pois pode sofrer alterações ao longo do tempo.

O estudo analisou a existência de cointegração e a direção de causalidade entre o PIB e o fluxo aéreo doméstico e internacional de passageiros em aeroportos no Brasil. Essa investigação é de suma importância para a tomada de decisão sobre incentivos, investimentos e alocação de recursos na infraestrutura aeroportuária no Brasil.

Além do gap apontado, um outro ponto a ser pesquisado é a busca por alternativas para melhorar a eficiência e aumento da produtividade do combustível de aviação, algo que tem sido uma constante nas empresas aéreas. A discussão de produtividade da queima de combustível (*productivity*) e o desenvolvimento de estudos com ênfase na eficiência de um combustível renovável são iniciativas que podem contribuir para alavancar a atividade do transporte aéreo de forma sustentável, no mundo e, principalmente, em países emergentes como o Brasil.

A questão ambiental adquiriu espaço de destaque na agenda das principais indústrias da economia global, sejam as de produção de bens ou as prestadoras de serviços, como o transporte aéreo. Uma medida importante para analisar a eficiência do transporte aéreo é o transporte de toneladas por combustível queimado, principalmente os combustíveis não renováveis que produzem grandes quantidades de poluentes. Outro passo significativo rumo à preservação ambiental e sustentabilidade do desenvolvimento é a utilização de fontes de energia renováveis e não poluentes, outro importante desafio futuro do setor aéreo.

Nesse sentido, este trabalho se propõe a discutir como gerenciar os fatores que influenciam a produtividade parcial do combustível de aviação tendo em vista alcançar uma situação que permitirá que a indústria de transporte aéreo cresça de maneira ambientalmente sustentável. A partir disso, podemos inferir algumas perguntas: (i) a análise da capacidade ociosa pode auxiliar no esforço de alcançar uma melhor sustentabilidade do setor? (ii) em uma indústria em crescimento como o transporte aéreo, há alternativas para buscar aumentar a produtividade parcial do combustível para melhorar a posição de custo das companhias aéreas e reduzir os impactos ambientais esperados da atividade?

Portanto, nesta parte específica do estudo, se considera o consumo de combustível e os parâmetros de oferta do serviço de transporte aéreo regular doméstico, temática na qual as políticas do país podem ser mais efetivas e onde os dados são mais completos. Nota-se que as oportunidades de melhoria de eficiência energética ficaram claras pela alta capacidade ociosa observada na utilização das aeronaves nos voos domésticos. Nesse cenário, identificou-se a necessidade de se buscar políticas mais efetivas com relação ao uso da capacidade de transporte das aeronaves nos voos domésticos, principalmente no que se refere ao transporte de carga.

As hipóteses a serem verificadas nesse trabalho foram, no primeiro momento, se existe causalidade significativa entre o transporte aéreo de passageiros e o crescimento econômico. E a segunda hipótese, verificar se a capacidade ociosa na utilização das aeronaves de passageiros tem relação significativa com a produtividade parcial da queima do combustível de aviação.

### *1.5.1 Objetivo Geral*

O objetivo geral do estudo é, primeiramente, examinar a existência de cointegração e a direção da causalidade entre o PIB e o movimento doméstico e internacional de passageiros nos aeroportos do Brasil. Uma novidade que o estudo considera em sua análise é o número de passageiros transportados, nacional e internacionalmente, além do PIB, dado que o crescimento econômico influencia a decisão de voar internacionalmente. Dividindo-se o movimento de passageiros aéreos em seus componentes doméstico e internacional, o estudo discute suas relações com o desenvolvimento econômico no caso do Brasil.

No que tange à eficiência energética e sustentabilidade ambiental do setor, o objetivo consiste em examinar a produtividade do combustível de aviação como um elemento importante nos custos organizacionais e nas emissões de gases de efeito estufa. Em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde o transporte aéreo é uma pequena parte da matriz de transporte, o foco não é apenas a redução de emissões, mas também o uso responsável de combustível de aviação, sendo a redução da capacidade ociosa um elemento fundamental para a sua produtividade.

Apesar de apresentar alguns desenvolvimentos na linha de pesquisa que aborda as possibilidades dos chamados combustíveis alternativos renováveis, ou seja, combustíveis de baixa emissão e alto rendimento, capazes de substituir o tradicional Jet Fuel A1/8, este trabalho será limitado à análise de opções operacionais que possam contribuir para a produtividade do combustível. Ademais, propõe-se soluções de curto prazo para reduzir os impactos ambientais causados pela queima de combustível de aviação.

### *1.5.2 Objetivos Específicos*

Complementarmente, os objetivos específicos são:

- a) Verificar as variáveis socioeconômicas que influenciam o fluxo de transporte aéreo de passageiros e carga;
- b) Examinar como o desempenho do transporte aéreo progrediu no tocante ao consumo de combustível de aviação e discutir as perspectivas para o futuro. Um problema não resolvido é determinar se há espaço para melhorar o desempenho com as tecnologias existentes;

- c) Testar a existência de cointegração e a direção da causalidade entre o PIB e os movimentos doméstico e internacional de passageiros nos aeroportos do Brasil, considerando o número de pessoas transportadas, além do PIB em moeda brasileira. Esta abordagem em relação à utilização do PIB em diferentes moedas busca refletir a influência da taxa de câmbio sobre a decisão de voar internacionalmente. Ao segmentar o movimento de passageiros aéreos em seus componentes doméstico e internacional, a pesquisa discute suas relações com o desenvolvimento econômico no caso do Brasil;
- d) Propor uma metodologia dinâmica para uma alocação ótima de combustível considerando a sua produtividade pelo volume de carga transportada em cada ligação; e
- e) Formular um modelo estatístico, utilizando-se de dados em painel, para cada ligação aérea, baseando-se na análise multivariada e nos estudos de séries temporais resultantes da pesquisa.

#### *1.6. Estrutura do Estudo*

Esta tese está organizada em seis capítulos. Esta introdução apresenta o contexto da temática estudada e detalha o problema que será investigado. Ademais, explicita os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma revisão dirigida da literatura, onde identificamos os estudos mais pertinentes a serem considerados. A revisão da literatura foi dividida entre as publicações utilizadas para análise da causalidade no movimento de passageiros e aquelas sobre efetividade energética da utilização de combustível.

A seguir, no capítulo de metodologia da pesquisa, explicita-se a abordagem quantitativa que irá apoiar o estudo de caso sobre a causalidade entre transporte aéreo e crescimento econômico, bem como o desenho metodológico empregado no âmbito do estudo da produtividade da queima de combustível do transporte aéreo doméstico brasileiro.

No quarto capítulo apresenta-se o caso em estudo por meio do qual é desenvolvida a investigação do problema apresentado. O capítulo cinco engloba uma discussão dos resultados apresentados e propõe insights para a formulação de políticas mais adequadas ao desenvolvimento do transporte aéreo e consumo de querosene de aviação.

Finalizando, o sexto capítulo sintetiza e oferece visão de conjunto aos principais resultados alcançados, sinalizando para eventuais aprofundamentos, complementos e demais possibilidades de pesquisas futuras relacionadas ao assunto.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura está estruturada de acordo com as etapas da pesquisa: primeiramente, será apresentada a literatura de interesse relacionada ao tema da causalidade entre transporte aéreo de passageiros e crescimento econômico; em seguida, a literatura investigada terá como foco de análise a questão da efetividade energética da utilização de combustível de aviação no transporte aéreo brasileiro.

### 2.1 Causalidade entre transporte aéreo de passageiros e crescimento econômico

Diversas publicações encontradas na literatura científica sobre transporte aéreo de passageiros investigam o impacto sobre o crescimento do setor de medidas governamentais, como a liberalização de preços, a privatização da infraestrutura e demais iniciativas de flexibilização da aviação civil. Alguns estudos, inclusive, relacionam a evolução do transporte aéreo à renda, expressa, em geral, pelo PIB ou pelo PIB per capita. No entanto, são as escassas as publicações que exploram a explicação de causalidade. Particularmente, os estudos de causalidade de Granger entre séries macroeconômicas são pouco utilizados na área de transporte aéreo.

A causalidade de Granger, que foi concebida pelo Prêmio Nobel de Economia de 2003, Clive William John Granger, consiste em uma das principais ferramentas analíticas para investigar as relações de causalidade entre séries temporais de indicadores econômicos, sendo, por isso, amplamente utilizada nos mais diversos campos de pesquisa. No estudo que fundamenta esta metodologia analítica (GRANGER, 1969), Granger sustenta que a simples correlação entre séries históricas não indica causalidade. Nessa direção, Soyta e Sari (2003) argumentam que, ao demonstrar a precedência estatística de uma série histórica sobre outra, a metodologia concebida por Granger torna-se, de fato, capaz de indicar causalidade em um dado período de estudo. Não só os indicadores calculados com a aplicação da metodologia, mas também a argumentação racional quanto à relação entre as séries em questão, são fundamentais para aceitar tal causalidade. Desde sua formulação original, a metodologia da causalidade de Granger passou por novos desenvolvimentos e está bem documentada na literatura acadêmica (APRIGLIANO FERNANDES et al., 2021).

A revisão da literatura incidirá sobre um conjunto de artigos selecionados para apoiar a definição da metodologia da tese em sua primeira etapa. Dentre os estudos revisados, alguns examinados a seguir são mais relevantes para questões relacionadas à causalidade entre transporte aéreo de passageiros e crescimento econômico no Brasil.

Kuledran e Wilson (2000) investigaram a existência de uma relação de causalidade entre o comércio internacional e os fluxos de viagens internacionais em ligações aéreas entre dois países. Os autores analisaram relações entre a Austrália e outros 4 países utilizando como suporte técnico as abordagens de cointegração e causalidade de Granger. Kuledran e Wilson concluíram a existência da causalidade entre as variáveis estudadas.

Chang e Chang (2009) examinaram a existência de relacionamento causal entre a expansão do movimento de carga aérea e o crescimento econômico em Taiwan. Os resultados obtidos pelos autores mostram haver causalidade bidirecional entre essas variáveis, indicando que a expansão do movimento de carga transportada pelo modal aéreo desempenha um importante papel na promoção do crescimento econômico de Taiwan.

Fernandes e Pacheco (2010) testaram a relação de causalidade entre o crescimento econômico e o transporte aéreo doméstico de passageiros no Brasil. Para tal, os autores utilizaram a metodologia de causalidade de Granger e os resultados encontrados evidenciaram que existe uma relação unidirecional do PIB para a variável quilômetro pago pelo passageiro doméstico.

Marazzo et al. (2010) estudaram o comportamento da demanda de passageiros da aviação civil e a sua relação de causalidade com o PIB no Brasil, obtendo resultados bastante similares aos de Fernandes e Pacheco (2010).

Button e Yuan (2013) examinaram o potencial do desempenho do setor de aviação civil sobre o desenvolvimento econômico nos EUA. Os autores analisaram as tendências de emprego e renda nas áreas metropolitanas com aeroportos nos quais é realizado o transporte aéreo de carga. Utilizando-se da metodologia da causalidade de Granger em um painel composto por dados de 35 aeroportos e 32 áreas metropolitanas, Button e Yuan

concluíram que o transporte aéreo é um direcionador positivo para o desenvolvimento econômico local.

Mehmood e Kiani (2013) analisaram a hipótese de que o crescimento da aviação precedia o crescimento econômico no Paquistão. Os autores testaram a causalidade de Granger entre essas variáveis e concluíram haver contribuição positiva da demanda de aviação para o crescimento econômico.

Mehmood e Shahid (2014) testaram a causalidade entre a aviação e o crescimento econômico na República Checa. Resultados empíricos encontrados pelos autores revelaram a existência de cointegração entre as séries de demanda de aviação e crescimento econômico. O teste de Granger foi aplicado para se conhecer a direção do relacionamento causal dessas séries, havendo contribuição positiva da demanda de aviação para o crescimento econômico.

Van De Vijver et al. (2014) analisaram o comércio e o tráfego de passageiros em algumas ligações na Ásia-Pacífico. Através da análise de causalidade de Granger, os autores concluíram, entre outros resultados, que na ligação da Coreia do Sul para as Filipinas o tráfego de passageiros é facilitado pelo comércio e que o oposto ocorre na ligação entre a Austrália e a Malásia.

Hu et al. (2015) examinaram o relacionamento causal de Granger entre o tráfego de passageiros doméstico e o PIB para 29 províncias na China. Para tanto, os autores utilizaram modelos heterogêneos de dados em painel. Os testes de causalidade de Granger indicaram que existe causalidade bidirecional entre o PIB e o movimento de passageiros. No entanto, no curto prazo os resultados sugerem causalidade apenas do tráfego de passageiros domésticos para o PIB.

Rodríguez-Brindis et al. (2015) analisaram os efeitos de longo prazo entre a demanda por transporte aéreo e o crescimento econômico no Chile. Os autores concluíram que existe uma relação de longo prazo entre o movimento de passageiros aeroportuários e o crescimento econômico, além de haver também causalidade de Granger bidirecional positiva entre essas variáveis, no Chile.

Baker et al. (2015) investigaram os impactos catalíticos do transporte aéreo no crescimento econômico regional na Austrália. A análise foi conduzida utilizando o

movimento de passageiros de 88 aeroportos. Os autores encontraram resultados que sugerem uma relação bidirecional entre o transporte aéreo regional e o crescimento econômico, indicando a necessidade de se investir nos aeroportos localizados nestas áreas como mecanismo para o seu desenvolvimento.

Pode-se observar que as pesquisas sobre a análise da causalidade do transporte aéreo com variáveis macroeconômicas, como o PIB e o comércio exterior, são ainda bastante reduzidas e orientadas para questões específicas, existindo várias linhas de pesquisa pouco exploradas. Os estudos revistos mostram que as relações de causalidade se comportam de forma diferente nas regiões abordadas. Os estudos mostram que é importante se conhecer o comportamento da movimentação de passageiros em regiões específicas para o desenvolvimento de políticas públicas de fato eficazes para o desenvolvimento do segmento. A revisão da literatura também indica que a abordagem de Granger se mostra adequada para investigar este fenômeno. A contribuição dessa tese e originalidade é analisar o mercado brasileiro, considerar passageiros embarcados e desembarcados, além da comparação entre movimento doméstico e internacional.

### 2.2 Efetividade energética da utilização de combustível

A queima de combustível está fortemente correlacionada com as emissões de poluentes, contribuindo diretamente para externalidades não desejadas no transporte aéreo (Dessens et al., 2014). Combustível é o principal item de custos das empresas aéreas (Doganis, 2009). A literatura voltada à análise das questões relacionadas ao consumo de querosene de aviação aborda, em geral, os seguintes pontos: a eficiência da empresa aérea e o seu potencial poluente; o esgotamento da disponibilidade do petróleo; a possibilidade de substituição do combustível fóssil atualmente utilizado por um outro renovável e menos ou não gerador de poluição; a possibilidade de meios de transportes alternativos; e algum tipo de tributação sobre o consumo de querosene de aviação com o intuito de estimular a sua substituição pela indústria da aviação.

Dessa forma, sem que pudesse ser feita uma revisão ostensiva da literatura dada a pluralidade de temas relacionados, foram selecionadas publicações consideradas relevantes para a definição da abordagem da segunda etapa desta tese.

Simões e Schaeffer (2005) analisaram a contribuição do transporte aéreo do Brasil nas emissões de gases de efeito estufa. O trabalho dos autores apresenta uma série de alternativas de mitigação, como: melhoria no gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo; introdução de taxa para cada voo; baseada no consumo de querosene de aviação da rota; e a introdução de alternativa intermodal na densa ligação aérea entre o Rio de Janeiro e São Paulo, com a implementação do trem de alta velocidade. Simões e Schaeffer estimam que as emissões de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) referentes ao transporte aéreo seriam, no longo prazo, reduzidas em 28.5% como resultado da implementação das recomendações propostas.

Chèze et al. (2011) realizaram projeções da demanda de combustível de aviação para oito regiões do mundo no horizonte 2008-2025. As previsões basearam-se em um modelo econométrico utilizando dados de painel dinâmico. De acordo com o cenário principal exercitado pelos autores, o tráfego aéreo no período deve aumentar em 100% em nível mundial, com taxa de crescimento de 4,7% ao ano. Com isso, o consumo de combustível crescerá em 38%, taxa de crescimento anual de 1,9%. Os autores sustentam que o crescimento do consumo antecipado por este cenário já levaria em conta todas as melhorias de eficiência realizadas em turbinas e na aerodinâmica das aeronaves. Ou seja: na opinião de Chèze et al., o progresso tecnológico continua sendo um item essencial para mitigar os impactos do aumento do tráfego aéreo no consumo de combustível. Visto que as melhorias introduzidas não têm se refletido na diminuição da taxa de consumo de combustível, os autores sustentam que será necessário que ocorra uma inovação disruptiva de nível industrial para provocar alguma mudança neste cenário mais provável.

O'Kelly (2012) examinou a eficiência dos hubs do ponto de vista ambiental usando a queima de combustível como um indicador de custo ambiental. Ele considerou o custo do combustível associado a aeronaves maiores para determinar as implicações dos altos fatores de carga em rotas densas e, assim, especificar as implicações para a localização do hub e do gateway. Ele mostrou que ao adicionar uma carga fixa ao modelar a queima de combustível, um modelo hub-and-spoke de alocação múltipla pode ser ajustado para direcionar o fluxo para o conector entre instalações.

Chang et al. (2014) examinaram a eficiência econômica e ambiental de 27 companhias aéreas globais, em 2010, utilizando “data envelopment analysis model” com a suposição de descartabilidade fraca. Eles concluíram que as empresas aéreas asiáticas são

geralmente mais eficientes, sendo que as companhias aéreas da Europa e da América do Norte são ineficientes em termos de desempenho operacional e ambiental. A ineficiência das companhias aéreas pode ser atribuída a dois fatores principais: ineficiência no consumo de combustível e estrutura de receita menos diversificada.

Park e O'Kelly (2014) estimaram o consumo de combustível considerando a distância entre diferentes mercados, uma dada composição de frota de aeronaves, assim como a configuração de assentos. Eles concluíram que o fator distância é crucial na estimação do consumo de combustível, sendo que no longo curso as menores taxas de consumo de combustível se encontram nas operações entre 1000 a 2500 milhas náuticas. Os autores sugerem que a queima de combustível por distância do assento pode ser considerada como um critério para impor às empresas aéreas alguma taxação relativa ao meio ambiente.

Zou et al. (2014) investigaram a eficiência energética do combustível entre 15 principais empresas aéreas e suas subsidiárias nos EUA. Os resultados encontrados pelos autores sugerem que o consumo de combustível é amplamente explicado e altamente correlacionado com a quantidade de receita de passageiros por milha (RPM) e com o número de decolagens. Ademais, Zou et al. concluem que, embora as empresas aéreas regionais tenham maior oferta para acessibilidade, elas têm maior consumo por RPM.

González e Hosoda (2016) analisaram o impacto crescente da aviação comercial do Japão nas emissões de CO<sub>2</sub> e o seu impacto potencial nas mudanças climáticas. A investigação abrangeu os efeitos da taxa de combustível de aviação adotada pelo governo japonês em todos os voos domésticos. Os autores utilizaram um modelo de séries temporais com observações mensais de consumo de combustível de aviação no período de 2004 a 2013. González e Hosoda concluem o trabalho estimando as quantidades de emissões de CO<sub>2</sub> que poderiam ser produzidas pela não aplicação da tributação.

Cui et al. (2016), utilizando “data envelopment analysis”, estudaram os impactos no desempenho das companhias aéreas decorrentes dos limites de emissões estabelecidos pela União Europeia. Eles usaram a receita total e as emissões de gases de efeito estufa como desejáveis outputs. Como inputs, utilizaram as variáveis número de empregados e consumo de querosene de aviação. A amostra foi composta de 18 aeronaves de grande porte, no período de 2008 a 2014, e resultou na indicação de quais as empresas aéreas que têm maior potencial para aumentar os outputs.

Cui e Li (2017), utilizando “data envelopment analysis”, mensuraram a eficiência dinâmica de 19 empresas aéreas, no período 2009 a 2014. As variáveis inputs selecionadas foram: número de funcionários e consumo de querosene de aviação. Como output, selecionou-se: receita tonelada quilômetros e receita total. O fator dinâmico selecionado foi o capital social. Eles concluíram que Scandinavian, Emirates and Cathay Pacific foram as empresas de referência da amostra.

Janic (2018) avaliou o potencial do combustível convencional tipo Jet A1/8, combustíveis sintéticos, derivados de biomassa SPK e o Hidrogênio líquido (LH2) como alternativas para a redução de emissões e diminuição do consumo no transporte aéreo para um horizonte até 2050. Considerando estimativas de várias instituições e empresas, o transporte aéreo comercial crescerá de forma regular a uma taxa média de 4,0% ao ano entre 2010 e 2030. A análise de um cenário base até 2050 permitiu ao autor constatar que o consumo mundial de combustível em voos internacionais e as emissões de CO<sub>2</sub> e gases relacionados crescerão por um fator de 6 vezes entre 2010 e 2050. Os resultados apresentados por Janic dão conta de que os combustíveis sintéticos (SPK) não diminuem consideravelmente as emissões cumulativas de CO<sub>2</sub> ao longo do tempo, embora haja a redução da dependência do setor em relação ao combustível não renovável. Já para o caso do LH2, haveria redução imediata de poluentes com a contrapartida de que seriam aeronaves totalmente diferentes. Elas seriam criogênicas e iniciariam operação a partir de 2040.

Zou e Chau (2019) estimaram os efeitos do preço do combustível nos volumes de frete para vários modos de transporte em Xangai. Os autores descobriram uma causalidade que vai do transporte ferroviário ao rodoviário, onde a alocação de mais tempo e rotas para o tráfego ferroviário de mercadorias e a redução dos impostos sobre o frete ferroviário podem aumentar o volume do transporte ferroviário de mercadorias e, assim, diminuir o uso geral de energia. Suas descobertas contribuem para a economia do transporte de mercadorias e se correlacionam com a intenção do presente estudo, que teve como objetivo mostrar que a utilização da capacidade ociosa pode trazer eficiência de combustível sem aumentar as emissões de gases.

Pode-se observar, a partir desta revisão da literatura, que a pesquisa sobre queima de combustível de aviação é direcionada para a questão ambiental e deixa de lado a discussão de benefícios financeiros para as companhias aéreas. Há uma tendência em abordar a

questão da queima de combustível em associação com a definição de empresa de referência e sua relação com o meio ambiente. Percebe-se um certo pessimismo quanto à possibilidade de reduzir significativamente a queima de combustível por meio de avanços tecnológicos de curto a médio prazo. No entanto, há o argumento da necessidade de inovação disruptiva para atingir novos níveis de eficiência.

A literatura revisada não ofereceu discussão sobre procedimentos operacionais que as companhias aéreas em geral podem introduzir em rotas para reduzir ou tornar mais eficiente a queima de combustível de aviação. É com esta motivação, e tendo-se em vista esta lacuna na literatura, que o presente estudo também examinou a produtividade parcial média da queima de combustível nas rotas aéreas, independentemente da companhia aérea, em termos de capacidade ociosa e outras características do mercado no transporte aéreo doméstico regular brasileiro. Esse conhecimento ajudará as companhias aéreas em seus procedimentos de planejamento e operação e auxiliará a formulação de políticas governamentais e medidas regulatórias para estimular o transporte aéreo, todos com a devida atenção às questões associadas à sustentabilidade ambiental.

### 3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Este capítulo apresenta de forma detalhada a abordagem quantitativa que sustenta o estudo de caso sobre a relação de causalidade entre transporte aéreo de passageiros e crescimento econômico no Brasil, bem como a investigação da eficiência do uso de combustível pela aviação civil no mercado doméstico brasileiro.

A metodologia proposta foi desenvolvida a partir do levantamento e da organização de um conjunto de publicações relacionadas ao tema, incluindo livros, artigos científicos, relatórios técnicos, reportagens e demais documentos. A partir do estudo deste material levantado, foram desenvolvidos os modelos estatísticos voltados ao processamento da pesquisa. Procedeu-se, em seguida, a construção de um banco de dados, abrangendo a tabulação de gráficos, tabelas, quadros e figuras com informações econômicas, demográficas, ambientais e específicas ao setor de aviação civil. Por fim, realizou-se o cálculo e desenvolvimento de índices e métricas, tanto para o fluxo de passageiros como para a produtividade de combustível.

Todo este desenho metodológico encontra-se especificado nos parágrafos que se seguem. Por meio dele torna-se possível identificar e explicar os principais elementos que influenciam o fluxo aéreo de passageiros, tanto o doméstico quanto o internacional, e que caracterizam a rede aeroportuária do Brasil, incluindo as características das ligações aéreas – frequência de voos, quantidade de decolagens, consumo de combustível em cada ligação etc. É com este desenho metodológico que o presente estudo se propõe a investigar a relação entre o transporte aéreo de passageiros e o desenvolvimento sustentável e territorialmente equilibrado da economia brasileira ao longo do tempo, conforme descrito no primeiro capítulo da presente tese.

A primeira fase do desenvolvimento do desenho metodológico deste estudo foi composto das seguintes sub etapas, a saber: levantamento dos dados disponíveis (preferência dada aos de domínio público e correlatos ao estudo); avaliação da periodicidade das informações levantadas, considerando-se a defasagem dos dados disponíveis (por exemplo, o PIB dos municípios divulgado pelo IBGE têm aproximadamente três anos de defasagem, ao passo que os dados de aviação são relativamente mais recentes) e o período para os quais há a disponibilidade dessas informações (por exemplo, a data em que foi

iniciada e realizada a pesquisa); e a identificação da disponibilidade e formato (ou extensão) para processamento e armazenamento desses dados e demais informações derivadas.

Em parte do estudo foram utilizados dados no formato de séries temporais, isto é, uma coleção de observações feitas sequencialmente ao longo do tempo. Já em outra parte foi necessário incluir as ligações aéreas no formato de uma cross section ao longo do tempo, passando-se a utilizar, para tal, um conjunto de dados em painel (ou dados longitudinais). Entende-se por dados em painel como sendo uma série de tempo para cada membro do corte transversal de um dado conjunto de dados.

Como a pesquisa foi dividida em duas fases, primeiramente será descrita a metodologia utilizada para analisar a existência de cointegração e a direção de causalidade entre o PIB e o fluxo aéreo doméstico e o internacional de passageiros em aeroportos no Brasil. Para tal, utilizou-se a análise de causalidade de séries temporais, denominada causalidade de Granger.

No segundo momento, o modelo proposto procura explicar a efetividade energética do combustível de aviação, ou seja, a relação entre produtividade de combustível e capacidade ociosa. Buscou-se explicar uma variável relacionada ao custo operacional da rota que está fortemente ligada ao consumo de combustível. Assim, a produtividade do combustível em uma rota específica em um determinado ano pode ser determinada pelas características operacionais da companhia aérea que atua em dada rota para dado ano específico. Por isso, escolheu-se o modelo dado em painel de efeito fixo com variável instrumental, muito embora vários outros modelos tenham sido testados, conforme descrito abaixo.

### *3.1 Causalidade de Granger Passageiros*

A metodologia desta fase da pesquisa segue os procedimentos usuais da análise de causalidade de séries temporais conhecidos como causalidade de Granger. Como observado por Soytaş and Sari (2003), os testes de causalidade de Granger se referem à causalidade observada no período da série estudada.

Assim, a metodologia apresentada a seguir busca fazer um teste robusto da causalidade das séries temporais apresentadas para o Brasil, utilizando as análises de estacionaridade, a cointegração e, por fim, a causalidade das séries explicativas no que diz respeito à variação da demanda de passageiros no Brasil.

A dinâmica do modelo estimado para a determinação de causalidade é observada pela decomposição da variância (VDC). O VDC fornece informações sobre o grau de influência relativa de cada incremento aleatório sobre as variáveis do modelo.

O primeiro passo da análise consiste em verificar a estacionaridade das séries. No caso de se confirmar a hipótese de não estacionaridade  $I(1)$ , é necessário fazer a transformação das séries para que seja possível seguir a análise. Uma primeira transformação efetuada é a do logaritmo natural (log) das séries. A seguir realiza-se o teste de Dickey-Fuller Aumentado (ADF) (Dickey and Fuller, 1979; Fuller, 1976; Said and Dickey, 1984) para analisar o número de diferenças que torna a série estacionária.

No entanto, duas ou mais séries não estacionárias podem ter uma combinação linear que seja estacionária. Desta forma, elas seriam cointegradas. Assim, um segundo passo consiste em testar a cointegração das séries, no sentido de se avaliar o seu relacionamento de longo prazo. Este passo é necessário para que seja possível definir o tipo de teste de causalidade de Granger que será aplicado. O teste de cointegração utiliza um modelo Vector Autoregressive (VAR) de ordem  $p$ , como na equação 1 (Johansen, 1991 e 1995).

$$y_t = A_1 y_{t-1} + \dots + A_p y_{t-p} + Bx_t + \epsilon_t \quad (1)$$

Onde  $y_t$  é um vetor- $k$  de variáveis não estacionárias  $I(1)$ ,  $x_t$  é um vetor- $d$  de variáveis determinísticas e  $\epsilon_t$  é um vetor de inovações. A metodologia de Johansen é extensamente utilizada e reescreve a equação 1 na forma da equação 2.

$$\Delta y_t = \Pi y_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta y_{t-i} + Bx_t + \epsilon_t \quad (2)$$

Onde,

$$\Pi = \sum_{i=1}^p A_i - I \quad \text{e} \quad \Gamma_i = - \sum_{j=i+1}^p A_j \quad (3)$$

A representação do teorema de Granger afirma que, se a matriz de coeficientes  $\Pi$  tem o rank  $r < k$ , então existem matrizes  $\alpha$  e  $\beta$   $k \times r$ , cada qual com rank  $r$  tal que  $\Pi = \alpha\beta'$ , e  $\beta' y_t$  é estacionário  $I(0)$  (Engle and Granger, 1987). O rank  $r$  é o número de relações de cointegração e cada coluna de  $\beta$  é o vetor de cointegração. O likelihood ratio testa a hipótese de que existem pelo menos  $r$  vetores de cointegração, sendo conhecido como teste estatístico trace.

Caso as séries sejam não cointegradas, a direção de causalidade pode ser decidida sobre o teste F padrão no VAR. Para tal, são estimadas equações bivariadas (equações 4 e 5) para todos os possíveis pares das séries  $(x,y)$  no grupo.

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 y_{t-1} + \dots + \alpha_l y_{t-l} + \beta_1 x_{t-1} + \dots + \beta_l x_{t-l} + \epsilon_t \quad (4)$$

$$x_t = \alpha_0 + \alpha_1 x_{t-1} + \dots + \alpha_l x_{t-l} + \beta_1 y_{t-1} + \dots + \beta_l y_{t-l} + u_t \quad (5)$$

Assim, o teste estatístico Wald F é usado para detectar se  $X$  Granger causa  $Y$  (Hassapis et al., 1999; Toda and Phillips, 1993 and 1994) para as hipóteses conjuntas (equação 6).

$$\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_l = 0 \quad (6)$$

De outra forma, o teorema da representação de Granger atesta que, se duas séries são cointegradas, o seu equilíbrio de longo prazo deve ser representado pelo Error Correction Model (ECM) (Engle and Granger, 1987; Granger, 1988). As equações 7 e 8 do ECM indicam as relações de curto e longo prazos entre as séries cointegradas.

$$\Delta Y_t = \lambda + \alpha_1 \Delta Y_{t-1} + \dots + \alpha_i \Delta Y_{t-i} + \beta_1 \Delta X_{t-1} + \dots + \beta_j \Delta X_{t-j} + \varphi z_{t-1} + \varepsilon_t \quad (7)$$

$$\Delta X_t = \lambda + \alpha_1 \Delta Y_{t-1} + \dots + \alpha_i \Delta Y_{t-i} + \beta_1 \Delta X_{t-1} + \dots + \beta_j \Delta X_{t-j} + \varphi z_{t-1} + \varepsilon_t \quad (8)$$

Onde  $\lambda$  é uma constante, ambos  $i$  e  $j$  são o número de lags grandes o suficiente para fazer o termo de distúrbio  $\varepsilon_t$  ser de ruído branco (white noise).  $z_{t-1}$  é a relação, descrita pela equação 9.

$$z_{t-1} = Y_{t-1} - \omega_0 - \omega_1 X_{t-1} \quad (9)$$

A inclusão de  $z_{t-1}$  no ECM atua como error-correction term. Os coeficientes  $\beta_j$ 's de  $\Delta X_{t-j}$  na equação 7 refletem a imediata resposta de  $Y$  em função de uma mudança em  $X$ . Da mesma forma, na equação 8 os  $\alpha_i$ 's de  $\Delta Y_{t-i}$  refletem a imediata resposta de  $X$  em função de uma mudança em  $Y$ . Estes coeficientes representam as elasticidades de curto prazo de suas variáveis no que diz respeito às respectivas variáveis dependentes.

No error-correction term, o vetor de cointegração  $z_{t-1}$ , representa o equilíbrio de longo prazo entre as variáveis. O coeficiente  $\omega_1$  de  $X_{t-1}$  é, assim, a elasticidade de longo prazo de  $Y$  com respeito a  $X$ , mas com sinal invertido. O coeficiente  $\varphi$  de  $z_{t-1}$  mede a velocidade de ajustamento do equilíbrio de curto prazo em relação ao equilíbrio de longo prazo. Os testes da estatística- $t$  dos coeficientes mostram se cada um é diferente de zero ou não.

No teste de causalidade de Granger é importante se ter em mente que a expressão “X Granger causa Y” não implica que Y seja um efeito ou resultado de X. A causalidade de Granger mede precedência, mas não indica, por si mesma, causalidade no senso comum da expressão. O argumento econômico é fundamental para a aceitação da causalidade em seu sentido comum.

### 3.2 Dados em painel para efetividade energética do combustível de aviação

Os dados socioeconômicos apresentam-se em uma variedade de formatos (Wooldridge 2010). Embora alguns métodos econométricos possam ser aplicados com pouca ou nenhuma modificação para muitos tipos diferentes de informações, as características especiais de alguns dados devem ser consideradas ou, ainda, deveriam ser exploradas.

Um conjunto de dados em cross section ou corte transversal consiste em uma amostra de indivíduos, consumidores, empresas, cidades, estados, países ou qualquer outra unidade, como, por exemplo, as linhas de ligações aéreas, tomada em um determinado ponto no tempo. Esses dados, do ponto de vista da pesquisa, podem ser tratados como as variáveis nas diversas linhas de ligações aéreas. No entanto, para a análise das séries ao longo dos anos faz-se necessário entender o comportamento no decorrer da linha do tempo (ano após ano).

A utilização de dados em painel, também chamados dados longitudinais, é uma estrutura recomendada quando existe dependência temporal das variáveis explicativas, que são definidos por apresentarem repetidas observações de um determinado conjunto de unidades em cross section. Isto é, as variáveis de interesse, preditora e explicativas, são medidas em diferentes ocasiões, geralmente ao longo do tempo, para um mesmo indivíduo ou elemento. No caso deste estudo, as linhas ligações aéreas.

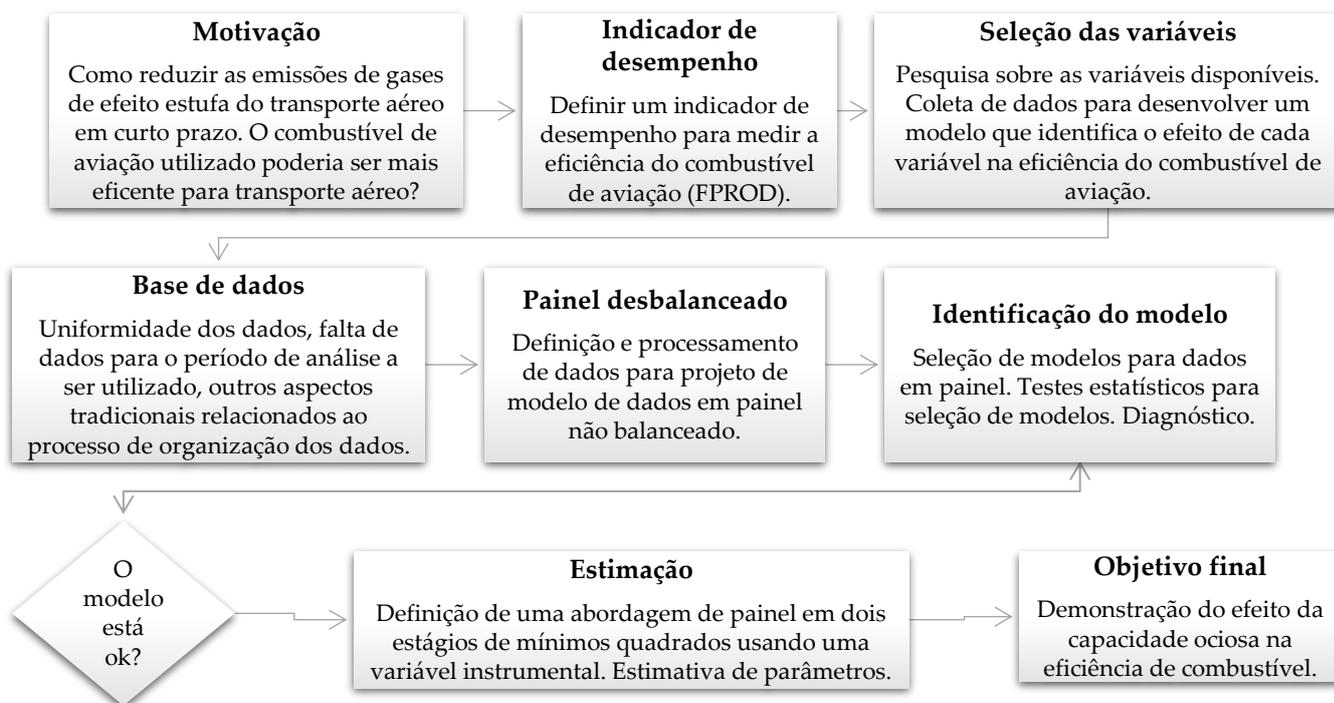
Em estudos longitudinais, as observações de um indivíduo ao longo do tempo são correlacionadas, tornando-se, assim, necessário o uso de técnicas estatísticas que considerem esta dependência (Twisk, 2013). Há diversos benefícios obtidos na utilização de dados longitudinais quando comparada ao uso de dados distribuídos puramente em cross section ou séries temporais. Estudar relações dinâmicas em função do tempo e modelar as diferenças entre os indivíduos são alguns deles (Frees, 2004). As abordagens da análise econométrica de dados em painel vêm evoluindo ao longo dos anos, ao longo

dos quais foram desenvolvidas diversas metodologias considerando as características dos dados observados (Hsiao, 2014).

A literatura recomenda a experimentação de abordagens alternativas para se selecionar a modelagem mais apropriada. Para este fim, foram desenvolvidos testes estatísticos que auxiliam no processo de seleção. No entanto, algumas sugestões de abordagens se baseiam, principalmente, na consideração de relaxamento de hipóteses de regressão em função da observação da estrutura dos dados, não se baseando, nestas situações, em um teste estatístico específico.

Nesta pesquisa foram consideradas e testadas várias abordagens e técnicas, mas somente para a modelagem selecionada serão apresentados os resultados numéricos obtidos. Abaixo está descrita a modelagem de dados em painel, especificando os modelos de efeito fixo e efeito aleatório, os testes para escolha do modelo e a metodologia analítica da capacidade ociosa.

Esta segunda etapa da pesquisa científica reunida na presente tese foi desenvolvida seguindo os passos mostrados na Figura 4. O primeiro passo estabelece a motivação para esta pesquisa, enquanto o segundo descreve os processos voltados a encontrar um indicador-chave de desempenho para medir a eficiência do combustível de aviação. Na terceira etapa, os dados que poderiam ser associados à eficiência do combustível para aviação foram coletados e processados, os dados disponíveis foram pesquisados e a necessidade de sua preparação foi verificada. O quarto passo foi a preparação eficaz dos dados. No quinto passo, o modelo de dados em painel desequilibrado foi analisado para entender quais fatores nos dados coletados poderiam influenciar a eficiência do combustível de aviação. O sexto, sétimo e oitavo passos envolveram a escolha da metodologia analítica adotada e seus resultados. Para o objetivo final, esta pesquisa demonstrou que uma redução na capacidade ociosa do transporte aéreo pode melhorar significativamente os resultados ambientais.



**Figura 4:** Etapas de desenvolvimento da Pesquisa

### 3.2.1 Modelos para dados em painel

#### 3.2.1.1 Modelo Geral

Existem várias abordagens para modelagem de dados em painel. Serão apresentados, a seguir, a classe de modelo geral, o modelo de efeito fixo e o de efeito aleatório.

Para o modelo geral, seja  $y_{it}$  a variável dependente para cada indivíduo  $i$  no período  $t$ . Na equação 10 encontra-se o modelo geral utilizado para dados em painel:

$$y_{it} = \beta_{0it} + \beta_{1it}x_{1it} + \beta_{2it}x_{2it} + \dots + \beta_{kit}x_{kit} + u_{it} \quad (10)$$

onde  $i$  representa o indivíduo e  $t$  o período de tempo,  $\beta_0$  é relacionado ao intercepto,  $\beta_j$  é o coeficiente angular da  $j$ -ésima variável explicativa para  $j = 1, \dots, k$  e  $u_{it}$  é o erro

idiossincrático, porque varia com o corte transversal (isto é, o indivíduo) e também com o tempo.

Observando-se a equação 10, é necessário que algumas especificações sobre o modelo geral sejam feitas, a saber: se o modelo se classifica para dados empilhados e se possuem efeitos fixos ou efeitos aleatórios. Para isso, um conjunto de testes estatísticos podem ser aplicados para avaliar o tipo de modelo que seria o mais adequado para tratar o problema a ser estudado.

### 3.2.1.2 Modelo Efeito Fixo

O modelo de efeito fixo considera os efeitos das variáveis que são omitidas do indivíduo e que se mantêm constantes ao longo do tempo (Johnston, 1988). Considera-se, então, que os regressores são correlacionados com os efeitos do nível do indivíduo. Assim, uma estimação consistente dos parâmetros requer que sejam eliminados ou controlados esses efeitos.

O modelo considera que o intercepto varia de um indivíduo para outro, porém mantém-se constante no decorrer do tempo. Logo, a relação da variável resposta com os regressores se mantém constante em todos os indivíduos e/ou em todos os tempos, ou seja, considera-se que o intercepto pode estar correlacionado com um ou mais regressores, mantendo-se a hipótese da homogeneidade das observações.

A escolha pelo modelo de efeitos fixos é mais indicada quando os dados são agregados, sejam por regiões, países ou grupos, e o objetivo não seja a previsão do comportamento individual. Segue o modelo de efeitos fixos:

$$y_{it} = \beta_{0i} + \beta_1 x_{1it} + \dots + \beta_k x_{kit} + u_{it} \quad (11)$$

onde  $\beta_{0i}$  são os interceptos que se deseja estimar para os indivíduos, podendo ser interpretado como o efeito das variáveis que são omitidas no modelo. Podemos observar que o modelo da equação 11 pressupõe que os coeficientes angulares dos regressores não variam entre indivíduos e ao longo do tempo.

Visando eliminar os efeitos fixos  $\beta_{0it}$  na equação 11, é feita uma transformação *within*, variação ao longo do tempo ou para um determinado indivíduo, através da diferenciação de médias.

$$y_{it} - \bar{y}_i = \beta(x_{it} - \bar{x}_i) + (\mu_i - \bar{\mu}_i) + (v_{it} - \bar{v}_i) \quad e \quad v_{it} = (\beta_{0i} + u_{it}) \quad (12)$$

Este método centraliza todos os dados utilizando uma diferenciação em torno da média, o que faz eliminar os efeitos  $\beta_{0it}$ . O estimador utilizado nesse método é o de MQO (Mínimos Quadrados Ordinários), que oferece estimativas consistentes de  $\beta_{it}$ , ainda que  $\beta_{0it}$  seja correlacionado com  $x_{it}$ . O coeficiente de um regressor com baixa variação *within* não terá um estimador preciso e, assim, não poderá ser identificado se não houver variação interna (Wooldridge, 2010). Portanto, o modelo de efeitos fixos é dado por:

$$y_{it} = \beta_1 x_{1it} + \dots + \beta_k x_{kit} + v_{it} \quad (13)$$

Assume-se para os modelos de efeitos fixos que os termos de perturbação são independentes das variáveis explicativas, não auto correlacionados e homocedásticos, conforme descrito a seguir:

- $E(u_{it} | y_{it-1}, x_{it}) = 0$  (14)
- $Var(u_{it} | y_{it-1}, x_{it}) = \sigma_u^2, \quad \forall i = 1, \dots, k \text{ e } j = 1, \dots, T$
- $Cov(u_{it}, e_{js} | y_{it-1}, x_{it}) = 0, i \neq j \text{ e } t \neq s$

### 3.2.1.3 Modelo de Efeitos Aleatórios

O modelo de efeito aleatório, diferente do efeito fixo, pressupõe que o intercepto é aleatório e não está correlacionado com as variáveis explicativas (Wooldridge, 2010). Iniciando-se o detalhamento com a equação 15, temos:

$$y_{it} = \beta_{0i} + \beta_1 x_{1it} + \dots + \beta_k x_{kit} + u_{it} \quad (15)$$

Neste modelo,  $\beta_{0i}$  não é tratado como fixo. Pressupõe-se que ele seja uma variável aleatória com valor médio de  $\beta_0$ . O intercepto pode ser expresso por:

$$\beta_{0i} = \beta_0 + e_i \quad (16)$$

onde  $e_i$  representa um termo de erro com média nula e variância  $\sigma_e^2$ . Isso representa que todos os indivíduos do conjunto de dados pertencem a um universo maior e possuem um valor médio comum para o intercepto,  $\beta_0$ . Porém, as características de cada indivíduo são refletidas no termo de erro  $e_i$ . Substituindo a equação 16 na equação 15, obtêm-se:

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 x_{1it} + \dots + \beta_k x_{kit} + w_{it} \quad e \quad w_{it} = u_{it} + e_i \quad (17)$$

em que  $w_{it}$  representa o termo de erro formado com as componentes  $i$ , pertencente ao  $i$ -ésimo indivíduo ou corte transversal, e  $u_{it}$  é o elemento de erro combinado da série temporal e corte transversal, também conhecido como erro idiossincrático.

Quando o termo de erro é composto por dois ou mais erros, estes recebem o nome de modelo de componentes dos erros (MCE). As hipóteses para este modelo são:

- $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$  (18)
- $u_{it} \sim N(0, \sigma_u^2)$
- $E(\varepsilon_i u_{it}) = 0; \quad E(\varepsilon_i \varepsilon_j) = 0 \quad (i \neq j)$
- $E(u_{it} u_{is}) = E(u_{ij} u_{ij}) = E(u_{it} u_{is}) = 0 \quad (i \neq j; t \neq s)$

Observa-se que os componentes de erro  $\varepsilon_i$  e  $u_{it}$  não são correlacionados entre si e, conseqüentemente,  $w_{it}$  não estará correlacionado com qualquer uma das variáveis incluídas no modelo. Caso contrário, o MCE irá resultar em uma estimativa inconsistente. Sendo assim:

- $E(w_{it}) = 0$  (19)
- $Var(w_{it}) = \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_u^2$
- $cov(w_{it}, w_{is}) = \sigma_u^2$

Vale ressaltar que, se  $\sigma_\varepsilon^2 = 0$ , não irá haver diferenças entre os modelos MQO e Efeitos Aleatórios. Isto ocorre porque, neste caso, não há efeitos específicos dos indivíduos ou, alternativamente, todos foram considerados nas variáveis explicativas. Outra observação é que o termo de erro  $w_{it}$  é homocedástico e que os erros dos mesmos indivíduos em tempos diferentes são correlacionados.

O método de estimação de MQO não é o mais apropriado para tal devido à correlação dos erros dos mesmos indivíduos em períodos de tempo diferentes. Dessa maneira, o método que mais se adequa é o de Mínimos Quadrados Generalizados (MQG). Utiliza-se esse modelo quando o foco principal são as variáveis constantes ao longo do tempo, ou quando se deseja inferir sobre a variabilidade entre casos e/ou uma baixa variabilidade intra casos.

#### 3.2.1.4 Homoceasticidade (Teste de Breusch-Pagan)

O primeiro teste para a escolha do modelo é o de Breusch-Pagan (1979). O teste tem por objetivo testar a homoceasticidade, ou seja, a variância constante dos erros. São assumidas as seguintes hipóteses:

$$H_0: \sigma_u^2 = 0 \quad (20)$$

$$H_1: \sigma_u^2 \neq 0$$

A estatística de teste é definida por:

$$LM = \frac{kT}{2(T-1)} \left[ \frac{\sum_{i=1}^k [\sum_{t=1}^T \hat{e}_{it}]^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{t=1}^T \hat{e}_{it}} - 1 \right]^2 \quad (21)$$

Sob a hipótese nula, a estatística de teste, LM (Multiplicador de Lagrange), segue distribuição qui-quadrado com um grau de liberdade e  $\hat{e}_{it}$  é o resíduo da regressão de MQO para dados empilhados. O parâmetro  $k$  representa o número de indivíduos e o parâmetro  $T$  o número de períodos de tempo. A hipótese nula assume que as variâncias dos erros são iguais (homoscedasticidade), enquanto a hipótese alternativa assume que as variâncias dos erros são uma função multiplicativa de uma ou mais variáveis. Esse teste é indicado para grandes amostras e quando a suposição de normalidade nos erros é assumida. Em outras palavras, este teste é útil quando se deseja fazer a escolha entre os modelos para dados empilhados e o modelo de efeitos aleatórios.

#### 3.2.1.5 Efeitos Aleatórios Correlacionados (Teste de Hausman)

Para a escolha entre os modelos de efeitos fixos e o de efeitos aleatórios, o principal determinante, segundo Wooldridge (2010), é o efeito não observado  $\beta_{0i}$ . O teste indicado

para tal decisão é o de Hausman (1978), esse deve ser o último teste a ser realizado. Para a realização do teste, assume-se que:

$$H_0: \widehat{\beta}_{0i} - \widehat{\beta}_0 = 0 \quad (22)$$

$$H_1: \widehat{\beta}_{0i} - \widehat{\beta}_0 \neq 0$$

A estatística de teste é definida por:

$$H = [\widehat{\beta}_{0i} - \widehat{\beta}_0]' [Var(\widehat{\beta}_{0i}) - Var(\widehat{\beta}_0)]^{-1} [\widehat{\beta}_{0i} - \widehat{\beta}_0] \quad (23)$$

A hipótese nula é que os estimadores do modelo de efeito fixo,  $\widehat{\beta}_{0i}$ , e os do modelo de efeitos aleatórios,  $\widehat{\beta}_0$ , não diferem substancialmente. Isto confere a validade do modelo de efeitos aleatórios. Quando se rejeita a hipótese de igualdade das estimativas, conclui-se que o MCE não é adequado, ou seja, possivelmente os efeitos aleatórios estão correlacionados com um ou mais regressores. Sendo assim, o modelo preferível é o de efeitos fixos.

### 3.2.1.6 Razão de Verossimilhança (Teste de Chow)

Para a escolha entre o modelo de dados empilhados e o modelo de efeitos fixos, o teste mais apropriado é o de Chow (1960), primeiramente realiza-se esse teste, antes do teste de Hausman. Este teste verifica a igualdade dos interceptos e inclinações, ou seja, examina se os parâmetros de um grupo de dados são iguais aos de outros grupos. Em resumo, o teste verifica se os dados podem ser agrupados. Considerando-se os grupos, o intervalo da amostra é dividido em duas partes e, em seguida, estima-se novamente os parâmetros em cada subamostra. Considere as seguintes equações:

$$y_{it} = \beta_0 + \beta x + u \quad (24)$$

$$y_{it} = \beta_{01} + \beta_1 x + u_1 \quad (25)$$

$$y_{it} = \beta_{02} + \beta_2 x + u_2 \quad (26)$$

A equação 24 possui todas as  $k$  observações, a equação 25 possui  $n_1$  observações e a equação 26 possui  $n_2$  observações. O Teste de Chow assume as seguintes hipóteses:

$$H_0: \beta_{01} = \beta_{02} \text{ e } \beta_1 = \beta_2 \quad (27)$$

$$H_1: \beta_{01} \neq \beta_{02} \text{ e } \beta_1 = \beta_2$$

A estatística de teste é definida por:

$$F = \frac{\frac{\sum_{i=1}^k [\sum_{t=1}^T u_{it}]^2 - \left( \sum_{i=1}^{n_1} [\sum_{t=1}^T u_{1it}]^2 - \sum_{i=1}^{n_2} [\sum_{t=1}^T u_{2it}]^2 \right)}{k}}{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} [\sum_{t=1}^T u_{1it}]^2 - \sum_{i=1}^{n_2} [\sum_{t=1}^T u_{2it}]^2}{n_1 + n_2 - 2k}} \quad (28)$$

Onde  $\sum_{i=1}^k [\sum_{t=1}^T u_{it}]^2$  é a soma dos quadrados dos resíduos do modelo para dados empilhados. Se os resíduos forem independentes e normalmente distribuídos, sob a hipótese de estabilidade, verificar-se à distribuição F, e se apenas os interceptos forem diferentes, este é um modelo de efeito fixo. Em outras palavras, quando a hipótese nula é rejeitada, supõe-se que o modelo mais apropriado é o de efeitos fixos.

### 3.2.2 Metodologia analítica da capacidade ociosa

O modelo analítico proposto neste trabalho busca explicar a relação entre a produtividade parcial do combustível e a capacidade ociosa. Como a pesquisa concentra-se na eficiência

média do transporte aéreo, por rota e por ano, não é feita distinção entre as companhias aéreas. Nessa direção, aspectos relacionados ao ambiente competitivo nas rotas, isto é, a concorrência entre as companhias aéreas em cada uma delas, não são abordados. É importante ressaltar que o modelo abordado neste estudo pretende explicar a variável relacionada ao custo operacional da rota que está fortemente ligada ao consumo de combustível. Assume-se, portanto, que a produtividade do combustível em uma rota específica em um determinado ano pode ser determinada pelas características operacionais da companhia aérea que opera aquela rota naquele ano específico.

Há uma expectativa de que, com o passar dos anos, possamos observar uma melhora no desempenho das companhias aéreas no que se refere ao uso de combustível, seja pelo aprimoramento dos procedimentos operacionais, como a definição de rotas mais diretas, seja pelo contínuo aprimoramento tecnológico do setor industrial, como a utilização de aviões mais eficientes.

Nesse sentido, a hipótese de um efeito anual fixo ou aleatório foi testada na escolha do modelo. Outro aspecto importante é a característica de cada rota que não pode ser explicada apenas pela distância entre dois aeroportos. Mostra-se necessário, portanto, considerar um efeito para cada rota, que deve ser fixo ou aleatório, de acordo com os testes estatísticos realizados.

Dessa maneira, a fim de confirmar o tipo de modelo adequado, são realizados os seguintes testes: Efeitos Fixos Redundantes ou Teste de Chow (Razão de Verossimilhança), Efeitos Aleatórios Omitidos (Multiplicador de Lagrange) e Efeitos Aleatórios Correlacionados (Teste de Hausman). Uma vez definida a abordagem de dados em painel, é necessário considerar a possibilidade de endogeneidade do modelo, que pode conduzir a uma abordagem de Painel Mínimos Quadrados em Dois Estágios, utilizando-se para tal uma variável instrumental. Posto isso, o modelo incluirá: uma variável que representa o nível de utilização dos aviões (capacidade); uma variável operacional que define as companhias aéreas da rota e uma variável instrumental que pode mitigar problemas de endogenia no modelo.

A variável dependente será a tonelada-km transportada por litro de combustível. A variável vinculada ao nível de uso será a capacidade ociosa, que é determinada pela capacidade total do avião menos o fator de carga médio anual. A decisão operacional das

companhias aéreas sobre a operação da rota será representada pela carga útil média anual oferecida nesta rota específica. A variável instrumental dos modelos será a frequência média semanal de voos em uma rota específica por ano.

Os efeitos próprios de cada rota e de cada período serão definidos de acordo com os resultados sugeridos pelos testes estatísticos realizados (efeitos fixos ou aleatórios). No período considerado, observa-se um padrão uniforme de utilização da frota nas rotas consideradas. Uma vez realizada a análise para cada rota, por ano, as especificações e características técnicas dos aviões não foram incluídas na formulação dos modelos.

Todas as variáveis refletem a média anual em cada rota (da cidade  $i$  para cidade  $j$ ) para cada ano. O modelo correspondente usado para estimar os parâmetros de regressão é descrito pela equação 29.

$$\ln FPROD_{i,j,t} = \omega_{i,j} + \eta_t + \alpha \ln \overline{IC}_{i,j,t} + \beta \ln ASIZE_{i,j,t} + \varepsilon_{i,j,t} \quad (29)$$

Onde:

$\ln$  : logaritmo natural das variáveis;

$\omega_{i,j}$  : efeito fixo das cross-section estimados;

$\eta_t$  : efeito fixo do período estimado;

$\alpha$  e  $\beta$  : coeficientes da regressão do modelo estimado;

$FPROD_{i,j,t}$  : produtividade média do combustível da rota  $i$  para  $j$  no ano  $t$  ;

$ASIZE_{i,j,t}$  : tamanho médio da aeronave da rota  $i$  para  $j$  no ano  $t$  ;

$\overline{IC}_{i,j,t}$  : capacidade ociosa média da rota  $i$  para  $j$  no ano  $t$  ; e

$\varepsilon_{i,j,t}$  : erro da regressão.

A variável instrumental  $WF_{i,j,t}$ , que é frequência média anual na rota  $i$  a  $j$  no ano  $t$ , tem por característica não ser uma variável relacionada ao consumo de combustível, e sim ao nível de frequência da rota, por isso a característica exógena da variável e está a representada na equação 30:

$$\ln \overline{IC}_{i,j,t} = c + a \ln ASIZE_{i,j,t} + b \ln WF_{i,j,t} + u_{i,j,t} \quad (30)$$

Onde:

$WF_{i,j,t}$ : frequência média anual na rota  $i$  to  $j$  no ano  $t$ ;

$u_{i,j,t}$ : erro da regressão.

$c, a$  e  $b$ : coeficientes da regressão do modelo estimado;

### 3.3 Banco de dados

Para o desenvolvimento da pesquisa foi necessário o desenvolver de dois bancos de dados distintos, um com informações contendo variáveis socioeconômicas e o total de passageiros embarcados e desembarcados nos mercados doméstico e internacional, por ano. Variáveis estas organizadas no formato de séries temporais. O segundo conjunto de dados foi estruturado em formato de dados em painel não balanceado contendo as ligações aéreas domésticas no Brasil e informações socioeconômicas, em cada ano e para cada cidade de origem e destino. Tais informações anuais foram organizadas em uma base de dados, cujo desbalanceamento se deve a uma variação da malha aérea brasileira nos períodos observados. Contudo, também há casos em que uma das variáveis utilizadas na modelagem não está presente na base de dados. O software utilizado para a montagem do banco de dados e da modelagem foi o Eviews.

#### 3.3.1 Dados do movimento de passageiros e crescimento econômico

O primeiro banco de dados é formado pelo PIB (GDP), pelo total de passageiros domésticos embarcados e desembarcados (PAXDOM) no período de 2000 a 2015 e pelo total de passageiros internacionais embarcados e desembarcados (PAXINT) no período de 1995 a 2015. A diferença dos períodos entre passageiros domésticos e internacionais se por causa da divulgação as informações pela ANAC. O PIB (GDP) do Brasil é apurado e divulgado pelo IBGE, enquanto as séries de passageiros domésticos e internacionais foram obtidas junto à Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). O GDP está na unidade milhões de reais a preços constantes de 2013. Os passageiros transportados domésticos e internacionais estão expressos em milhões. O estudo foi realizado utilizando o logaritmo natural das séries históricas. Assim, as variáveis serão representadas por:  $\log paxdom$  como logaritmo natural de PAXDOM;  $\log paxint$  como logaritmo natural de PAXINT; e  $\log gdp$  como logaritmo natural de GDP.

### 3.3.2 Dados da metodologia analítica de capacidade ociosa

Para o estudo de efetividade de combustível, a escolha dos dados e variáveis foi baseada no objetivo da pesquisa e na disponibilidade de informações. No Brasil, não há informações de séries temporais de longo prazo sobre ligações aéreas. Outro elemento limitador é que os dados de combustível de aviação estão disponíveis apenas para empresas aéreas domésticas. A escolha das variáveis foi, portanto, resultado de uma varredura que abrangeu outros setores econômicos (Schnell, 2005) para a obtenção de informações relacionadas às atividades operacionais das empresas.

A variável PIB real dos municípios foi construída a partir de dados nominais provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), trazidos a valor presente pela aplicação do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA). Em decorrência da defasagem de dois anos entre os períodos de referência e de publicação destes dados, a última informação disponível pelo IBGE até a consecução desta tese se refere ao PIB municipal de 2016.

Quanto aos dados referentes ao setor aéreo, eles provêm da Base de Dados Estatísticos do Transporte Aéreo, disponibilizada pela Agência de Aviação Civil (ANAC) divulgados periodicamente. As informações utilizadas foram obtidas mediante a manipulação desta base de dados, procedimento este no qual os dados contemplados na amostra foram acumulados de forma anual até as informações do fechamento de 2016. Trata-se de um banco de dados amplo, cujas extensão e diversidade permitem diversos experimentos em estudos empíricos de transporte aéreo.

Uma análise das variáveis explicativas foi feita para compreender quais poderiam fazer parte do modelo. Abaixo o detalhamento das variáveis analisadas:

- a) Setor aéreo:
  - Ano: período de 2007 a 2016;
  - Cidade de origem: representa o município de onde parte o avião;
  - Cidade de destino: representa o município para onde o avião se destina;
  - Carga paga (Kg): variável resposta, objeto deste trabalho, representa a quantidade total, expressa em quilogramas, de todos os bens que tenham sido transportados

na aeronave, exceto correio e bagagem, que geraram receitas direta ou indireta para a empresa aérea;

- Carga grátis (Kg): quantidade total, em quilogramas, de todos os bens que tenham sido transportados na aeronave, exceto correio e bagagem, e que não geraram receitas direta ou indireta para a empresa aérea;
- Correio (Kg): quantidade de objetos transportados de rede postal em cada trecho de voo realizado, expresso em quilogramas;
- ASK (*Available seat kilometer*): volume de Assentos Quilômetros Oferecidos, ou seja, a soma do produto entre o número de assentos oferecido e a distância das etapas;
- RPK (*Revenue seat kilometer*): volume de Passageiros Quilômetros Transportados, ou seja, a soma do produto entre o número de passageiros pagos e a distâncias das etapas;
- ATK (*Available tonne kilometer*): volume de Tonelada Quilômetro Oferecida, ou seja, a soma do produto entre o *payload*, que é a capacidade total de peso disponível na aeronave, expressa em quilogramas, disponível para efetuar o transporte de passageiros, carga e correio, e a distância das etapas, dividido por 1000;
- RTK (*Revenue tonne kilometer*): volume de Toneladas Quilômetros Transportadas, ou seja, a soma do produto entre os quilogramas carregados pagos, onde cada passageiro possui o peso médio estimado de 75 Kg, e a distância das etapas, dividido por 1000;
- Horas voadas: número de horas de voo entre os aeródromos de origem e destino da etapa;
- Decolagens: número de decolagens que ocorreram entre os aeródromos de origem e destino da etapa;
- Assentos: é o número de assentos disponíveis em cada etapa de voo de acordo com a configuração da aeronave na execução da etapa;
- *Payload* (Kg) (*Payload capacity*): é a capacidade total de peso na aeronave, expressa em quilogramas, disponível para efetuar o transporte de passageiros, carga e correio;
- Combustível em litros;

- *Yield*: indicador que representa o valor médio pago pelo passageiro por quilômetro voado.
- b) Características demográficas:
- População de origem: população anual do município do qual o avião parte;
  - População de destino: população anual do município para o qual se destina o avião;
  - Distância voada: distância, expressa em quilômetros, entre os aeródromos de origem e destino da etapa, considerando a curvatura do planeta;
- c) Características econômicas:
- PIB (Produto Interno Bruto) Municipal é a soma de toda a renda gerada pela economia de um dado município em um dado período, construída a partir de dados provenientes do IBGE, a preços correntes de 2013. A última informação disponível pelo IBGE para o PIB municipal durante a consecução desta tese refere-se ao ano de 2016.

Este conjunto de informações foi estruturado sob a forma de dados em painel não balanceado para rotas aéreas domésticas no Brasil de 2007 a 2016. Embora o banco de dados contivesse informações desde 2000, o ano de 2007 foi escolhido para que a análise considerasse os anos em que estão presentes as quatro companhias aéreas que operam no mercado doméstico brasileiro, cujas rotas totalizam 90% de participação de mercado (ver Tabela 2). De 2000 a 2006, o Brasil passou por um processo de consolidação e falência de companhias aéreas brasileiras, o que tornou o mercado instável em suas condições operacionais. A partir de 2007, duas companhias aéreas, TAM e GOL, dominaram o mercado aéreo doméstico brasileiro. Também naquele ano, a linha aérea AVIANCA, que entrou no mercado brasileiro em 2003, passou a ter uma participação significativa. Por fim, em 2008 a companhia AZUL entrou no mercado, aumentando rapidamente a sua participação. Em 2016, essas quatro empresas representavam 99% do market share das rotas comerciais domésticas.

A evolução da participação na receita passageiro-quilômetro (RPKs) no total do Brasil é mostrada na Tabela 2. Como a estrutura do transporte aéreo doméstico brasileiro é praticamente a mesma em 2020, e não houve alterações substanciais na frota de aeronaves, acreditamos que os resultados da pesquisa ainda são válidos.

**Tabela 2.** A porcentagem das 4 principais companhias aéreas no RPK doméstico total do Brasil.

<b>ANO</b>	<b>TAM</b>	<b>GOL</b>	<b>AZUL</b>	<b>AVIANCA</b>	<b>TOTAL</b>
2000	14%	0%			14%
2001	30%	5%			35%
2002	34%	11%			45%
2003	32%	19%		0%	51%
2004	35%	21%		0%	56%
2005	42%	26%		0%	68%
2006	48%	34%		1%	84%
2007	48%	40%		2%	90%
2008	50%	37%	0%	3%	90%
2009	45%	41%	4%	3%	92%
2010	43%	40%	6%	3%	91%
2011	40%	37%	9%	3%	89%
2012	40%	34%	10%	5%	90%
2013	40%	35%	13%	7%	95%
2014	38%	36%	17%	8%	99%
2015	37%	36%	17%	9%	99%
2016	35%	36%	17%	11%	99%

Uma vez que exista uma relação entre a quantidade de combustível que um avião precisa no momento da decolagem, o peso total do avião, o peso embarcado e o aeroporto de destino, uma abordagem para medir a produtividade parcial dos combustíveis consiste no peso transportado por unidade de combustível. Essa relação revela o desempenho médio específico do uso de combustível, que é um insumo importante para as companhias aéreas.

Dessa maneira, neste estudo adotou-se a unidade de carga de trabalho (WLU) como indicador do peso a ser transportado. O combustível é o item mais relevante no aumento dos custos operacionais das companhias aéreas no Brasil. Estimativas indicam que 40% dos custos operacionais totais são decorrentes do consumo de combustível.

A eficiência do combustível foi escolhida como variável dependente por apresentar características importantes tanto para o desempenho da companhia aérea quanto para o monitoramento do uso deste recurso e respectivos impactos ambientais. As companhias aéreas reduzem seus custos operacionais aumentando a produtividade deste importante item em suas planilhas de custos.

Enquanto isso, a sociedade se beneficia de uma atividade fundamental para o desenvolvimento econômico e social por meio do uso eficiente do combustível que o move, para o qual ainda não há alternativa, mas que resulta em impactos ambientais adversos. Outro aspecto não menos importante é que a produtividade do combustível é fundamental para o desenvolvimento econômico e social, e nenhuma medida deve negligenciar essa variável por se tratar de um item importante no processo de tomada de decisão tanto em termos de política de transporte aéreo quanto de planejamento de operações no ramo da aviação civil.

A variável de produtividade de combustível é expressa pela equação 31:

$$FPROD_{i,j,t} = \frac{RTK_{i,j,t}}{FUEL_{i,j,t}}, \quad (11)$$

onde,

$RTK_{i,j,t}$ : receita total em tonelada-quilômetro na rota  $i$  para  $j$  no ano  $t$ ;

$FUEL_{i,j,t}$ : queima total de combustível na rota  $i$  para  $j$  no ano  $t$  (litro).

Uma receita tonelada-quilômetro ( $RTK$ ) é gerada quando uma tonelada métrica de carga de receita é transportada por um quilômetro. Quando essa carga inclui uma carga de passageiros, o número de passageiros é convertido em uma carga de peso, geralmente multiplicando esse número por 90 kg (para incluir a bagagem). Esta informação é baseada em Doganis (1992), que relata que a maioria das companhias aéreas usa 90 kg para expressar um passageiro e bagagem. Assim, 11,111 passageiros equivalem a 1 tonelada (tonne).

A variável independente do modelo, a capacidade ociosa ( $1 - LF_{i,j,t}$ ), representa o percentual da capacidade ofertada não utilizada pelo mercado. A variável do fator de carga ( $LF_{i,j,t}$ ) é estimada como a razão entre  $RTK$  e  $ATK$ . A tonelada-quilômetro disponível ( $ATK$ ) é o volume em tonelada-quilômetro ofertada, ou seja, a soma do produto da carga útil (peso total da carga disponível por aeronave disponível para transporte de passageiros, carga e correio) e a distância do percurso. Um alto fator de carga significa que o voo está sendo mais plenamente utilizado e, portanto, espera-se que a produtividade da queima de combustível seja maior. Este é um dos principais

indicadores de desempenho do transporte aéreo e estará significativamente relacionado à produtividade parcial do combustível. A variável  $LF_{i,j,t}$  é expressa usando a equação 32:

$$LF_{i,j,t} = \frac{RTK_{i,j,t}}{ATK_{i,j,t}}, \quad (32)$$

onde,

$RTK_{i,j,t}$ : receita total em tonelada-quilômetro na rota  $i$  para  $j$  no ano  $t$ ;

$ATK_{i,j,t}$ : total de toneladas-quilômetros disponíveis (fornecido) na rota  $i$  para  $j$  no ano  $t$ .

A variável de tamanho da aeronave ( $ASIZE_{i,j,t}$ ) é representada usando-se a carga útil média fornecida na rota em um determinado ano. A variável  $ASIZE_{i,j,t}$  (em kg) é expressa conforme a equação 33 abaixo:

$$ASIZE_{i,j,t} = \frac{PAYLOAD_{i,j,t}}{TAKEOFFS_{i,j,t}}, \quad (33)$$

onde,

$PAYLOAD_{i,j,t}$ : carga útil total fornecida na rota  $i$  para  $j$  no ano  $t$  (kg);

$TAKEOFFS_{i,j,t}$ : total de decolagens na rota  $i$  to  $j$  no ano  $t$ .

Esta é uma variável decisiva por meio da qual a companhia aérea determina quanta capacidade de transporte oferecer no mercado. Embora possam existir casos de excesso de oferta por motivos de concorrência, tais casos são distribuídos por todas as operações da rota no ano, reduzindo o viés que tais casos podem causar na avaliação da variável. Como o estudo trabalhou com um grande volume de dados, é de se esperar que tais distorções sejam minimizadas.

Como o modelo apresentado sugere a possibilidade de endogeneidade, foi necessário incluir uma variável de decisão relacionada às companhias aéreas para mitigar esse problema. Para resolver o problema de endogeneidade, fez-se uma estimativa de modelo de dados em painel de mínimos quadrados em dois estágios. A variável escolhida foi a frequência média semanal de decolagens observada em um ano específico para aquela rota, por ter características exógenas ao problema estudado, que é a performance do combustível, além de ser uma escolha da companhia, a frequência que será ofertada, sendo essa uma boa característica para escolha da variável instrumental. Esta variável é definida de acordo com a equação 34:

$$WF_{i,j,t} = \frac{TAKEOFFS_{i,j,t}}{52}, \quad (34)$$

onde,

$WF_{i,j,t}$ : frequência média semanal na rota  $i$  para  $j$  no ano  $t$ .

## 4. ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é apresentado o estudo de caso da pesquisa, que é composto por duas seções. A primeira reúne a análise de cointegração e causalidade de Granger entre transporte aéreo de passageiros e desenvolvimento econômico no Brasil. Nesta seção discute-se a relação entre o PIB e o fluxo de passageiros nos mercados doméstico e internacional, conforme detalhado no capítulo anterior. Já a segunda seção do capítulo aborda a questão da eficiência do combustível de aviação no transporte aéreo regular brasileiro. Antes, no entanto, será apresentada uma visão geral do setor de aviação civil no Brasil, caso de estudo da presente tese.

### *4.1 Visão panorâmica do setor de aviação civil no Brasil*

O Brasil é o quinto maior país do mundo em extensão territorial e em termos populacionais. O país organiza-se como uma República composta por 26 Unidades da Federação (estados) e um Distrito Federal (capital do país). Cada estado brasileiro possui um município onde está instalada a sua capital estadual. O Brasil abriga 5.570 municípios, dos quais mais de 300 reúnem populações de mais de 100 mil habitantes<sup>2</sup>. O mercado interno vasto e plural constitui uma das principais potencialidades de um país dotado de dimensões continentais, propiciando que a economia brasileira figure entre as maiores economias mundiais<sup>3</sup>.

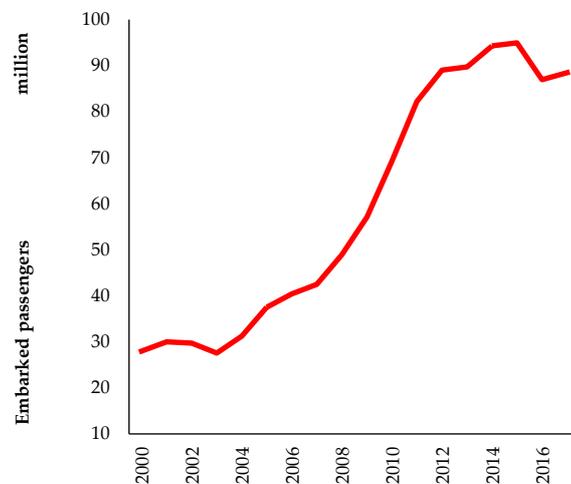
No tocante à infraestrutura de transportes, fator estratégico para a integração nacional e internacional de um país que reúne estas características, observa-se que o transporte ferroviário de passageiros é praticamente inexistente. A rede de transporte rodoviário, por sua vez, é fraca em grande parte do Brasil, particularmente nas regiões Centro-Oeste e Norte, e em grande parte do Nordeste. Estas condições tornam o modal aéreo atrativo para o traslado de pessoas e mercadorias dentro do país e para o resto do mundo, reforçando o seu papel estratégico para o desenvolvimento nacional e a integração com a economia global.

---

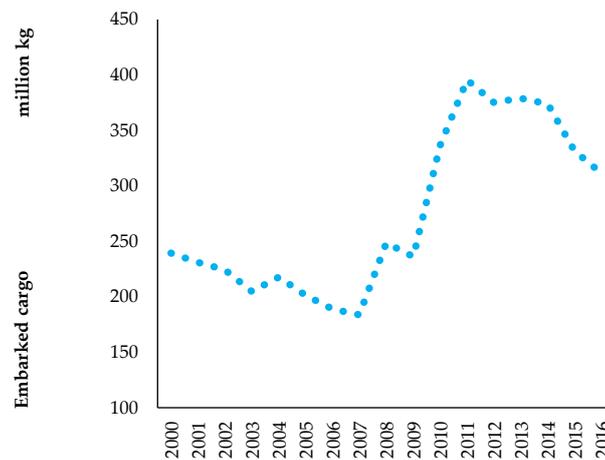
<sup>2</sup> IBGE, 2016

<sup>3</sup> A economia brasileira ocupava a sétima posição no ranking mundial em 2015, com um Produto Interno Bruto (PIB) de cerca de 3,192 trilhões de dólares (PPP \$ - Dólar internacional). No entanto, também em 2015, com um PIB per capita de cerca de 15.600 dólares, o Brasil ficou apenas em 76º lugar neste ranking, longe do grupo classificado como países desenvolvidos.

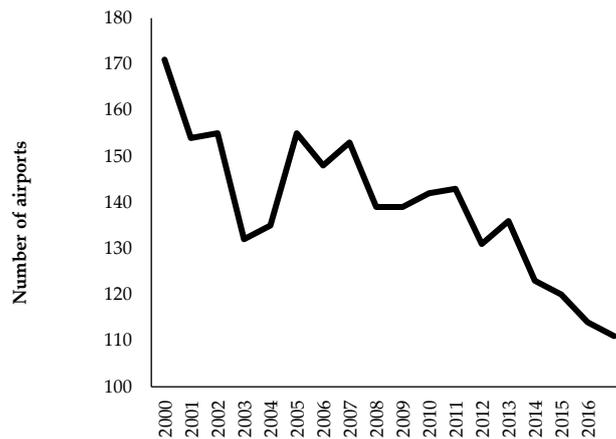
A Figura 5 (a–c) ilustra, respectivamente, o número de passageiros embarcados no segmento doméstico, a quantidade de carga embarcada nos aeroportos brasileiros e o número de cidades atendidas pelo transporte aéreo doméstico regular. O transporte aéreo doméstico representa 90% dos passageiros embarcados nos aeroportos brasileiros, que totalizaram pouco mais de 85 milhões de passageiros em 2016. É importante ressaltar que, de 2015 a 2016, o número diminuiu em decorrência da grave crise política e financeira que afetou o Brasil. A carga doméstica transportada cresceu entre 2007 e 2011, mas posteriormente diminuiu de maneira constante. O número de aeroportos que oferecem serviços regulares de transporte aéreo doméstico diminuiu ao longo dos anos, indicando que o tráfego está sendo direcionado para rotas de maior densidade, nas quais é mais fácil otimizar as operações.



(a)



(b)



( c )

**Figura 5.** (a) Número de passageiros domésticos embarcados em milhões de passageiros, (b) Carga doméstica embarcada em milhões (kg) e (c) número de aeroportos. Fonte: Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC).

A Tabela 3 apresenta a frota de aeronaves de passageiros das companhias aéreas brasileiras três anos específicos, 2000, 2007 e 2016. Observa-se uma redução do número de aeronaves de menor porte e, conseqüentemente, com menos assentos, paralelamente a um incremento do número de aeronaves maiores e com mais assentos. Trata-se de uma tendência significativa para o transporte aéreo regular brasileiro.

Os dois primeiros níveis da Tabela 3 apresentam mudanças significativas ao longo dos anos e estão ligados a uma importante redução das rotas regionais no período. Pode-se observar que, no caso das rotas regionais, há uma tendência de padronização de aviões na faixa de 51 a 150 assentos. Nos três níveis intermediários, registra-se uma diminuição do número de aviões devido à busca por otimização no tráfego doméstico relacionado às rotas principais regulares e não regulares. Os dois níveis mais baixos de aviões estão relacionados a rotas internacionais de longo curso, que não são abordadas neste estudo.

O movimento é consistente com os esforços das companhias aéreas para otimizar suas operações. De fato, as empresas aéreas passam por dificuldades financeiras e não obtiveram saldos positivos em suas demonstrações financeiras nos últimos anos. Essa tendência reduz a flexibilidade disponível para as companhias aéreas compatibilizarem

oferta e demanda, particularmente para as rotas de aviação regionais onde a demanda é mais volátil.

**Tabela 3.** Frota de aeronaves de companhias aéreas brasileiras em 2000, 2007 e 2016.

<b>Assentos</b>	<b>2000</b>	<b>2007</b>	<b>2016</b>
Até 50	141	122	6
51–100	-	36	52
101–150	212	182	139
151-200	13	226	211
201-250	13	50	48
251–300	13	14	5
Mais de 300	-	-	16
<b>Total</b>	<b>392</b>	<b>630</b>	<b>498</b>

Fonte: ANAC.

#### 4.2 Cointegração e causalidade de Granger entre transporte aéreo e desenvolvimento econômico no Brasil

Como mencionado anteriormente, o Brasil se constitui como um dos maiores mercados nacionais de transporte aéreo de passageiros no mundo, com previsão de ser o quarto maior em 2029, posicionando-se atrás apenas de EUA, China e Índia. Contudo, no tocante ao tráfego internacional, o país não está incluído entre as grandes rotas do transporte aéreo mundial, o que reduz o potencial de interação com os principais mercados (Fernandes and Pacheco, 2016).

Este estudo analisa a relação do PIB (GDP) com o total de passageiros domésticos embarcados e desembarcados (PAXDOM) no período de 2000 a 2015 e com o total de passageiros internacionais embarcados e desembarcados (PAXINT) no período de 1995 a 2015. Os passageiros transportados domésticos e internacionais estão expressos em milhões. O estudo foi realizado utilizando-se o logaritmo natural das séries históricas. Dessa maneira, as variáveis serão representadas por meio da seguinte notação: *logpaxdom* como logaritmo natural de PAXDOM; *logpaxint* como logaritmo natural de PAXINT; e *loggdp* como logaritmo natural de GDP.

##### 4.2.1 Causalidade entre o PIB e o transporte aéreo doméstico de passageiros

Para o teste de estacionaridade, optou-se pelo uso do teste de raiz unitária aumentado Dickey-Fuller (ADF) (Dickey,1979; Fuller, 1976). A hipótese nula considerada, de que o PIB tem raiz unitária, indica que não são estacionários em nível e, desta forma, uma primeira diferença foi aplicada. A estatística do teste ADF com uma primeira diferença foi de -3,634 apresentando o p-valor de 0,0126. Assim, a hipótese nula foi rejeitada com ao nível de significância 0,1. Resultado similar foi observado para o PAXDOM e PAXINT, conforme mostrado na Tabela 4, de modo que foi utilizada uma primeira diferença para que o LOGGDP se tornasse estacionário.

**Tabela 4.** Teste de raiz unitária aumentado Dickey-Fuller, para o nível e para uma diferença.

Null Hypothesis: Series has a unit root				
ADF test Statistic	t-Statistic Nível	Prob.* Nível	t-Statistic 1ª Diferença	Prob.* 1ª Diferença
LOGGDP	-0,999	0,7338	-3,634	0,0126
LOGPAXDOM	-0,657	0,8270	-2,717	0,0974
LOGPAXINT	-0,275	0,9127	-3,524	0,0182

\*MacKinnon one-sided p-values [MacKinnon, 1999].

Em seguida, o teste de Johansen para análise de cointegração foi aplicado. Conforme demonstrado na Tabela 5, os resultados revelaram que, para os diversos modelos testados, existe pelo menos uma equação de cointegração válida e que, em dois casos, existem duas equações. Portanto, pode-se supor que as séries são cointegradas.

**Tabela 5.** Resumo do teste de cointegração Johansen para PAXDOM.

Number of Cointegrating Relations by Model (0.05 level*)					
Data Trend:	None No Intercept No Trend	None Intercept No Trend	Linear Intercept No Trend	Linear Intercept Trend	Quadratic Intercept Trend
Test Type Series: <i>loggdp, logpaxdom</i>					
Trace	1	2	2	1	0
Max-Eig	1	2	2	0	1

\*Critical values based on MacKinnon-Haug-Michelis, 1999.

A evidência de que as séries são cointegradas requer uma análise de causalidade usando-se, para tal, a correção de erro vetorial (VEC). A Tabela 6 mostra os resultados do VEC para *loggdp* e *logpaxdom*. Selecionou-se um modelo linear para a equação de cointegração, com intercepto e sem tendência. A seleção do modelo foi realizada após a análise das equações possíveis, mostrada na Tabela 5.

**Tabela 6.** Estimativas VEC para PAXDOM - Período 2000-2015.

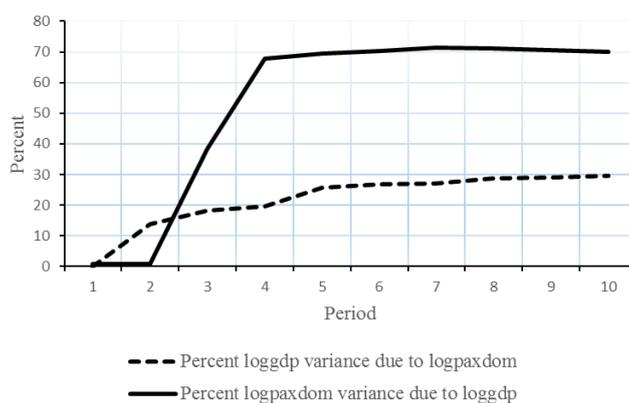
Cointegrating Equation		$z_{t-1}$
<i>loggdp</i> (-1)		1,000000
<i>logpaxdom</i> (-1)		-0,360499
		[-38,4282]*
<i>C</i>		-17,96177
Error Correction:	<i>D</i> (loggdp)	<i>D</i> (logpaxdom)
$z_{t-1}$	1,450173	3,127088
	[2,69362]*	[3,46858]*
<i>D</i> (loggdp(-1))	-1,623752	-2,884983
	[-2,21517]**	[-2,35031]**
<i>D</i> (loggdp(-2))	-1,082929	-1,645512
	[-1,78679]**	[-1,62132]***
<i>D</i> (logpaxdom(-1))	0,205288	0,841251
	[1,48012]***	[3,62204]*
<i>D</i> (logpaxdom(-2))	0,302482	0,132436
	[1,79382]**	[0,46901]
<i>C</i>	0,067240	0,144609
	[2,51066]**	[3,22443]*
R-squared	0,525590	0,788706
Adjusted R-squared	0,186727	0,637782

Sample (adjusted): 2003 - 2015. Included observations: 13 after adjustments  
t-statistics in [ ] (\* ) 99%, (\*\* ) 95%, (\*\*\*) 90%

A Tabela 6 apresenta uma relação bidirecional de longo prazo entre as duas variáveis, que pode ser verificada pelos testes de significância dos coeficientes  $Z_{t-1}$  de *D*(loggdp) [2,69362] e de *D*(logpaxdom) [3,46858]. As relações de curto prazo também se mostraram significativas e bidirecionais nos testes dos coeficientes das variáveis defasadas. No entanto, pode-se observar, por meio dos coeficientes estimados, que os impactos são de proporções diferentes. A relação de curto prazo de *D*(logpaxdom) para

$D(\log gdp)$  é inelástica, com coeficientes de 0,205288 para a primeira defasagem e 0,302482 para a segunda. Na direção oposta, a relação pode ser vista como elástica, ou seja, 1% de variação em  $D(\log gdp)$  produz variações de -2,88% um ano a frente e -1,64% em  $D(\log paxdom)$  dois anos a frente.

A partir da decomposição da variância acumulada, mostrada na Figura 6, observa-se que a variação percentual do  $\log gdp$  devido ao  $\log paxdom$  aumenta para cerca de 30% em 10 períodos. Na direção oposta, a decomposição da variância acumulada mostra influência crescente, já atingindo cerca de 70% no quarto período, patamar em que se estabiliza, uma diferença grande de magnitude do percentual do  $\log paxdom$  devido ao  $\log gdp$ .



**Figura 6:** Variance decomposition do  $\log gdp$  e  $\log paxdom$ .

#### 4.2.2 Causalidade entre o PIB e o transporte aéreo internacional de passageiros

A primeira diferença do LOGPAXINT pode ser considerada estacionária. A estatística do teste ADF foi de -3,524 e o p-valor de 0,0182, rejeitando-se a hipótese nula de raiz unitária, a hipótese nula foi rejeitada com ao nível de significância 0,1, conforme mostrado na Tabela 4. Foi mostrado anteriormente que a primeira diferença de LOGGDP é estacionário.

O teste Johansen de cointegração foi, então, realizado. Os resultados mostrados na Tabela 7 indicam pelo menos uma equação de cointegração em cada um dos cinco modelos. Três modelos retornaram duas equações de cointegração.

**Tabela 7.** Resumo do teste de cointegração Johansen para PAXINT.

Number of Cointegrating Relations by Model (0,05 level\*)

Data Trend:	None Intercept No Trend	None Intercept No Trend	Linear Intercept No Trend	Linear Intercept Trend	Quadratic Intercept Trend
Test Type Series: <i>loggdp</i> , <i>logpaxint</i>					
Trace	1	2	2	2	1
Max-Eig	1	2	2	2	1

\* Critical values based on MacKinnon-Haug-Michelis, 1999.

Dado que as séries são cointegradas, a análise de causalidade usando VEC é recomendada. A Tabela 8 mostra os resultados de VEC para *loggdp* e *logpaxint*. A equação de cointegração selecionada para o modelo foi linear, com intercepto e sem tendência, seleção da equação foi feita após a análise de cada uma das séries.

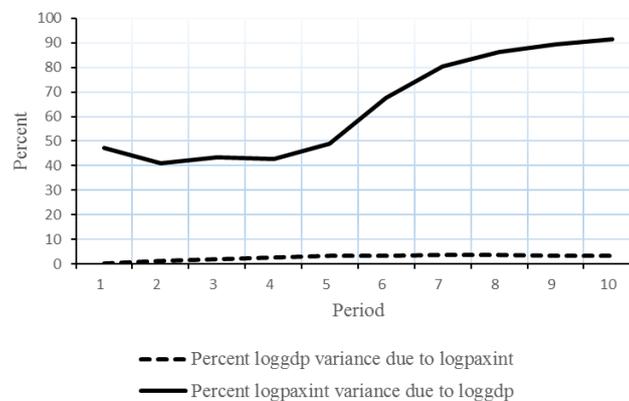
**Tabela 8.** Estimativas VEC para PAXINT - Período 1995-2015.

Cointegrating Equation	$z_{t-1}$	
<i>loggdp</i> (-1)	1,000000	
<i>logpaxint</i> (-1)	-0,453098	
	[-14,2843]*	
C	-17,81063	
Error Correction:	<i>D</i> ( <i>loggdp</i> )	<i>D</i> ( <i>logpaxint</i> )
$z_{t-1}$	0,142902	1,319728
	[1,12499]	[5,56746]*
<i>D</i> ( <i>loggdp</i> (-1))	0,048717	-1,729380
	[0,10907]	[-2,07486]**
<i>D</i> ( <i>loggdp</i> (-2))	0,030429	-2,571034
	[0,06385]	[-2,89115]*
<i>D</i> ( <i>logpaxint</i> (-1))	-0,052779	0,284944
	[-0,48710]	[1,40919]***
<i>D</i> ( <i>logpaxint</i> (-2))	0,007174	0,365173
	[0,07199]	[1,96381]**
C	0,023249	0,125058

	[1,21538]	[3,50330]*
R-squared	0,171400	0,781325
Adjusted R-squared	-0,173849	0,690210

Sample (adjusted): 1998 2015. Included observations: 18 after adjustments  
t-statistics in [ ] (\*) 99%, (\*\*) 95%, (\*\*\*) 90%

A Tabela 8 mostra que, embora as séries sejam cointegradas,  $Z_{t-1}$  não influencia  $D(\log gdp)$ , sugerindo a inexistência de efeito de longo prazo nessa direção. Ademais, os coeficientes de defasagem de  $D(\log paxint)$  retornam estatísticas t significativas, indicando a não influência. De fato, deve-se notar que nenhum dos coeficientes da equação para  $D(\log gdp)$  retornou estatísticas t significativas dos coeficientes das variáveis. Na direção oposta, a Tabela 8 mostra que  $Z_{t-1}$  tem um coeficiente significativo para  $D(\log paxint)$ , indicando causalidade de longo prazo. No curto prazo, os coeficientes das variáveis defasadas de  $D(\log gdp)$  também possuem estatísticas t significativas. Os valores dos coeficientes indicam que a relação é elástica, ou seja, 1% de variação em  $D(\log gdp)$  resulta em 1,73% do primeiro ano e 2,57% da variação do segundo ano em  $D(\log gdp)$ . A decomposição da variância acumulada mostra que a variação percentual no  $\log paxint$  devido ao  $\log gdp$  nos primeiros períodos é ligeiramente superior a 40%, atingindo cerca de 90% em 10 períodos (Fig.7). Portanto, pode-se dizer que existe uma forte relação unilateral entre  $\log gdp$  e  $\log paxint$ .



**Figura 7:** Variance decomposition do  $\log gdp$  e  $\log paxint$

4.3 Efetividade energética da utilização de combustível de aviação no transporte aéreo brasileiro.

4.3.1 Estatísticas descritivas

Para a investigação da efetividade energética do uso de combustível de aviação pelo transporte aéreo brasileiro, as Tabelas 9 e 10 descrevem as estatísticas descritivas e a matriz de correlação das variáveis utilizadas nesta análise. Em geral, todas as variáveis podem variar substancialmente sobre a média, de tal forma que os valores superiores e inferiores são bastante distantes. No caso do Brasil, esses aumentos tornam a conexão muito irregular e não sustentável. Embora arbitrária, a distância mínima de voo considerada para análise é de 200 km, o que é considerado razoável para estabelecer voos regulares entre duas localidades no país.

**Tabela 9.** Estatísticas descritivas para as variáveis do modelo.

<b>Variables</b>	<b><math>\ln FPROD_{i,j,t}</math></b>	<b><math>\ln IC_{i,j,t}</math></b>	<b><math>\ln ASIZE_{i,j,t}</math></b>	<b><math>\ln WF_{i,j,t}</math></b>
Superior	2,82	-0,22	10,47	6,57
Inferior	-4,13	-4,30	7,59	0,00
Média	0,50	-0,90	9,30	2,47
Desvio padrão	0,43	0,31	0,51	1,22
Observações	5839			
<b>Matriz de Correlação</b>				
<b><math>\ln FPROD_{i,j,t}</math></b>	1			
<b><math>\ln IC_{i,j,t}</math></b>	-0,70	1		
<b><math>\ln ASIZE_{i,j,t}</math></b>	0,52	-0,31	1	
<b><math>\ln WF_{i,j,t}</math></b>	0,22	-0,23	0,53	1

**Tabela 10.** Estatísticas descritivas para as variáveis do modelo sem o logaritmo.

<b>Variables</b>	<b><math>FPROD_{i,j,t}</math></b>	<b><math>IC_{i,j,t}</math></b>	<b><math>ASIZE_{i,j,t}</math></b>	<b><math>WF_{i,j,t}</math></b>
Superior	16,80	0,80	35.100	714
Inferior	0,02	0,01	1.980	1
Média	1,79	0,43	12.246	26
Desvio padrão	0,73	0,12	5.165	50
Observações	5839			
<b>Matriz de Correlação</b>				
<b><math>FPROD_{i,j,t}</math></b>	1			
<b><math>IC_{i,j,t}</math></b>	-0,69	1		

$ASIZE_{i,j,t}$	0,49	-0,31	1	
$WF_{i,j,t}$	0,027	-0,08	0,31	1

No período de 2007 a 2016, todas as variáveis apresentaram variação favorável para a melhoria do desempenho (Tabela 11). A produtividade dos combustíveis melhorou, de maneira geral, na aviação doméstica regular no Brasil. De 2007 a 2016, a média anual por combustível *RTK* observado na amostra aumentou de 1,95 para 2,40. A média anual de *IC* registrou redução de 0,42% para 0,34%, a média anual de *ASIZE* caiu de 17,310kg para 16,483kg, e a média anual de *WF* aumentou de 8.841 para 15.087 por semana.

**Tabela 11.** Evolução anual do *FPROD*, *IC*, *WF* e *ASIZE* de 2007 a 2016.

Ano	<i>FPROD</i> ( <i>RTK/L</i> )	<i>IC</i> (%)	<i>ASIZE</i> (kg)	<i>WF</i> (por semana)
2007	1,95	0,42	17.310	8.841
2008	1,95	0,41	17.215	9.231
2009	1,96	0,34	14.892	10.697
2010	2,11	0,36	16.458	12.208
2011	2,19	0,35	16.484	13.676
2012	2,19	0,34	16.359	14.352
2013	2,19	0,33	16.344	15.169
2014	2,30	0,31	15.491	17.172
2015	2,29	0,34	16.080	16.942
2016	2,40	0,34	16.483	15.087

#### 4.3.2 Análise do painel

Conforme descrito no capítulo metodológico, os testes de Chow, Breusch-Pagan e Hausman foram aplicados para a definição do pool de estimativas, com efeitos fixos ou aleatórios, para as seções transversais e os períodos. O teste de Chow (Tabela 12) rejeitou ( $p$ -valor < 0,05) a hipótese nula da estimativa pool para a cross-section e períodos, sugerindo que os efeitos fixos são adequados.

**Tabela 12.** Testes de efeitos fixos redundantes (Chow test).

Testar efeitos fixos de seção cruzada e período			
Teste de Efeitos	Estatística	D,f,	$p$ -Valor
Seção Transversal F	9,91	(987)	0,00
Período F	21,18	(9)	0,00

Seção cruzada/Período F	10,22	(996)	0,00
-------------------------	-------	-------	------

Os testes para verificação dos efeitos aleatórios versus nenhum efeito (pool) também rejeitaram a hipótese nula da modelagem pool ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), sugerindo, neste caso, que o efeito aleatório é o mais adequado. A Tabela 13 mostra os resultados dos testes realizados.

**Tabela 13.** Teste do multiplicador de Lagrange para efeitos aleatórios (Breusch-Pagan).

	Test Hypothesis		
	Cross-section	Time	Both
Breusch-Pagan	4.624,83	811,51	5.436,34
<i>p</i> -value	(0,00)	(0,00)	(0,00)

Para a definição entre os efeitos fixos e aleatórios para a cross section e períodos, foi aplicado o Teste de Hausman (Tabela 14). Tanto para a cross section quanto para os períodos, o Teste de Hausman rejeitou a hipótese nula para efeitos aleatórios ( $p$ -valor  $< 0,05$ ). Neste caso, a modelagem desenvolvida considerou os efeitos fixos para seções transversais e para períodos.

**Tabela 14.** Teste de Hausman de efeitos aleatórios correlacionados.

Resumo do Teste	$\chi^2$ Estatística	$\chi^2$ d.f.	<i>p</i> -Valor
Aleatório de seção cruzada	304,02	2	0,00
Período aleatório	8,45	2	0,01

Após o exame das várias opções possíveis para a modelagem de dados do painel, um modelo de regressão de painel de mínimos quadrados em dois estágios foi selecionado como o estimador mais adequado para esta análise. O teste de Chow (para efeitos fixos transversais) indicou que o modelo de efeito fixo se encaixava melhor do que a abordagem pool. Da mesma forma, no teste de Breusch-Pagan o multiplicador de Lagrange indicou que o efeito aleatório é melhor do que a abordagem pool. Finalmente,

o Teste de Hausman (para efeitos aleatórios transversais) mostrou que o efeito fixo também foi mais adequado do que o efeito aleatório tanto para a seção quanto para o período. A Tabela 15 mostra o resultado do modelo de regressão aplicado no estudo.

**Tabela 15.** Modelo de regressão de mínimos quadrados em dois estágios.

<b>Variável Dependente: <math>\ln FPROD_{i,j,t}</math></b>				
<b>Períodos Incluídos: 10; Cross-Section incluídas: 988</b>				
<b>Observações totais do Painel (Desequilibrados): 5.839</b>				
<b>Especificação do instrumento: <math>\ln ASIZE_{i,j,t}</math>, <math>\ln WF_{i,j,t}</math> e C</b>				
<b>Variável</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Erro de DST</b>	<b>t-Estatística</b>	<b>Prob.</b>
$\ln(\bar{I}\bar{C}_{i,j,t})$	-0,94	0,47	-2,01	0,04
$\ln(ASIZE_{i,j,t})$	0,48	0,15	3,24	0,00
C	-4,81	1,80	-2,67	0,01
<b>Especificação de efeitos</b>				
Fixação de seção cruzada (variáveis de boneco)				
Período fixo (variáveis de boneco)				
R <sup>2</sup>	0,84			
R <sup>2</sup> ajustado	0,81			
<b>Resultado da Equação Auxiliar</b>				
<b>Variável</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Erro de DST</b>	<b>t-Estatística</b>	<b>Prob.</b>
$\ln(\bar{W}\bar{F}_{i,j,t})$	-0,01	0,006172	-2,15	0,03
$\ln(ASIZE_{i,j,t})$	0,31	0,013947	22,54	0,00
C	-3,79	0,130943	-28,93	0,00
<b>Especificação de efeitos</b>				
Fixação de seção cruzada (variáveis de boneco)				
Período fixo (variáveis de boneco)				
R <sup>2</sup>	0,71			
R <sup>2</sup> ajustado	0,65			

## 5. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na primeira parte da análise, voltada a investigar a cointegração e causalidade de Granger entre transporte aéreo e desenvolvimento econômico no Brasil, evidenciaram que as séries observadas se mostraram estacionárias em suas primeiras diferenças. Em ambos os mercados estudados, doméstico e internacional, observa-se causalidade entre fluxo de passageiros e PIB, com evidência de cointegração entre as séries. No entanto, não se trata de uma relação em que os impactos se dão de maneira uniforme. Para o conjunto de dados investigados, o impacto do PIB sobre o fluxo de passageiros transportados mostrou-se muito mais forte do que o dos passageiros para o PIB.

A decomposição da variância tem o propósito de medir a dimensão, em termos percentuais, do impacto da variação de uma dada série devido a um choque em outra série. A variância do PIB devida ao fluxo de passageiros no mercado doméstico chega a cerca de 30%, enquanto a variância do fluxo de passageiros domésticos devida ao PIB chega a cerca de 70%. No caso do mercado internacional, não se observou causalidade em relação ao PIB. Os resultados mostraram que a variação do PIB devida ao fluxo de passageiros internacionais chegou a apenas 3%, enquanto a variância do fluxo de passageiros no mercado internacional devida ao PIB chega a 90%. Como a equação do VEC para o caso em que o PIB aparece como variável explicada em relação ao fluxo de passageiros internacionais não apresenta nenhum teste estatístico significativo, não se pode afirmar que os passageiros transportados neste mercado específico tenham alguma influência sobre o PIB. Assim, pode-se afirmar que existe um movimento unidirecional do PIB para o movimento de passageiros internacionais. No que diz respeito à causalidade de Granger, as evidências indicam que a variação do PIB é precedente e de grande importância para a variação do fluxo de passageiros, tanto no mercado doméstico quanto no internacional, existindo ainda um mecanismo de retroalimentação, em menores proporções, da variação do movimento de passageiros domésticos transportados sobre o PIB.

Já na segunda parte da pesquisa, voltada à compreensão da eficiência do combustível de aviação no transporte aéreo regular brasileiro, os coeficientes das variáveis explicativas do modelo estimado (Tabela 15) representam as elasticidades constantes de cada uma delas em relação à variável dependente. Vale notar que a hipótese de uma elasticidade

constante pode ser considerada uma limitação do modelo. No entanto, é razoável supor que a tecnologia operacional em questão seja semelhante em todas as companhias aéreas. Além disso, não se observou nenhum avanço tecnológico no período investigado.

A hipótese investigada pelo modelo é confirmada, em certa medida, pelo alto nível de significância dos coeficientes das variáveis independentes. A elasticidade de -0,94 associada à variável  $IC_{i,j,t}$  retrata o impacto negativo que a capacidade ociosa tem sobre a produtividade do combustível, enquanto que a elasticidade de 0,48 vinculada à variável  $ASIZE_{i,j,t}$  sugere um impacto positivo. Nota-se que a variável  $IC_{i,j,t}$  é muito mais elástica do que  $ASIZE_{i,j,t}$ . Consequentemente, deve-se ter em mente que uma boa produtividade pode ser alcançada com foco, sem a necessidade de se abandonar rotas regionais de menor densidade. Por fim, é importante observar que se trata de duas variáveis passíveis de gerenciamento por parte das companhias aéreas quando da definição do seu nível de oferta e mercado-alvo.

O elevado nível de capacidade ociosa (Tabela 11) indica que há espaço significativo para aumento da eficiência nas operações. Este aspecto operacional sugere que, para aumentar a lucratividade, não se trataria apenas de uma questão de atrair mais passageiros para o transporte aéreo, mas também de atrair mais negócios de carga e correios por parte das companhias aéreas. Cabe ressaltar que este desafio não cabe exclusivamente às companhias aéreas, as condições logísticas de acesso aeroportuário e a simplificação burocrática dos procedimentos fiscais também são extremamente importantes para tornar essa modalidade de transporte de carga mais atrativa.

Nessa direção, o desafio em questão para as companhias aéreas no tocante a esta temática passa a ser dotar-se de uma frota equilibrada e com frequência de voos adequadas ao tipo de rede na qual se insere no âmbito do mercado brasileiro. Supondo-se a continuidade da tendência de desenvolvimento da frota observada na Tabela 2, a alternativa seria o abandono de grande parte das rotas regionais, algo que seria negativo para o desenvolvimento econômico brasileiro e para o futuro da aviação doméstica regular no país.

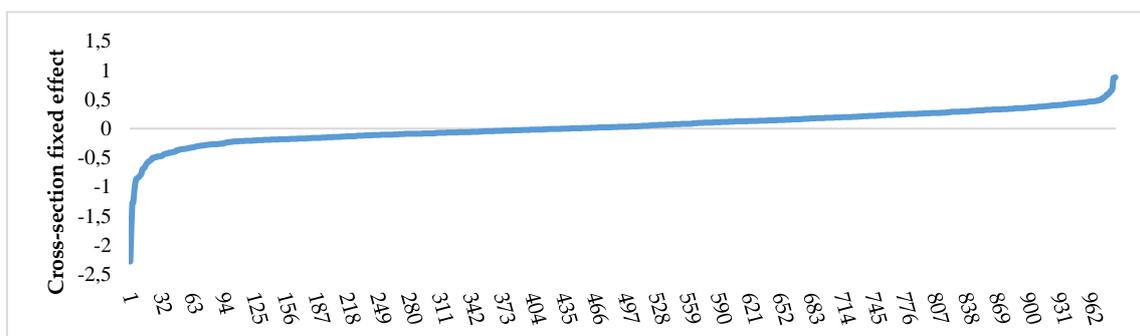
A Tabela 16 apresenta os coeficientes de efeito fixo de 2007 a 2016. Os resultados obtidos não mostram tendência, evitando uma influência positiva no desempenho do combustível, uma vez que quatro dos dez coeficientes são negativos. Embora o saldo seja positivo, é

um efeito muito pequeno. Dessa forma, pode-se concluir que os avanços tecnológicos não contribuíram significativamente para a melhoria do desempenho dos combustíveis. Apenas um avanço tecnológico considerável no transporte aéreo poderia mudar este cenário.

**Tabela 16.** Efeito Fixo no período.

Year	Effect
2007	0,051331
2008	0,000610
2009	-0,044556
2010	0,068665
2011	0,037720
2012	0,005737
2013	-0,003723
2014	-0,075073
2015	-0,030518
2016	0,014526

A Figura 8 retrata os coeficientes de efeito fixo transversal obtidos na pesquisa. Das 988 seções transversais do estudo, 550 têm coeficiente dummy positivo e 438 dummy negativo. Os coeficientes do VAR foram de -2,29 a 0,88. Entre os 988 cruzamentos, 23 tiveram coeficientes entre -2,29 e -0,50. Em contrapartida, 15 rotas tiveram coeficientes entre 0,50 e 0,88. A partir destes resultados, é possível inferir que apenas algumas rotas oferecem condições operacionais extremamente negativas ou positivas.



**Figura 8.** Coeficientes de efeito fixo de seção.

Este estudo assume a hipótese observada por Schnell (Schnell 2005) sobre a manutenção, por parte das companhias aéreas, de algum excesso de capacidade com o propósito de lidar com eventualidades associadas à demanda futura ou à concorrência. A ociosidade torna a indústria menos competitiva e ineficiente em relação aos custos. Uma vez que um voo já ocorreu, sua capacidade de carga não utilizada representa perda de receita, impactando os resultados da empresa. Dessa maneira, esta estratégia, do ponto de vista econômico, parece mais predatória do que competitiva em termos de posicionamento de mercado.

Naturalmente, a redução da oferta pode levar a algum desconforto por parte do cliente, o que é outro ponto importante a se considerar na análise. A relevância de uma atividade para o desenvolvimento econômico de uma sociedade deve considerar a questão da sustentabilidade. A indústria que produz efeitos colaterais adversos sobre o meio ambiente precisa ter o compromisso de se esforçar por altos níveis de desempenho no uso dos recursos que produzam o efeito em questão, em particular, a emissão de gases de efeito estufa. Nessa direção, é importante conscientizar os usuários do transporte aéreo sobre os problemas ambientais ligados a esta forma de transporte para garantir a tolerância a qualquer possível desconforto que possa ser necessário para aumentar a produtividade da queima de combustível a jato.

No transporte aéreo, a capacidade ociosa pode ser dividida em dois componentes: o primeiro consiste na capacidade que a companhia aérea não usa, tal como uma aeronave que está ociosa por falta de demanda. Já a segunda é mais prejudicial, envolvendo o não uso de um serviço, que é o caso de capacidade não utilizada em um voo. Este último, além de gerar custos operacionais sem compensação de receita, produz danos ambientais. Obviamente, é impossível eliminar toda essa capacidade ociosa, mas companhias aéreas e reguladores devem procurar desenvolver mecanismos para reduzir a capacidade ociosa neste setor.

Estudos recentes têm usado análise de dados de painéis para encontrar e medir variáveis relacionadas às emissões de poluentes (Li al, 2016; Azan, 2016). Além disso, mas visando o mesmo objetivo, este trabalho analisou a eficiência do uso de combustível a jato considerando sua produtividade parcial. A visão apresentada no presente trabalho demonstrou que há outra forma de reduzir as emissões de poluentes do transporte aéreo, ou seja, reduzindo a capacidade ociosa.

Outra alternativa presente nos debates que subsidiam a formulação de políticas de transporte aéreo nos países seria a introdução de um imposto sobre a emissão de poluição. Este tributo incidiria diretamente sobre as receitas ou lucros auferidos pelas companhias aéreas, e, inevitavelmente, seria transferido para os preços das tarifas aéreas cobradas aos seus clientes. Em países em desenvolvimento, como o Brasil, onde o transporte aéreo é subutilizado e cujas redes de transporte apresentam uma série de deficiências, este assunto deve ser estudado com cuidado.

Se não for implantado adequadamente, tal imposto pode ser um desincentivo ao uso do transporte aéreo, transferindo parte da demanda para o transporte rodoviário. Este cenário teria o potencial de causar mais danos econômicos e ambientais do que benefícios à coletividade. A política de transporte aéreo deve usar o imposto como um incentivo para melhorar a produtividade da utilização de combustível, não tributando, por exemplo, voos de alta produtividade. Esta abordagem incentivaria as companhias aéreas a refinar suas carteiras de negócios, agindo de forma mais representativa no transporte de cargas, por exemplo.

A ênfase na produtividade estimularia as companhias aéreas a se esforçarem por uma maior eficiência operacional, em vez de serem desencorajadas por uma retração de mercado devido a custos operacionais mais altos. Dessa forma, esta discussão indica que a redução da capacidade ociosa é a variável operacional mais importante para melhorar a eficiência da frota aérea no Brasil.

Uma limitação do estudo é a padronização que ocorreu na frota aérea brasileira, característica que pode não ser vista em outros países e que, de certa maneira, confere alguma peculiaridade ao caso. Park e O'Kelly analisaram o custo operacional da eficiência das aeronaves no mercado de aviação dos EUA e concluíram que uma frota eficiente é composta por aeronaves de tamanho misto como uma alternativa a uma variedade de mercados (Park e O'Kelly 2018). Aeronaves maiores tendem a ser mais eficientes, usando menos combustível por passageiro (Brueckner e Abreu 2017). No entanto, para o caso brasileiro, a frota é muito semelhante entre as companhias aéreas, sem grande variação no tamanho das aeronaves. Assim, no curto prazo, para medir a eficiência, apenas a análise da capacidade ociosa foi considerada. Em uma situação na qual se apresente uma maior variabilidade de tipos de aeronaves trafegando para uma mesma rota aérea, resultados diferentes poderiam vir a ser obtidos.



## 6. CONCLUSÕES

O transporte aéreo apresenta dinâmicas diferentes entre o mercado nacional e internacional. Ao considerar tanto passageiros embarcados como desembarcados e acrescentar o fluxo de passageiros internacionais, essa tese contribui com a análise de Fernandes e Pacheco (2010), suprimindo assim esse gap na literatura e mostrando originalidade, atendendo assim um dos objetivos propostos na seção inicial. Os resultados confirmam a hipótese de que há cointegração entre transporte aéreo e crescimento econômico, no entanto é uma causalidade bidirecional de longo e curto prazo para o tráfego doméstico e unidirecional de longo e curto prazo do crescimento econômico para transporte aéreo internacional. No entanto, o comportamento dessa relação precisa ser investigado periodicamente, pois pode sofrer alterações ao longo do tempo.

Os resultados apresentados na presente tese sugerem a precedência do desenvolvimento econômico em relação ao movimento de passageiros no âmbito do transporte aéreo brasileiro. Este último, por seu turno, retroalimenta o crescimento econômico no caso do mercado doméstico de aviação civil. Estas evidências sinalizam que os investimentos em transporte aéreo no Brasil devem ser compreendidos com certa cautela, pois o seu retorno está condicionado ao desempenho da macroeconomia. Em outras palavras, os resultados aqui apresentados recomendam cautela ao investidor, uma vez que há o risco de ter o retorno de suas inversões negativamente influenciado por uma eventual retração do ambiente econômico.

Esta é uma evidência que se encontra ancorada na realidade observada no Brasil no passado recente. De fato, nos últimos anos foram realizados vultosos investimentos para suportar os grandes eventos sediados pelo Brasil, incluindo investimentos orientados à expansão dos grandes aeroportos. Concentrados, sobretudo, na infraestrutura voltada ao tráfego aéreo internacional, estes investimentos foram materializados com a expectativa de atrair passageiros oriundos de diversos países ao redor do mundo e, assim, induzir o desenvolvimento econômico brasileiro. Dentro desta perspectiva, os resultados aqui obtidos sinalizam que investimentos voltados à expansão, adequação e modernização da malha de transporte aéreo doméstica parece apresentar melhores retornos econômicos do que aqueles dirigidos ao tráfego internacional de passageiros. Dessa maneira, além desta ênfase no transporte aéreo internacional, que parece equivocada, fica em aberto a questão

de que poderiam existir melhores opções de investimentos para alavancar o PIB brasileiro.

Nesse sentido, uma alternativa de política de transporte aéreo no Brasil poderia ser a criação de aeroportos secundários, com ênfase no transporte doméstico nas áreas de influência das grandes metrópoles brasileiras. Este tipo de medida teria o potencial de descongestionar grandes aeroportos internacionais encravados em densas malhas urbanas e trazer melhores resultados para a economia. Isto garantiria uma verdadeira ampliação da disponibilidade de horários de voos nas grandes metrópoles brasileiras, favorecendo, sobremaneira, o desenvolvimento de uma malha regional no país.

De acordo com os objetivos propostos, essa tese apresentou alternativa para melhorar a eficiência e aumento da produtividade do combustível de aviação. Essa investigação da eficiência do combustível de aviação no transporte aéreo regular brasileiro, presente nessa tese, resultou em medidas objetivas para ilustrar a relação entre a queima de combustível e os procedimentos operacionais das companhias aéreas. Os resultados obtidos revelaram uma associação convergente entre a melhoria das operações aéreas e a redução da queima de combustível por peso transportado pelas aeronaves, resultando em menores emissões de gases poluentes por unidades comerciais (passageiros ou cargas) transportadas. Atendendo assim o indicado inicialmente, suprimindo o gap na literatura.

Nos objetivos, foram apresentadas algumas perguntas e respondemos que, com o desenvolvimento dessa pesquisa, a análise da capacidade ociosa pode auxiliar no esforço de alcançar uma melhor sustentabilidade do setor, as oportunidades de melhorias de eficiência energética ficaram claras pela alta capacidade ociosa observada na utilização das aeronaves nos voos domésticos. Além disso, em uma indústria em crescimento como o transporte aéreo, mostramos que essa é uma alternativa para aumentar a produtividade parcial do combustível para melhorar a posição de custo das companhias aéreas e reduzir os impactos ambientais esperados da atividade.

Utilizando uma abordagem de produtividade, em termos físicos em relação ao principal item de custo operacional das companhias aéreas, esta tese discutiu as possibilidades de melhorar a produtividade parcial do combustível para o transporte aéreo doméstico regular brasileiro. Nesse contexto, abordou oportunidades de melhoria nas dimensões tecnológica, regulatória (governamental) e operacional (companhias aéreas).

O transporte aéreo doméstico no Brasil possui um amplo espaço aberto a melhorias de desempenho por meio da intervenção sobre fatores operacionais. Sua capacidade ociosa elevada pode ser reduzida através de medidas operacionais, por exemplo fazendo-se melhor uso da capacidade ofertada, desenvolvendo-se o transporte de cargas e ampliando a taxa de ocupação dos assentos. Para tal, é estratégico às companhias aéreas gerenciar sua oferta de serviços e preços de forma mais eficiente.

Nesta temática, as agências reguladoras podem contribuir significativamente estabelecendo padrões que favoreçam as companhias aéreas que atingirem menor capacidade ociosa. Por exemplo, a aprovação de novas ligações poderia ser condicionada ao alcance de uma capacidade ociosa mais compatível com as normas estabelecidas pelo regulador em relação à queima de combustível, que é a variável considerada para análise neste trabalho. Os resultados da pesquisa nesta área mostram importantes oportunidades para melhorar o desempenho financeiro das companhias aéreas e tornar a queima de combustível mais eficiente no transporte aéreo doméstico regular no Brasil. Conforme apresentado neste trabalho, embora a capacidade ociosa esteja se reduzindo no transporte aéreo doméstico regular no Brasil, ela ainda se mantém em patamar muito elevado para os padrões internacionais.

Conclui-se, nessa direção, atendendo às propostas iniciais, que as companhias aéreas devem ser encorajadas a aumentar o tamanho da aeronave apenas em rotas que podem suportar esse crescimento sem um declínio no fator de carga. O estudo confirma que, tanto do ponto de vista ambiental quanto financeiro, é importante que as companhias aéreas operem com a menor capacidade ociosa possível, como pode ser observado a partir do desempenho da elasticidade deste fator no modelo econométrico apresentado. Sendo assim ambas as hipóteses formuladas na tese foram confirmadas.

A composição da frota das companhias aéreas é fundamental para atender suas redes com a menor capacidade ociosa possível. O aumento do tamanho das aeronaves sem estudo prévio e os procedimentos regulatórios adequados podem levar ao abandono ou relativa negligência da aviação regional, como tem sido a tendência recente no transporte aéreo doméstico brasileiro. Um possível estudo futuro envolveria uma comparação da eficiência de combustível de diferentes companhias aéreas que operam em países em desenvolvimento, buscando identificar referências para o setor aéreo de maneira geral.

Para dar continuidade a pesquisa, uma das propostas de estudo futuro seria o desenvolvimento de modelagem para análise da carga aérea transportada, principalmente com relação à oferta, tendo como variável principal *payload* e o preço da carga paga transportada, pois verificamos que existe uma capacidade ociosa da carga, sendo assim, as companhias aéreas poderiam reduzir o custo desse transporte para aumentar a demanda, podendo até verificar-se a redução de emissões em outros modais, já que parte dessa carga seria despachada via o modal aéreo. Um outro estudo futuro seria examinar o comportamento da relação dos passageiros aéreos, pois a proposta dessa pesquisa foi de um modelo estático, sendo necessária a investigação periódica, podendo sofrer alterações ao longo do tempo, principalmente durante e após o período da pandemia do Covid-19, onde houve redução e redimensionamento significativos da frota aérea, mudando a estrutura do comportamento da oferta, para uma demanda que está reprimida. Um outro estudo futuro poderia ser a otimização da malha aérea considerando o tamanho de aeronaves e frequências mais apropriados para as rotas regionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEAR, 2017. Panorama 2014, 2015, 2016, 2017: O setor aéreo em dados e análises. Associação Brasileira de Empresas Aéreas (ABEAR), Rio de Janeiro.
- AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL – ANAC , Anuário do transporte aéreo 2014, 2015, 2015, 2017 e 2018. [www.anac.gov.br/estatistica/anuarios](http://www.anac.gov.br/estatistica/anuarios)
- Aprigliano Fernandes, V.; Pacheco, R.R.; Fernandes, E.; Cabo, M.; Ventura, R.V.; Caixeta, R. Air Transportation, Economy and Causality: Remote Towns in Brazil's Amazon Region. *Sustainability* 2021, 13, 627.
- ATAG, 2018. Aviation benefits beyond borders. Air Transport Action Group (ATAG), Geneva.
- Azaidan, F., Murat, A. E., & Chinnam, R. B. 2012. Dynamic routing of time-sensitive air cargo using real-time information. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 48(1), 355-372. doi:10.1016/j.tre.2011.07.004
- Azam, Muhammad. 2016. Does Environmental Degradation Shackle Economic Growth? A Panel Data Investigation on 11 Asian Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 65 (novembro): 175–82. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.087>.
- Baker, D., Merkert, R., Kamruzzaman, M., 2015. Regional aviation and economic growth: cointegration and causality analysis in Australia. *Journal of Transport Geography* 43, 140-150.
- Banerjee, A. 1999. Panel Data Unit Roots and Cointegration: An Overview. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, v. 61, p. 607–629, Novembro.
- Boeing, C. 2015. Biannual World Air Cargo Forecast (WACT) 2014–2015 Retrieved from [www.boeing.com/commercial/cargo](http://www.boeing.com/commercial/cargo)
- Breusch, T. S. & PAGAN, A. R.. A. 1979. Simple Test for Heteroskedasticity and Random Coefficient Variation. *Econometrica*, 1287–1294.
- Brueckner, J. K. 1985. A NOTE ON THE DETERMINANTS OF METROPOLITAN AIRLINE TRAFFIC. *International Journal of Transport Economics / Rivista internazionale di economia dei trasporti*, 12(2), 175-184.
- Brueckner, Jan K., e Chrystyane Abreu. 2017. Airline Fuel Usage and Carbon Emissions: Determining Factors. *Journal of Air Transport Management* 62 (julho): 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.01.004>.
- Button, K., Yuan, J., 2013. Airfreight Transport and Economic Development: An Examination of Causality. *Urban Studies* 50 (2), 329-340.
- Cabo, Manoela, Elton Fernandes, Paulo Alonso, Ricardo Rodrigues Pacheco, e Felipe Fagundes. 2020. Energy Effectiveness of Jet Fuel Utilization in Brazilian Air Transport. *Sustainability* 12 (1): 303. <https://doi.org/10.3390/su12010303>.

- Cabo, M.G. ; FERNANDES, E. 2016. Modelo para o fluxo aéreo de carga transportada entre as cidades brasileiras: Abordagens com dados em painel. In: XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2016, Rio de Janeiro. ANPET.
- Chang, Y.-H., Chang, Y.-W., 2009. Air cargo expansion and economic growth: Finding the empirical link. *Journal of Air Transport Management* 15 (5), 264–265.
- Chang, Y.-H., Yeh, C.-H., & Wang, S.-Y. 2007. A survey and optimization-based evaluation of development strategies for the air cargo industry. *International Journal of Production Economics*, 106(2), 550-562.
- Chang, Young-Tae, Hyo-soo Park, Jae-beom Jeong, e Jin-woo Lee. 2014. Evaluating economic and environmental efficiency of global airlines: A SBM-DEA approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 27: 46–50.
- Chèze, Benoît, Pascal Gastineau, e Julien Chevallier. 2011. Forecasting world and regional aviation jet fuel demands to the mid-term (2025). *Energy Policy* 39 (9): 5147–5158.
- Chow, G. C. 1960. Tests of equality between sets of coefficients in two linear regressions. *Econometrica*, Chicago, 28, 591-605.
- Cui, Qiang, e Ye Li. 2017. Airline efficiency measures using a Dynamic Epsilon-Based Measure model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 100: 121–134.
- Cui, Qiang, Yi-Ming Wei, e Ye Li. 2016. Exploring the impacts of the EU ETS emission limits on airline performance via the Dynamic Environmental DEA approach. *Applied Energy* 183: 984–994.
- da Silva, M. A. V., & de Almeida D’Agosto, M. 2013. A model to estimate the origin–destination matrix for soybean exportation in Brazil. *Journal of Transport Geography*, 26, 97-107.
- Daley, Ben. 2016. *Air Transport and the Environment*. New York: Routledge.  
<http://www.dawsonera.com/depp/reader/protected/external/AbstractView/S9780754690894>.
- Dessens, Olivier, Marcus O. Köhler, Helen L. Rogers, Rod L. Jones, e John A. Pyle. 2014. Aviation and Climate Change. *Transport Policy, Air Transportation and the Environment*, 34 (julho): 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.02.014>.
- Dickey, D.A., Fuller, W.A., 1979. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. *Journal of the American Statistical Association* 74 (366a), 427-431.
- Doganis, Rigas. 1992. *The Airport Business*. 1 edition. London: Routledge.
- Doganis, Rigas. 2009. *Flying Off Course : Airline Economics and Marketing*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203863992>.

- Engle, R.F., Granger, C.W.J., 1987. Co-integration and error correction: representation, estimation and testing. *Econometrica* 55 (2), 251-276.
- EvIEWS 11. 2019. EvIEWS 11 User's Guide II - Instrumental Variables. In , 1038–40. EvIEWS 11. IHS Global Inc.
- Feng, B., Li, Y., & Shen, Z.-J. M. 2015. Air cargo operations: Literature review and comparison with practices. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 56, 263-280.
- Fernandes, E., Pacheco, R.R., 2010. The causal relationship between GDP and domestic air passenger traffic in Brazil. *Transportation Planning and Technology* 33 (7), 569-581.
- Fernandes, E., Pacheco, R.R., 2016. *Transporte aéreo no Brasil: uma visão de mercado*. Elsevier, Rio de Janeiro.
- Frees, Edward W. 2004. *Longitudinal and panel data: analysis and applications in the social sciences*. Cambridge University Press.
- Fuller, W.A., 1976. *Introduction to Statistical Time Series*. Wiley, New York.
- Givoni, Moshe, e Piet Rietveld. 2006. Choice of Aircraft Size – Explanations and Implications, *TI 2006 - 113/3*, *TI 2006-113/3*: 1–18.
- González, Rodrigo, e Eiji B. Hosoda. 2016. Environmental impact of aircraft emissions and aviation fuel tax in Japan. *Journal of Air Transport Management* 57: 234–240.
- Granger, C.W.J., 1969. Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods. *Econometrica* 37 (3), 424-438.
- Granger, C.W.J., 1988. Causality, cointegration and control. *Journal of Economic Dynamics & Control* 12 (2-3), 551-559.
- Hair, J. F. *Análise multivariada de dados*. 6ª. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2009.
- Hassapis, C., Pittis, N., Prodromidis, K., 1999. Unit roots and granger causality in the EMS interest rates: the German dominance hypothesis revisited. *Journal of International Money and Finance*, 18 (1), 47-73.
- Hassapis, C., Pittis, N., Prodromidis, K., 1999. Unit roots and granger causality in the EMS interest rates: the German dominance hypothesis revisited. *Journal of International Money and Finance*, 18 (1), 47-73.
- Hausman, J. A. 1978. Specification Tests in Econometrics. *Econometrica*, 1251–1271.
- Hill, R.C; Griffithis, W.E. e Judge, G.G. *Econometria*., São Paulo: Ed. Saraiva, 1999.
- Hsiao, Cheng. 2014. *Analysis of panel data*. 54. Cambridge University Press. v. Third edition

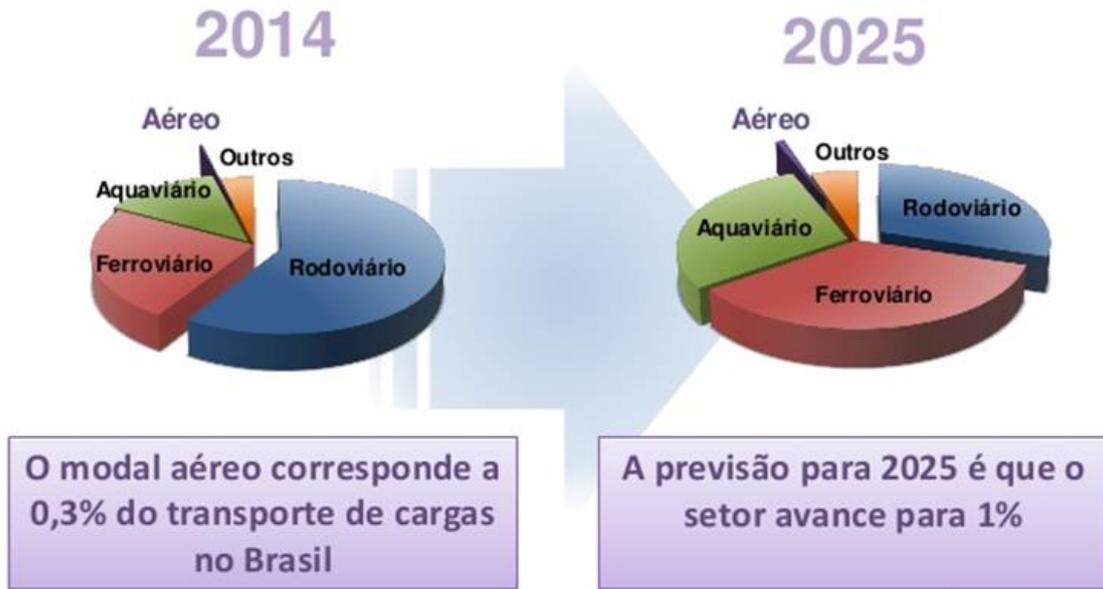
- Hu, Y., Xiao, J., Deng, Y., Xiao, Y., Wang, S., 2015. Domestic air passenger traffic and economic growth in China: Evidence from heterogeneous panel models. *Journal of Air Transport Management* 42, 95-100.
- Hwang, C. C., & Shiao, G. C. 2011. Analyzing air cargo flows of international routes: an empirical study of Taiwan Taoyuan International Airport. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 738-744. doi:10.1016/j.jtrangeo.2010.09.001
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, Pesquisas: Pesquisa industrial mensal produção física, PIM-PF; Contas Nacionais Municipais; Redes e Fluxos do Território, Ligações Aéreas 2010. Rio de Janeiro, Brasil.
- Janic, M., 2018. An assessment of the potential of alternative fuels for “greening” commercial air transportation. *Journal of Air Transportation Management* 69, 235-247.
- Johansen, S., 1991. Estimation and Hypothesis testing of cointegrating vectors in Gaussian vector autoregressive models. *Econometrica*, 59 (6), 1551-1580.
- Johansen, S., 1995. Likelihood-based inference in cointegrated vector autoregressive models. Oxford University Press, Oxford.
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. 2002. *Applied multivariate statistical analysis* (Vol. 5): Prentice hall Upper Saddle River, NJ.
- Johston, J. 1988. *ECONOMETRIC METHODS, 3RD EDITION*. *Journal of Applied Econometrics*, 3(3), 252-254.
- Kasarda, J. D., & Green, J. D. 2005. Air cargo as an economic development engine: A note on opportunities and constraints. *Journal of Air Transport Management*, 11(6), 459-462.
- Kuledran, N., Wilson, K., 2000. Is there a relationship between international trade and international travel? *Applied Economics* 32 (8), 1001-1008.
- Lakew, P. A. 2015. Airport Traffic and Metropolitan Economies Determinants of Passenger and Cargo Traffic. *Transportation Research Record*(2471), 58-72. doi:10.3141/2471-08
- Li, Tingting, Yong Wang, e Dingtao Zhao. 2016. Environmental Kuznets Curve in China: New Evidence from Dynamic Panel Analysis. *Energy Policy* 91 (abril): 138–47. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.002>.
- MacKinnon, J. G. 1996. “Numerical distribution functions for unit root and cointegration tests,” *Journal of Applied Econometrics*, 11, 601–618.
- MacKinnon, J. G., A. A. Haug, and L. Michelis. 1999. “Numerical distribution functions of likelihood ratio tests for cointegration,” *Journal of Applied Econometrics*, 14, 563–577.

- Marazzo, M., Scherre, R., Fernandes, E., 2010. Air transport demand and economic growth in Brazil: A time series analysis. *Transportation Research Part E* 46 (2),
- Mehmood, B., Kiani, K., 2013. An inquiry into nexus between demand for aviation and economic growth in Pakistan. *Academicia* 3 (10), 200-211.
- Mehmood, B., Shahid, A., 2014. Aviation Demand and Economic Growth in the Czech Republic: Cointegration Estimation and Causality Analysis. *Statistika* 94 (1), 54-63.
- Mehmood, B., Shahid, A., 2014. Aviation Demand and Economic Growth in the Czech Republic: Cointegration Estimation and Causality Analysis. *Statistika* 94 (1), 54-63.
- Moretin P. A. & Toloí C. M. C.. *Análise Séries Temporais. 2ª edição.* ed. São Paulo: Blucher, 2006.
- O’Kelly, Morton E. 2012. Fuel burn and environmental implications of airline hub networks. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17 (7): 555–567.
- Park, Yongha, e Morton E. O’Kelly. 2014. Fuel burn rates of commercial passenger aircraft: variations by seat configuration and stage distance. *Journal of transport geography* 41: 137–147.
- Park, Yongha, e Morton E. O’Kelly. 2018. Examination of Cost-Efficient Aircraft Fleets Using Empirical Operation Data in US Aviation Markets. *Journal of Air Transport Management* 69 (junho): 224–34.  
<https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2017.02.002>.
- Rodríguez-Brindis, M. A., Mejía-Alzate, M., Zapata-Aguirre, S., 2015. La causalidad entre el crecimiento económico y la expansión del transporte aéreo: un análisis empírico para Chile. *Revista de Economía del Rosario* 18 (1), 127-144.
- Said, S.E., Dickey, D.A., 1984. Testing for a unit roots in autoregressive-moving average models of unknown order. *Biometrika* 71 (3), 599-607.
- Schnell, Mirko CA. 2005. Why do firms keep excess capacity? Testing hypotheses in the airline industry. *International Journal of Transport Economics/Rivista internazionale di economia dei trasporti*, 305–321.
- Shapiro, S. S. & Wilk, M. B.. *An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples.* *Biometrika* Trust, London, v. 52, p. 591–609, Dezembro 1965.
- Silva, Manoela Cabo da, Elton Fernandes, Ricardo Pacheco, e Heloisa Pires. 2018. Economic Growth Relations to Domestic and International Air Passenger Transport in Brazil. *International Journal of Transport and Vehicle Engineering* 12 (10): 1476–81.
- Simões, André Felipe, e Roberto Schaeffer. 2005. The Brazilian air transportation sector in the context of global climate change: CO2 emissions and mitigation alternatives. *Energy Conversion and Management* 46 (4): 501–513.

- Soytas, U., Sari, R., 2003. Energy consumption and GDP: causality relationship in G-7 countries and emerging markets. *Energy Economics* 25 (1), 33-37.
- Tervo, K. M. & H. Air transportation and regional growth: which way does the causality run? *Environment and Planning A*, 2013. 1508-1520.
- Toda, H., Phillips, P.C.B., 1993. Vector autoregressions and causality. *Econometrica* 61 (6), 1367-1394.
- Toda, H., Phillips, P.C.B., 1994. Vector autoregressions and causality: a theoretical overview and simulation study. *Econometric Reviews* 13 (2), 259-285.
- Twisk, Jos WR. 2013. *Applied longitudinal data analysis for epidemiology: a practical guide*. Cambridge University Press.
- Van De Vijver, E., Derudder, B., Witlox, F., 2014. Exploring causality in trade and air passenger travel relationships: the case of Asia-Pacific, 1980–2010. *Journal of Transport Geography* 34, 142–150.
- Vicini, L., & SOUZA, A. M. 2005. *Análise multivariada da teoria à prática*. Santa Maria: UFSM, CCNE.
- Wang, Shaojian, Chuanglin Fang, Yang Wang, Yongbin Huang, e Haitao Ma. 2015. Quantifying the Relationship between Urban Development Intensity and Carbon Dioxide Emissions Using a Panel Data Analysis. *Ecological Indicators* 49 (fevereiro): 121–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.10.004>.
- Wong, W. H., Zhang, A. M., Hui, Y. V., & Leung, L. C. 2009. Optimal Baggage-Limit Policy: Airline Passenger and Cargo Allocation. *Transportation Science*, 43(3), 355-369. doi:10.1287/trsc.1090.0266
- Wooldridge, Jeffrey M. 2010. *Introdução à Econometria. Uma Abordagem Moderna*. 1a edição. Cengage CTP.
- Zou, Bo, Matthew Elke, Mark Hansen, e Nabin Kafle. 2014. Evaluating air carrier fuel efficiency in the US airline industry. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 59: 306–330.
- Zou, G.; Chau, K.W. 2019. Long-and Short-Run Effects of Fuel Prices on Freight Transportation Volumes in Shanghai. *Sustainability*, 11, 5017.

## ANEXO 1

### MATRIZ DO TRANSPORTE DE CARGAS



Fonte: Ministério dos Transportes (2014)

### Transporte de Carga Aérea (Mundial)



Fonte: IATA Cargo Strategy (2015)



Article

## Energy Effectiveness of Jet Fuel Utilization in Brazilian Air Transport

Manoela Cabo <sup>1,2,\*</sup>, Elton Fernandes <sup>2</sup>, Paulo Alonso <sup>3</sup>, Ricardo Rodrigues Pacheco <sup>2</sup> and Felipe Fagundes <sup>2</sup>

<sup>1</sup> IBGE Brazilian Institute of Geography and Statistics, Av. República do Chile, 500-Centro, Rio de Janeiro-RJ 20031-170, Brazil

<sup>2</sup> COPPE Production and Transport Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro, Av. Pedro Calmon, 550-Cidade Universitária da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ 21941-901, Brazil; tgkoppo@gmail.com (E.F.); rpacheco48@gmail.com (R.R.P.); felipefagundes.jf@gmail.com (F.F.)

<sup>3</sup> Electronics and Communication Engineering Department, UERJ Rio de Janeiro State University, R. São Francisco Xavier, 524-Maracanã, Rio de Janeiro-RJ 20550-000, Brazil; alonso.psr@gmail.com

\* Correspondence: mcabo@impa.br; Tel.: +55-21-98206-3000

Received: 28 November 2019; Accepted: 27 December 2019; Published: 30 December 2019



**Abstract:** Since World War I, the commercial aviation industry has seen many improvements that now allow people and goods to reach the other side of the world in a few hours, consuming much less fuel than in recent decades. Improvements in cargo capacity and energy efficiency were significant, and in this scenario, commercial airlines were able to thrive and bring great benefits to the world economy. However, this sector is facing environmental challenges due to the intensive use of jet fuel. Brazil is one of the largest domestic air passenger markets in the world and still has great growth potential, considering its economic potential and territorial dimensions, which are roughly the same size as the US and twice the size of the European Union. This paper discusses the partial productivity of jet fuel in Brazilian domestic aviation and proposes an econometric method to support public regulators and airline decisions. The proposed model uses variables, such as aircraft size, route characteristics, and idle flight capacity, in a panel data analysis. The results show that reducing idle capacity is one of the best ways to achieve better short-term fuel efficiency, and therefore will reduce the environmental impacts and have positive economic effects on commercial air transport activities. This paper brings a new approach to the discussion of airline performance, focusing on the use of jet fuel, with economic and environmental consequences.

**Keywords:** jet fuel productivity; idle capacity; air transport; Brazil

### 1. Introduction

Research to improve jet fuel usage has been an ongoing effort for aviation companies and mainly airlines and turbines manufactures. Discussions on fuel consumption efficiency can help sustainable air transport activities around the world, and particularly in emerging countries, such as Brazil.

The aviation industry is at the forefront of industry when it comes to reducing the adverse impacts of its activities, which to some extent contribute to the economic efficiency and sustainability of air transport services. Market pressures, including regulatory measures and competition, require business productivity improvements, whether they are material suppliers (such as turbine and aircraft manufacturers), service providers (such as air navigation service providers), ground operators (such as airports), or the major entities in the production chain, the airlines themselves [1]. To some extent, the environmental and financial objectives of airlines are convergent with the airline's main

operating cost [2] and the idle capacity is a concern in any industry because it could result in increased capital needs and operating costs.

However, Schnell [3] suggests that airlines intentionally maintain idle resources to respond to uncertain demand, anticipated growth opportunities, and competition. This happens despite affecting the cost position of airlines by increasing the main operating cost component, which is fuel. In addition, environmental issues are on the agenda of all sectors. An important measure of efficiency in air transport is the weight carried by burnt fuel. This article discusses how to manage factors that affect partial jet fuel productivity and how to achieve a situation that will allow the air transport industry to sustainably improve. Fuel burn productivity can be influenced by the airline's idle capacity as expressed by the unused portion of the aircraft capacity (load factor), aircraft size, and weekly frequency, among other factors.

When an airline decides to take a specific route, it must make decisions about which aircraft to use and how often to fly a specific route. It also makes decisions about which aircraft model to use and its flight frequency. In this study, all variables were indicated by their annual averages on each route. Givoni and Rietveld [4] found that airlines' choice of aircraft size depends on the route characteristics rather than airport characteristics. Accordingly, aircraft size and flight frequency can be seen as representing the supply side of the route characteristics.

Although air transport is not on the list of the activities that most pollute the planet, its main environmental effect occurs at high altitudes, a very specific location and one that is of major concern to environmentalists [5]. As a result, because of their possible adverse impacts, air transport activities have been monitored with considerable attention.

In Brazil, fuel burn in domestic air transport constitutes the leading source of pollution by this sector. In that light, this paper examines how air transport performance has progressed in terms of its consumption of jet fuel and discusses the prospects for the future. An unsolved problem is to determine whether there is room to improve performance with existing technologies. Observation of real data in a market like Brazil's, estimated to become the fourth largest national market by the late 2020s [6], can yield important information regarding the world scenario. The paper's scientific contribution is concentrated on using an objective method to ascertain performance trend patterns in an industry that is important to the issue of sustainability and thus opening up a discussion on possible sector measures that can lead to new productivity gains, which are an essential factor for an industry with prospects of high growth rates in coming years.

#### *Literature Review*

Fuel burn correlates strongly with emissions, thus contributing directly to undesirable externalities in air transport [7] and it is the airlines' main cost item [2]. Papers examining issues relating to jet fuel burn generally address airlines' efficiency and their pollution potential, namely the depletion of oil and the possibility of replacing the fuel currently used with another that is less polluting, pollution-free, or renewable, the option of other means of transport, or even the introduction of an additional tax on jet fuel burn. Although no extensive literature review has been presented, studies considered relevant to defining the approach of this paper were selected.

Simões and Schaeffer [8] examined Brazilian air transport's contribution to greenhouse gas emissions. They offer a series of mitigation options, which include improving air traffic flow management, introducing a tax on each flight based on the jet fuel burn for the route, introducing intermodal options for the dense air connections between Rio de Janeiro and São Paulo by implementing a high-speed train, and so on. They also estimate that, if the recommendations they propose were applied, they would reduce long-term CO<sub>2</sub> emissions from air transport by 28.5%.

Chèze et al. [9] made projections for jet fuel demand in eight regions of the world for the period 2008–2025. Their forecasts were based on an econometric model using dynamic panel data. The main scenario they explored involved a 100% increase in world air traffic in the period, at an annual growth rate of 4.7%. In that same period, fuel burn would grow by 38%, at an annual 1.9%. They claim that this

growth in consumption already takes account of all efficiency improvements to turbines and aircraft aerodynamics. Accordingly, their opinion is that technological progress will continue to be essential to mitigating the impacts of increasing air traffic on fuel burn. Given that the improvements introduced have not been reflected in lower fuel burn rates, they alert that it will take industry-wide disruptive innovation for that scenario to change.

O’Kelly [10] examined the efficiency of hubs from the environmental standpoint using fuel burn as an indicator of environmental cost. He considered the fuel cost associated with larger aircrafts in order to determine the implications of high load factors on dense routes and thus to specify the implications for hub and gateway location. He showed that by adding a fixed charge when modelling fuel burn, a multiple-allocation hub-and-spoke model can be adjusted to direct flow to the inter-facility connector. Chang et al. [11] studied the economic and environmental efficiency of 27 global airlines in 2010 using a data envelopment analysis model with the weak disposability assumption. They concluded that Asian airlines are generally more efficient, while the operational and environmental performance of European and North American airlines are inefficient. Airlines’ inefficiency can be attributed to two main factors: inefficient fuel burn and a less diversified revenue structure.

Park and O’Kelly [12] estimated fuel burn by considering the distance between markets, with a given aircraft fleet composition and seat configuration. They concluded that distance is a crucial factor in estimating fuel burn: on long-haul routes, the lowest fuel burn rates are found in operations from 1000 to 2500 nautical miles. They speculated that fuel burn per seat-distance can be considered a criterion for levying environmental taxes on airlines. Zou et al. [13] investigated fuel efficiency among 15 main airlines and their subsidiaries in the United States. They found that fuel burn is amply explained by, and strongly correlated with, revenue passenger miles (RPMs) and the number of take-offs, and that although regional airlines have improved their accessibility provision, they display a higher fuel burn per RPM.

González and Hosoda [14] examined the growing impact of commercial aviation on CO<sub>2</sub> emissions in Japan, as well as the potential impact on climate change. The investigation comprised the effects of the jet fuel tax introduced by the Japanese government on all domestic flights. They used a time series model with monthly observations of fuel burn from 2004 to 2013. They estimated the amount of CO<sub>2</sub> emissions that would be produced in the event the fuel tax was not applied. Cui et al. [15], using data envelopment analysis, studied the impacts on airline performance resulting from emissions limits established by the European Union. They used total revenue as a desirable output and greenhouse gas emissions as an undesirable output. As input variables, they used the number of employees and jet fuel burn. The sample comprised 18 large global airlines, from 2008 to 2014, and the findings were in terms of which airlines showed the most potential for increasing their outputs. Cui and Li [16] used data envelopment analysis to measure the dynamic efficiency of 19 airlines from 2009 to 2014. The input variables selected were the number of employees and jet fuel burn, while the outputs were revenue tonne-kilometers, revenue passenger kilometers, and total revenue. The dynamic factor selected was capital stock. They concluded that Scandinavian, Emirates, and Cathay Pacific were the sample’s benchmark airlines.

Zou and Chau [17] estimated fuel price effects on freight volumes for various modes of transport in Shanghai. They found a causality running from rail to road transport where allocating more time and routes for rail freight traffic and reducing rail freight taxes can increase the volume of rail freight and thus decrease overall energy use. Their findings contribute to the economics of freight transport and correlate with the intent of our paper, which aimed to show that idle capacity utilization can bring fuel efficiency without increasing gas emissions.

It can be seen from the literature review that research into jet fuel burn is directed toward the environmental issue and leaves aside the discussion of financial benefits to airlines. There is a trend for such studies to address the issue of fuel burn in association with the definition of a benchmark company and its relationship with the environment. Mostly, there is a certain pessimism as to the possibility of significantly reducing fuel burn through short- to medium-term technological advances. However, there is the argument of the need for disruptive innovation in order to attain new levels of

efficiency. The literature reviewed offered no discussion of operational proceedings that airlines in general can introduce on routes to reduce jet fuel burn. This study also examined the mean partial productivity of fuel burn via air routes, regardless of the airline, in terms of idle capacity and other market characteristics in Brazilian regular domestic air transport. This knowledge will both assist airlines in their planning and operating procedures, and inform the government formulation of regulations and policies to stimulate air transport, all with due regard for environmental concerns.

Therefore, the main goal of this study was to examine jet fuel productivity as an important element in business costing and emissions. In developing countries, such as Brazil, where air transport is a small part of the transport matrix, the focus is not only on reducing emissions but also to address the responsible use of jet fuel, with idle capacity being a fundamental element for its productivity. Therefore, this work will be limited to the analysis of operational alternatives that could contribute to fuel productivity, as well as proposing short-term solutions to reduce the environmental impacts caused by the burning of jet fuel.

## 2. Materials and Methods

The choice of methods was based on the purpose of the research and the availability of information. In Brazil, there is no long-term time series information about air links. Another element is that jet fuel data is available only for domestic air companies. The panel data approach proved to be adequate because it has cross-section and periodic dependences that have specific characteristics. Initially, tests were performed by considering only one stage; however, the possibility of endogeneity in the variables was observed, and thus, the two-stage method with an instrumental variable was adequate. In addition, the statistical tests recommended the adoption of fixed effects, both in the cross-section and in the period. The choice of variables was the result of a search, even in other sectors of activity [3], which provided information related to the company's operating activities.

This research was developed following the steps shown in Figure 1. The first step was the motivation for this research and the second was to find a key performance indicator to measure jet fuel efficiency. In the third step, data that could be linked to jet fuel efficiency was collected and processed, available data were searched for, and the necessity of their preparation was verified. The fourth step was the effective preparation of the data. In the fifth step, the unbalanced panel data model was analyzed to understand which factors within the collected data could influence jet fuel efficiency. The sixth, seventh, and eighth steps involved the choice of the analytical methodology to be adopted and its results. For the final target, this research demonstrated that a reduction in the idle capacity for air transport can significantly improve environmental results.

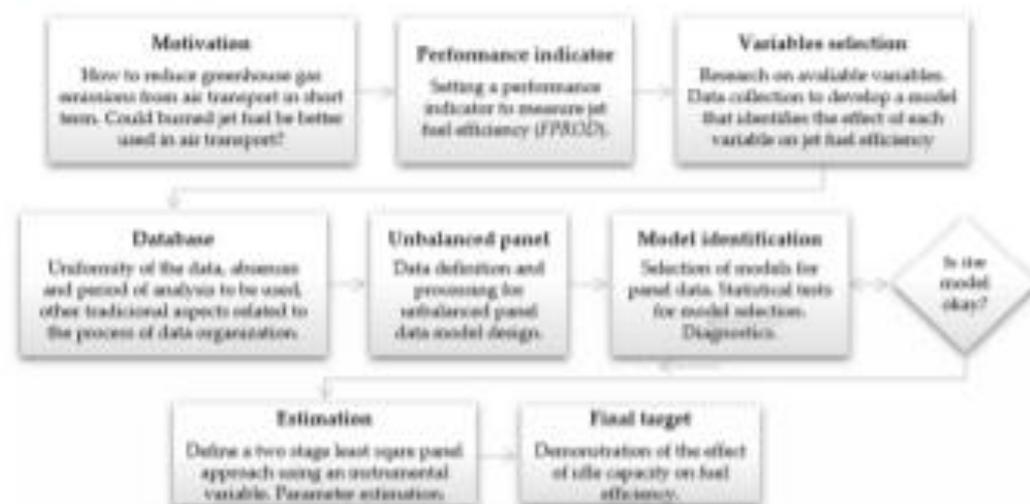


Figure 1. Flowchart that describes the steps developed in the research.

### 2.1. Analytical Methodology

Panel data is a structure that is recommended when the explanatory variables are time-dependent, also known as longitudinal data, representing repeated observations of a set of units in a cross-section. That is, the predictive and explanatory variables of interest are measured on different occasions, generally over time, for each single individual or element (in the case of this study, air routes). In longitudinal studies, the observations of an individual over time are correlated and thus demand statistical techniques that take account of that dependence [18]. Longitudinal data offer several advantages over data distributed over a cross-section or time series only. The benefits include being able to study dynamic relations over time and model differences among individuals [19]. Approaches using econometric analysis of panel data have evolved over the years and experts have developed several methodologies to contemplate specific characteristics of the observed data [20]. The literature recommends experimenting with various approaches in order to select the most appropriate modelling. Statistical tests have been developed to assist the process of selecting among approaches.

The analytical model proposed in this paper endeavored to explain the relationship between partial productivity of fuel and idle capacity. As the study focused on average air transport efficiency per route per year, no distinction was made between airlines and the aspects of competition among airlines on the routes were not addressed. It is important to point out that in the model addressed in this study, we aimed to explain a variable related to the operational cost of the route that is strongly linked to the fuel consumption. Thus, the productivity of the fuel in a specific route in a given year can be determined by operational characteristics of the airline company operating that route in that specific year. There is an expectation that with the passing of years, we can observe an improvement in the performance of airline companies related to fuel usage, either by the refinement of operational procedures or by continuous technological improvement in the industrial sector. In this sense, the hypothesis of a fixed or random annual effect was tested in the choice of the model. Another important aspect is the characteristics of each route that cannot be explained solely by the distance between two airports. It is necessary to consider an effect for each route that must be fixed or random, with the appropriate statistical tests carried out. Therefore, in order to confirm the suitable type of model, we will performed the following tests: redundant fixed effects or Chow test (likelihood ratio), omitted random effects (Lagrange multiplier), and correlated random effects (Hausman test) [19].

Once the panel data approach is defined, it is necessary to consider the possibility of endogeneity in the model, which can define a two-stage least squares panel approach using an instrumental variable. Therefore, the model included: a variable that represents the usage level of the airplanes (capacity), an operational variable defining the airline companies in the route, and an instrumental variable that could mitigate endogenous problems in the model. Other variables, such as waiting time and aircraft taxi data, also affect the partial fuel productivity, but no data were available to estimate their impact. For a thorough discussion of the two-stage least squares panel approach, see Hsiao [20], and for software implementation, see EViews 11 [21]. The dependent variable was the tonne-km transported per liter of fuel. The variable linked to the level of usage was the idle capacity, which was determined using the airplane's total capacity minus the annual average load factor. An airline company's operational decision regarding the operation of the route will be represented by the annual average payload offered on that particular route. The model's instrumental variable was the average weekly frequency of flights in a specific route per year. The proper effects of each route and of each period were defined in accordance with the results suggested by the statistical tests carried out (fixed or random effects). In the period considered, it a uniform pattern of the fleet usage was observed for the routes considered. Once the analysis was performed for each route per year, the specification and technical characteristics of the airplanes were not included in the formulation of the models. The software used to perform the regressions was the econometric software EViews 11 [21], which is a statistical modeling software. In general, for processing, there is no strict specification about the hardware as the model does not require much computational effort and can be processed on a personal computer. In this research, an Intel Core i7 computer with 16 GB RAM memory was used.

The equations' notation was in accordance with EViews 11 [21]; however, they were adapted for the study variables. All variables reflect the annual mean on each route (from city  $i$  to city  $j$ ) for each year  $t$ . The corresponding model used to estimate the regression parameters is shown in Equation (1).

$$\ln FPROD_{i,j,t} = c + \omega_{i,j} + \eta_t + \alpha \overline{IC}_{i,j,t} + \beta \ln ASIZE_{i,j,t} + \varepsilon_{i,j,t} \quad (1)$$

where

$c$ : constant

$\ln$ : the natural logarithm of the variables;

$\omega_{i,j}$ : estimated cross-section fixed effect coefficients;

$\eta_t$ : estimated period fixed effect;

$\alpha$  and  $\beta$ : estimated regression model coefficients;

$FPROD_{i,j,t}$ : mean fuel productivity on route  $i$  to  $j$  in year  $t$  (tonne-km/L);

$ASIZE_{i,j,t}$ : mean aircraft size on route  $i$  to  $j$  in year  $t$  (kg);

$\overline{IC}_{i,j,t}$ : mean idle capacity on route  $i$  to  $j$  in year  $t$  (ratio);

$\varepsilon_{i,j,t}$ : regression error.

$\overline{IC}_{i,j,t}$  is the instrumental variable, as given in Equation (2):

$$\overline{IC}_{i,j,t} = c + a \ln ASIZE_{i,j,t} + b \ln WF_{i,j,t} + u_{i,j,t} \quad (2)$$

where

$WF_{i,j,t}$ : mean weekly frequency on route  $i$  to  $j$  in year  $t$ ;

$u_{i,j,t}$ : regression error;

$c$ ,  $a$ , and  $b$ : estimated regression model coefficients.

## 2.2. Data

The data set was formatted as unbalanced panel data for domestic air routes in Brazil from 2007 to 2016. Although the database comprised information since 2000, the year 2007 was chosen for the analysis by considering the years when the four airline companies operating the domestic Brazilian air routes reached 90% of market share (see Table 1). From 2000 up until 2006, Brazil experienced a process of consolidation and bankruptcy of Brazilian airline companies, which caused the market to be unstable in terms of its operational conditions. From 2007 on, two airline companies, TAM and GOL Airlines, dominated the Brazilian domestic air market. After this year, AVIANCA Airlines, which entered the market in 2003, began to have a significant share; in 2008, AZUL Airlines entered the market, very quickly increasing its share. In 2016, these four companies represented 99% of the market share for commercial domestic routes. The evolution of participation in revenue passenger-kilometers (RPKs) in the total of Brazil is shown in Table 1. As the structure of the Brazilian domestic air transport is almost the same in 2019, and there were no substantial changes in the fleet of aircrafts, we believe that the research results are still valid.

The annual information was organized using the available Brazilian National Civil Aviation Agency (ANAC) database. The main reason the data set was unbalanced is the variation in Brazil's air transport network during the study period, especially the regional routes. In the case of missing data, the unbalanced panel considered all underlying information, such as years, not excluding the cross-section by total. Additionally, to avoid the presence of outlier data, two conditions were established for the sample. The first considered that the route should have at least an average of one round trip per week, this filter selected the regular routes, removing any outlier from the base. The second established that the load factor should be higher than 10%. These two conditions limited the sample to regular operations throughout the year, avoiding seasonal or sporadic operations.

**Table 1.** The four main airlines' percentage of the Brazil's total domestic RPK.

ANO	TAM	GOL	AZUL	AVIANCA	TOTAL
2000	14%	0%			14%
2001	30%	5%			35%
2002	34%	11%			45%
2003	32%	19%		0%	51%
2004	35%	21%		0%	56%
2005	42%	26%		0%	68%
2006	48%	34%		1%	84%
2007	48%	40%		2%	90%
2008	50%	37%	0%	3%	90%
2009	45%	41%	4%	3%	92%
2010	43%	40%	6%	3%	91%
2011	40%	37%	9%	3%	89%
2012	40%	34%	10%	5%	90%
2013	40%	35%	13%	7%	95%
2014	38%	36%	17%	8%	99%
2015	37%	36%	17%	9%	99%
2016	35%	36%	17%	11%	99%

Once there was a relation linking the amount of fuel an airplane needed at the moment of take-off, the total weight of the airplane, the embarked weight, and the destination airport, an approach to measure the partial productivity of fuels was the transported weight per fuel unity because this ratio reveals the specific average performance of fuel usage, which is an important input for airline companies. Thus, in this study, we adopted the work load unit (WLU) as an indicator of the weight being transported. Fuel is the most relevant item in the increasing of airline companies' operational costs in Brazil. Estimates indicate that 40% of those total operational costs are due to the fuel consumption.

Fuel efficiency was chosen as the dependent variable because it displays characteristics that are important both to airline performance and to monitoring the use of this resource and related environmental impacts. Airlines reduce their operating costs by increasing the productivity of this important item on their cost spreadsheets. Meanwhile, society benefits from an activity that is essential to economic and social development through its efficient use for which there is, as yet, no alternative, but which results in adverse environmental impacts. Another no less important aspect is that productivity is fundamental to economic and social development, and no measure should neglect this variable as it is an important item in the decision-making process in terms of both air transport policy and airline operations planning. At present, one prominent policy aspect is the restriction on pollutant gas emission levels. The fuel productivity variable is expressed by Equation (3):

$$FPROD_{i,j,t} = \frac{RTK_{i,j,t}}{FUEL_{i,j,t}}, \quad (3)$$

where

$RTK_{i,j,t}$ : total revenue tonne-kilometers on route  $i$  to  $j$  in year  $t$ ;

$FUEL_{i,j,t}$ : total fuel burn on route  $i$  to  $j$  in year  $t$  (liter).

A revenue tonne-kilometre (RTK) is generated when a metric tonne of revenue load is carried one kilometer. Where that load includes a passenger load, the number of passengers is converted into a weight load, usually by multiplying this number by 90 kg (to include baggage). This figure is based on Doganis [22], which reports that most airlines use 90 kg to express a passenger and baggage, so 11,111 passengers are equivalent to 1 tonne.

The independent variable of the model, the idle capacity ( $1 - LF_{i,j,t}$ ), represents what percentage of capacity offered is not used by the market. The load factor variable ( $LF_{i,j,t}$ ) is estimated as the ratio of

RTK to ATK. The available tonne-kilometers (ATK) is the volume of tonne-kilometers offered, that is, the sum of the product of payload (the total available load weight per aircraft available for transporting passengers, freight, and post) and the route distance. A high load factor means that the flight is being more fully utilized, and accordingly, it is expected that fuel burn productivity will be higher. This is one of the main indicators of air transport performance and will be significantly related to the partial productivity of fuel. The variable  $LF_{i,j,t}$  is expressed using Equation (4):

$$LF_{i,j,t} = \frac{RTK_{i,j,t}}{ATK_{i,j,t}}, \quad (4)$$

where

$RTK_{i,j,t}$ : total revenue tonne-kilometers on route  $i$  to  $j$  in year  $t$ ;

$ATK_{i,j,t}$ : total available tonne-kilometers (supplied) on route  $i$  to  $j$  in year  $t$ .

The aircraft size variable ( $ASIZE_{i,j,t}$ ) is represented using the mean payload supplied on the route in a certain year. The variable  $ASIZE_{i,j,t}$  (in kg) it is expressed using Equation (5):

$$ASIZE_{i,j,t} = \frac{PAYLOAD_{i,j,t}}{TAKEOFFS_{i,j,t}}, \quad (5)$$

where

$PAYLOAD_{i,j,t}$ : total payload supplied on route  $i$  to  $j$  in year  $t$  (kg);

$TAKEOFFS_{i,j,t}$ : total take-offs on route  $i$  to  $j$  in year  $t$ .

This is a decisive variable through which the airline determines how much transport capacity to offer on the market. Although cases of over-supply may exist for reasons of competition, such cases are distributed across all operations on the route in the year, thus reducing the bias that such cases can cause in assessing the variable. As the study worked with a very large data set, it is to be expected that such distortions will be minimized.

As the presented model suggests the possibility of endogeneity, it was necessary to include a decision variable related to the airline companies in order to mitigate this problem. This was done using a two-stage least squares panel model estimation. The chosen variable was the average weekly frequency of take-offs observed in a specific year for that route. This variable is defined according to Equation (6):

$$WF_{i,j,t} = \frac{TAKEOFFS_{i,j,t}}{52}, \quad (6)$$

where

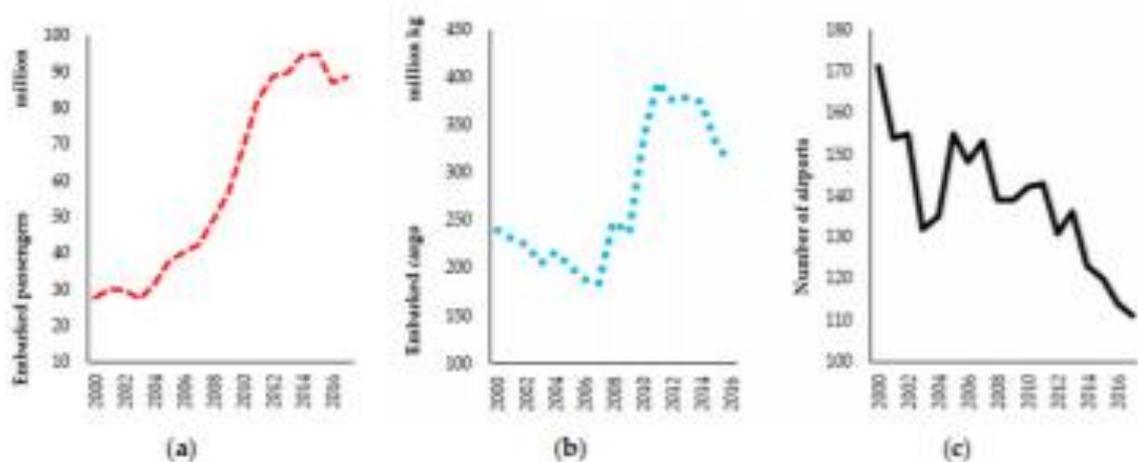
$WF_{i,j,t}$ : average weekly frequency on route  $i$  to  $j$  in year  $t$ .

### 3. Results

#### 3.1. Case Study

Brazil covers a geographical area of 8.5 million km<sup>2</sup>, making it the world's fifth largest country, after Russia, Canada, China, and the United States. After Brazil, the countries with the largest territories are Australia and India. It also has the fifth-largest population: 205 million in 2015. Its economy ranks seventh, with a gross domestic product (GDP) of about 3.192 trillion Int\$ (PPP \$—International dollar) in 2015. However, also in 2015, with a per capita GDP of about 15,600 Int\$, Brazil ranked only 76th, far from the group classified as developed countries, as is also the case with other countries with large territories and significant GDPs, such as Russia, China, and India. Brazil is a federal republic of 26 states and a federal district (the capital city). Each Brazilian state has a municipality where the state capital city is located. Brazil has 5570 municipalities, of which, 309 had populations of more than 100,000

residents in 2016, a condition that may be considered attractive for air transport operations when the town is at a certain distance from any airport with regular air transport. Rail passenger transport is practically non-existent, and the road transport network is weak in much of Brazil, particularly in the mid-western and northern regions, and in a large part of the northeast. Figure 2a–c shows the number of domestic embarked passengers, amount of cargo embarked at Brazilian airports, and the number of towns served by regular domestic air transport, respectively. Domestic air transport accounts for 90% of the passengers embarked at Brazil's airports, which was just over 85 million passengers in 2016. Meanwhile, it is important to note that, from 2015 to 2016, the number declined as a result of the severe political and financial crisis affecting Brazil. Domestic cargo grew between 2007 and 2011 but has subsequently steadily declined. The number of airports offering regular domestic air transport services has decreased over the years, indicating that traffic is being directed toward higher-density routes where it is easier to optimize operations.



**Figure 2.** (a) Domestic embarked passengers in million, (b) domestic embarked cargo movement in million (kg), and (c) number of airports. Source: Brazilian National Civil Aviation Agency (ANAC).

Table 2 shows the passenger aircraft fleets of the Brazilian air transport airlines for a set of years. The figures in the table show a decreasing number of smaller aircraft, while the number of those with more seats are growing, a trend that is significant when thinking about Brazilian regular air transport. The two first levels of Table 2 show significant changes throughout the years and are linked to an important reduction of the regional routes in the period. We can see that in the case of regional routes, there is a trend toward standardization of airplanes in the range of 51–150 seats. In the three intermediary levels, we see a diminishing of the number of airplanes due to a search for optimization in domestic traffic related to regular and non-regular main routes. The two lowest levels of airplanes are related to long-haul international routes, which are not addressed in this paper.

**Table 2.** Aircraft fleet of Brazilian airlines in 2000, 2007, and 2016.

Seats	2000	2007	2016
Up to 50	141	122	6
51–100	-	36	52
101–150	212	182	139
151–200	13	226	211
201–250	13	50	48
251–300	13	14	5
Over 300	-	-	16
Total	405	630	498

Source: ANAC.

The movement is consistent with efforts by airlines, which are undergoing financial difficulties and have not returned positive financial statement balances in recent years, to optimize their operations. This trend reduces the flexibility available to airlines for matching supply and demand, particularly for regional aviation routes where demand is fluctuating.

Tables 3 and 4 show, respectively, the descriptive statistics and correlation matrix of the variables used in the analysis in terms of the natural logarithm and their specific units. By and large, all the variables can be seen to vary substantially about the mean, where the upper and lower values are quite distant. de Neufville [23] argues that short distances in air transport increases the effective fares. In the case of Brazil, these increases make the connection very irregular and not sustainable. Although arbitrary, the minimum flight distance considered for analysis was 200 km, which is regarded as reasonable by authors for establishing regular flights between two localities in this country.

**Table 3.** Descriptive statistics for variables of the model.

Variables	$\ln (FPROD_{i,j,t})$	$\ln (IC_{i,j,t})$	$\ln (ASIZE_{i,j,t})$	$\ln (WF_{i,j,t})$
Upper	2.82	-0.22	10.47	6.57
Lower	-4.13	-4.30	7.59	0.00
Mean	0.50	-0.90	9.30	2.47
Standard deviation	0.43	0.31	0.51	1.22
Observations	5839			
Correlation Matrix				
$\ln (FPROD_{i,j,t})$	1			
$\ln (IC_{i,j,t})$	-0.70	1		
$\ln (ASIZE_{i,j,t})$	0.52	-0.31	1	
$\ln (WF_{i,j,t})$	0.22	-0.23	0.53	1

**Table 4.** Descriptive statistics for variables of the model without the logarithm.

Variables	$FPROD_{i,j,t}$	$IC_{i,j,t}$	$ASIZE_{i,j,t}$	$WF_{i,j,t}$
Upper	16.80	0.80	35,100	714
Lower	0.02	0.01	1980	1
Mean	1.79	0.43	12,246	26
Standard deviation	0.73	0.12	5165	50
Observations	5839			
Correlation Matrix				
$FPROD_{i,j,t}$	1			
$IC_{i,j,t}$	-0.69	1		
$ASIZE_{i,j,t}$	0.49	-0.31	1	
$WF_{i,j,t}$	0.027	-0.08	0.31	1

In the period 2007–2016, the means of all variables had a favorable variation for the improvement of performance (Table 5). Fuel productivity improved in regular domestic aviation in Brazil. From 2007 to 2016, the annual mean RTK per liter of fuel observed in the sample increased from 1.95 to 2.40. The annual mean of IC reduced from 0.42% to 0.34%, the annual mean of ASIZE reduced from 17,310 kg to 16,483 kg, and the annual mean of WF increased from 8841 to 15,087 per week.

**Table 5.** Annual evolution of the annual mean of *FPROD*, *IC*, *ASIZE*, and *WF* from 2007 to 2016. *RTK*: revenue tonne-kilometers.

Year	<i>FPROD</i> ( <i>RTK/L</i> )	<i>IC</i> (%)	<i>ASIZE</i> (kg)	<i>WF</i> (Per Week)
2007	1.95	0.42	17,310	8841
2008	1.95	0.41	17,215	9231
2009	1.96	0.34	14,892	10,697
2010	2.11	0.36	16,458	12,208
2011	2.19	0.35	16,484	13,676
2012	2.19	0.34	16,359	14,352
2013	2.19	0.33	16,344	15,169
2014	2.30	0.31	15,491	17,172
2015	2.29	0.34	16,080	16,942
2016	2.40	0.34	16,483	15,087

### 3.2. Panel Analysis

As described in the Material and Methods section, the Chow, Breusch-Pagan, and Hausman tests were applied for the definition of the estimation pool, with fixed or random effects for the cross-sections and the periods. The Chow test (Table 6) rejected ( $p$ -value < 0.05) the null hypothesis of the pool estimation for the cross-sections and the periods, suggesting that the fixed effects were more suitable.

**Table 6.** Redundant fixed-effects tests (Chow test).

Test Cross-Section and Period Fixed Effects			
Effects Test	Statistic	d.f.	$p$ -Value
Cross-section F	9.91	(987)	0.00
Period F	21.18	(9)	0.00
Cross-Section/Period F	10.22	(996)	0.00

The tests to verify the random effects versus no effect (pool) also rejected the null hypothesis of the pool modelling ( $p$ -value < 0.05), suggesting in this case that the random effect was the most suitable. Table 7 shows the results of the tests performed.

**Table 7.** Lagrange multiplier tests for random effects (Breusch-Pagan Lagrange multiplier).

	Test Hypothesis		
	Cross-Section	Time	Both
Breusch-Pagan $p$ -value	4624.83 (0.00)	811.51 (0.00)	5436.34 (0.00)

For the definition between the fixed and random effects for the cross-sections and the periods, the Hausman Test was applied (Table 8). For both the cross-sections and the periods, the Hausman test rejected the null hypothesis for random effects ( $p$ -value < 0.05). In this case, the modeling developed considered the fixed effects for cross-sections and for periods.

**Table 8.** Correlated random effects using the Hausman test.

Test Summary	$\chi^2$ Statistic	$\chi^2$ d.f.	$p$ -Value
Cross-section random	304.02	2	0.00
Period random	8.45	2	0.01

After examining the various possible options for evaluating panel data modeling, a two-stage least squares panel regression model was selected as the most suitable estimator for this analysis. The Chow test (for cross-section fixed effects) indicated that the fixed-effect model fitted better than the pool approach. On the same way, Breusch-Pagan Lagrange multiplier test indicated that random fixed effects fitted better than the pool approach. Finally, the Hausman test (for cross-section random effects) showed that the fixed effect was also better suited than the random-effect for both the cross-section and period. Table 9 shows the result of the regression model applied in the study.

**Table 9.** Two-stage least squares panel regression model.

Dependent Variable: $\ln (FPROD_{i,t})$				
Periods Included: 10; Cross-Sections Included: 988				
Total Panel (Unbalanced) Observations: 5839				
Instrument Specification: $\ln (ASIZE_{i,t})$ , $\ln (WF_{i,t})$ , and C				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
$\ln (\overline{IC}_{i,t})$	-0.94	0.47	-2.01	0.04
$\ln (ASIZE_{i,t})$	0.48	0.15	3.24	0.00
C	-4.81	1.80	-2.67	0.01
Effects Specification				
Cross-section fixed (dummy variables)				
Period fixed (dummy variables)				
R <sup>2</sup>				0.84
Adjusted R <sup>2</sup>				0.81

#### 4. Discussion

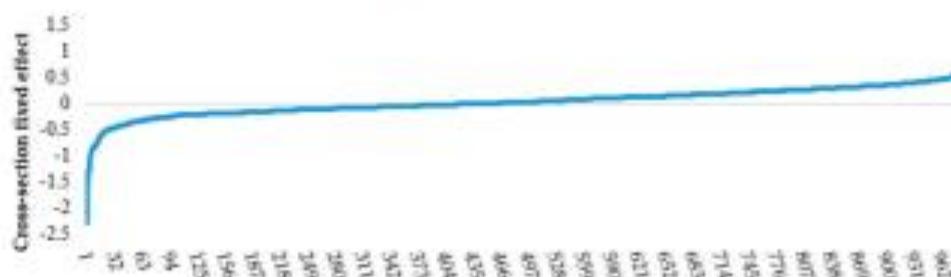
The coefficients of the explanatory variables (Table 6) represent the constant elasticities of each of them in relation to a dependent variable. The constant elasticity hypothesis can be considered a limitation of the model. However, it is reasonable in that the operating technology in question is similar in all the airlines and no technology breakthrough was observed in the study period. This was confirmed to some extent by the high level of significance of the coefficients of the independent variables. The elasticity of  $IC_{i,t}$  (-0.94) indicated the negative impact that idle capacity had over fuel productivity; furthermore, the elasticity of  $ASIZE_{i,t}$  (0.48) showed a positive impact. These two variables can be managed by airlines when they define their level of supply and target market. The variation in the annual means of the variables from 2007 to 2016 shows that the Brazilian airlines are working in the right direction. However, the high level of idle capacity (Table 5) indicates that there is significant room for improvements in operations. It is not only a question of attracting more passengers to air transport, but also of attracting more cargo and postal business. This is not exclusively up to the airlines: the logistical conditions of airport access and bureaucratic streamlining of tax procedures are also extremely important to making this modality of cargo transport more attractive.  $IC_{i,t}$  is much more elastic than  $ASIZE_{i,t}$ , and accordingly, it should be borne in mind that good productivity can be attained by focusing on  $IC_{i,t}$ , with no need to abandon lower-density regional routes. The idea is to have a balanced fleet and frequency suited to the type of network that is possible for the Brazilian market. Should the fleet development trend observed in Table 2 continue, the only alternative will be to largely abandon the regional routes, which is neither good for Brazil's economic development nor for the future of regular domestic aviation.

Table 10 shows the period fixed effect dummy variable coefficients from 2007 to 2016. They show no trend toward a positive influence in the fuel performance, where four out of ten coefficients are negative. Although the balance is positive, it is a very small positive effect. Considering that, it may be said that technological advancements did not contribute much toward the fuel performance improvement. Only a technological breakthrough in air transport could change that scenario.

**Table 10.** Period fixed effect.

Year	Effect
2007	0.051331
2008	0.000610
2009	-0.044556
2010	0.068665
2011	0.037720
2012	0.005737
2013	-0.003723
2014	-0.075073
2015	-0.030518
2016	0.014526

Figure 3 shows the cross-section fixed effect coefficients. From the 988 cross-sections of the study, 550 had a positive dummy coefficient and 438 had a negative one. The dummy coefficients varied from -2.29 to 0.88. Among the 988 cross-sections, 23 had coefficients between -0.50 and -2.29. In contrast, 15 routes had coefficients between 0.50 and 0.88. From this, it is possible to say that only a few routes offered extremely negative or positive operational conditions.

**Figure 3.** Cross-section fixed effect coefficients.

This paper started with the observation of Schnell [3] regarding airlines keeping the excess capacity to cope with future demand or competition. Rationality makes the industry less competitive and inefficient in relation to costs. Once a flight has already occurred, its unused payload represents lost revenue, impacting the company results. This looks like a predation strategy and not a good competitive strategy. Naturally, the reduced supply may lead to customer discomfort, which is another important point in the analysis. However, when considering an activity that is important to a society's economic development but has adverse collateral effects on the environment (which belongs to the whole society), one has to strive for high levels of performance in the use of resources that produce the effect in question. It is important to raise air transport user awareness of the environmental problems connected with this form of transport to raise the tolerance of any possible discomfort that may be necessary in order to increase the productivity of jet fuel burn. In air transport, idle capacity can be divided into two components: the first is where an airline retains capacity that it does not use, such as an aircraft that is idle for lack of demand, while the second is more detrimental, involving non-use of a service, which is the case of unused capacity on a flight. The latter, in addition to generating operating costs with no revenue offset, produces environmental harm. Obviously, it is impossible to eliminate all such idle capacity, but airlines and regulators should seek to develop mechanisms to reduce idle capacity in this industry.

Recent studies have used panel data analysis to find and measure variables related to pollutant emissions, for example, References [24–27]. Aside from this, but aiming toward the same goal, this work analyzed the efficiency of jet fuel use considering its partial productivity (in tonne-km/L). The insight presented here demonstrated that there is another way to reduce air transport pollutant emissions, i.e., by reducing idle capacity.

Another important concern for countries' air transport policy making is the introduction of a pollution tax on airlines, which will inevitably be transferred to the fare prices the airlines charge their customers. In developing countries, such as Brazil, where air transport is under-used and whose transport networks display a number of deficiencies, this subject should be studied with care. If not deployed appropriately, such a tax could be a disincentive to the use of air transport, and by transferring part of the demand to road transport, causing more economic and environmental harm than benefits. Air transport policy should use the tax as an incentive to improve fuel burn productivity by not taxing high-productivity flights, thus encouraging airlines to refine their business portfolios by acting more representatively in cargo transport, for instance. The emphasis on productivity would stimulate airlines to strive for a greater operational efficiency, rather than being discouraged by a market retraction due to higher operating costs.

This discussion indicates that the reduction of idle capacity is the most important operational variable in improving the efficiency of the air fleet in Brazil. A limitation of the study is the standardization that occurred in the Brazilian airline fleet that may not occur in other countries, which gives a certain peculiarity to the case. Park and O'Kelly [28] studied the operating cost of aircraft efficiency in the US aviation market. They concluded that an efficient fleet is composed of mixed-size aircraft as an alternative to a variety of markets. Larger aircrafts tend to be more efficient, using less fuel per passenger [29]. However, for the Brazilian case, the fleet is very similar between airlines, with no large variation in aircraft size, thus in the short term, to measure the efficiency, only the analysis of idle capacity was considered. In an open sky situation, a greater variation of equipment can be observed in the same air route, which can produce different results.

## 5. Conclusions

This paper presented an approach that yielded objective measures for the relation between jet fuel burn, airline operating procedures, and future developments regarding fuel efficiency. It also revealed a convergent association between improved airline operations and finances and reduced aircraft fuel burn, resulting in lower pollutant gas emissions. Using a productivity approach, in physical terms regarding the airlines' main operating cost item, the paper discussed the possibilities of improving the partial productivity of jet fuel for Brazilian regular domestic air transport. In that context, it addressed opportunities for the improvement in technological, regulatory (government), and operational (airline) terms.

Domestic air transport in Brazil offers significant opportunities for improving performance through operational factors. Very high idle capacity can be reduced through operations by making better use of the payload supplied; this improvement can be obtained by developing cargo transport and higher seat-occupation rates. To that end, airlines must manage their service supply and prices more efficiently. Regulatory agencies can contribute significantly by setting standards favoring airlines that achieve lower idle capacity. For example, approval for new frequencies could be made conditional on achieving idle capacity that is more compliant with standards set by the regulator regarding ATK not used per liter of fuel, which is the variable considered for analysis here. The study shows important opportunities for improving airlines' financial performance and making fuel burn more efficient in regular domestic air transport in Brazil. Table 5 shows that although idle capacity is reducing in the regular domestic air transport in Brazil, it is still very high.

Airlines should be encouraged to increase the aircraft size only on routes that can support such growth without a decline in load factor. The study confirms that from both environmental and financial standpoints, it is important that airlines operate with the lowest possible idle capacity, as can be seen from the elasticity performance of this factor in the model shown in Table 9. Airlines' fleet composition is fundamental in order to serve their networks with the lowest possible idle capacity. Increasing aircraft size without prior study and proper regulatory procedures can lead to regional aviation being abandoned or neglected, as has been the trend in Brazilian domestic air transport.

A potential future study would involve a comparison of the fuel efficiency of different airlines operating in developing countries, seeking to identify benchmarks for the airline industry.

**Author Contributions:** Conceptualization, E.F. and R.R.P.; formal analysis, E.F., M.C., P.A., and R.R.P.; funding acquisition, E.F., F.F., M.C., P.A., and R.R.P.; investigation, E.F., M.C., P.A., and R.R.P.; project administration, M.C.; writing—original draft, E.F., M.C., P.A., and R.R.P.; writing—review and editing, E.F., F.F., M.C., P.A., and R.R.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Acknowledgments:** The authors would like to thank the editor and anonymous reviewers for their insightful comments and suggestions.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflicts of interest.

## References

1. Fernandes, E.; Pacheco, R.R. *Transporte Aéreo no Brasil: Uma Visão de Mercado*; Elsevier: Rio de Janeiro, Brazil, 2016.
2. Doganis, R. *Flying Off Course: Airline Economics and Marketing*; Routledge: London, UK, 2009. [[CrossRef](#)]
3. Schnell, M.C. Why Do Firms Keep Excess Capacity? Testing Hypotheses in the Airline Industry. *Int. J. Transp. Econ. Riv.* **2005**, *32*, 305–321.
4. Givoni, M.; Rietveld, P. Choice of Aircraft Size—Explanations and Implications. In *Tinbergen Institute Discussion Paper TI 2006-113/3*; Tinbergen Institute: Amsterdam, The Netherlands, 2006; pp. 1–18.
5. Daley, B. *Air Transport and the Environment*; Routledge: New York, NY, USA, 2016.
6. ACI Releases its Global Traffic Forecast 2012–2031: Global Passenger Traffic Will Top 12 Billion by 2031. Available online: [AcI.aero/news/2012/10/25/acI-releases-its-global-traffic-forecast-2012-2031-global-passenger-traffic-will-top-12-billion-by-2031/](http://AcI.aero/news/2012/10/25/acI-releases-its-global-traffic-forecast-2012-2031-global-passenger-traffic-will-top-12-billion-by-2031/) (accessed on 25 November 2019).
7. Dessens, O.; Köhler, M.O.; Rogers, H.L.; Jones, R.L.; Pyle, J.A. Aviation and Climate Change. *Transp. Policy* **2014**, *34*, 14–20. [[CrossRef](#)]
8. Simões, A.F.; Schaeffer, R. The Brazilian Air Transportation Sector in the Context of Global Climate Change: CO<sub>2</sub> Emissions and Mitigation Alternatives. *Energy Convers. Manag.* **2005**, *46*, 501–513. [[CrossRef](#)]
9. Chèze, B.; Gastineau, P.; Chevallier, J. Forecasting World and Regional Aviation Jet Fuel Demands to the Mid-Term (2025). *Energy Policy* **2011**, *39*, 5147–5158. [[CrossRef](#)]
10. O’Kelly, M.E. Fuel Burn and Environmental Implications of Airline Hub Networks. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2012**, *17*, 555–567. [[CrossRef](#)]
11. Chang, Y.T.; Park, H.; Jeong, J.; Lee, J. Evaluating Economic and Environmental Efficiency of Global Airlines: A SBM-DEA Approach. *Res. Part D Transp. Environ.* **2014**, *27*, 46–50. [[CrossRef](#)]
12. Park, Y.; O’Kelly, M.E. Fuel Burn Rates of Commercial Passenger Aircraft: Variations by Seat Configuration and Stage Distance. *J. Transp. Geogr.* **2014**, *41*, 137–147. [[CrossRef](#)]
13. Zou, B.; Elke, M.; Hansen, M.; Kalle, N. Evaluating Air Carrier Fuel Efficiency in the US Airline Industry. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2014**, *59*, 306–330. [[CrossRef](#)]
14. González, R.; Hosoda, E.B. Environmental Impact of Aircraft Emissions and Aviation Fuel Tax in Japan. *J. Air Transp. Manag.* **2016**, *57*, 234–240. [[CrossRef](#)]
15. Cui, Q.; Wei, Y.M.; Li, Y. Exploring the Impacts of the EU ETS Emission Limits on Airline Performance via the Dynamic Environmental DEA Approach. *Appl. Energy* **2016**, *183*, 984–994. [[CrossRef](#)]
16. Cui, Q.; Li, Y. Airline Efficiency Measures Using a Dynamic Epsilon-Based Measure Model. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2017**, *100*, 121–134. [[CrossRef](#)]
17. Zou, G.; Chau, K.W. Long- and Short-Run Effects of Fuel Prices on Freight Transportation Volumes in Shanghai. *Sustainability* **2019**, *11*, 5017. [[CrossRef](#)]
18. Twisk, J.W. *Applied Longitudinal Data Analysis for Epidemiology: A Practical Guide*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2013.
19. Frees, E.W. *Longitudinal and Panel Data: Analysis and Applications in the Social Sciences*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2004.
20. Hsiao, C. *Analysis of Panel Data*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2014.
21. Eviews 11. *Eviews 11 User’s Guide II—Instrumental Variables*; Eviews 11, Ed.; IHS Global Inc.: London, UK, 2019; pp. 1038–1040.

22. Doganis, R. *The Airport Business*, 1st ed.; Routledge: London, UK, 1992.
23. de Neufville, R. *Airport Systems Planning*; MIT Press: Cambridge, MA, USA, 1976.
24. Li, T.; Wang, Y.; Zhao, D. Environmental Kuznets Curve in China: New Evidence from Dynamic Panel Analysis. *Energy Policy* **2016**, *91*, 138–147. [[CrossRef](#)]
25. Azam, M. Does Environmental Degradation Shackle Economic Growth? A Panel Data Investigation on 11 Asian Countries. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *65*, 175–182. [[CrossRef](#)]
26. Wang, S.; Fang, C.; Wang, Y.; Huang, Y.; Ma, H. Quantifying the Relationship between Urban Development Intensity and Carbon Dioxide Emissions Using a Panel Data Analysis. *Ecol. Indic.* **2015**, *49*, 121–131. [[CrossRef](#)]
27. Kasman, A.; Duman, Y.S. CO<sub>2</sub> Emissions, Economic Growth, Energy Consumption, Trade and Urbanization in New EU Member and Candidate Countries: A Panel Data Analysis. *Econ. Model.* **2015**, *44*, 97–103. [[CrossRef](#)]
28. Park, Y.; O’Kelly, M.E. Examination of Cost-Efficient Aircraft Fleets Using Empirical Operation Data in US Aviation Markets. *J. Air Transp. Manag.* **2018**, *69*, 224–234. [[CrossRef](#)]
29. Brueckner, J.K.; Abreu, C. Airline Fuel Usage and Carbon Emissions: Determining Factors. *J. Air Transp. Manag.* **2017**, *62*, 10–17. [[CrossRef](#)]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## ANEXO 3

Economic Growth Relations to Domestic and International Air Passenger Transport in Brazil;  
International Journal of Business, Human and Social Sciences, ISSN: 2517-9411  
Vol:12, No:10, 2018, DOI 10.5281/zenodo.1475035

**Abstract**— This study examined for cointegration and causal relationships between economic growth and regular domestic and international passenger air transport in Brazil. Total passengers embarked and disembarked were used as a proxy for air transport activity and gross domestic product (GDP) as a proxy for economic development. The test spanned the period from 2000 to 2015 for domestic passenger traffic and from 1995 to 2015 for international traffic. The results confirm the hypothesis that there is cointegration between passenger traffic series and economic development, showing a bi-directional Granger causal relationship between domestic traffic and economic development and unidirectional influence by economic growth on international passenger air transport demand. Variance decomposition of the series showed that domestic air transport was far more important than international transport to promoting economic development in Brazil.

**Keywords**— Air passenger transport, Cointegration, Economic Growth, GDP, Granger causality.

### I. INTRODUCTION

How the air transport industry contributes to countries' economies is a subject for heated debate in the sector. The arguments in this regard rest on economic calculations of direct, indirect, induced and tourism-catalytic impacts on countries' gross domestic product (GDP). In Brazil, the Brazilian Airlines Association (Associação Brasileira de Empresas Aéreas, ABEAR) has led this discussion in its periodical reports [1]. In fact, the discussions of the impact of air transport published in technical reports by ABEAR [1] and international institutions, such the Air Transport Action Group (ATAG) [2], relate more to air transport's share in country and world GDPs than to the problem of causality.

The industry is intensive in three scarce economic resources: financial capital, technology, and human capital. Since 2015, Brazil has entered one of the most difficult periods in its economic history, with the economy showing signs of weakening and increasing austerity in capital spending and, in 2015, went into recession, as GDP contracted by 3.8% [1]. A series of air transport-related measures have been taken as one avenue to restoring sustainable economic growth in Brazil. These include the liberalisation of domestic and international air transport, bilateral agreements to distend operating limits and extend freedoms of the air, airport concessions and campaigns to attract international mega-events. Fernandes and Pacheco (2010) [3], using passenger-kilometres as a proxy for *domestic* air transport, only transport inside the country, found evidence of cointegration and one-way causality between domestic air transport and GDP. However, their analysis considered neither passengers embarked and disembarked at airports nor international passenger movement. The cutbacks in connections and in Brazilian airline fleets in 2016 demonstrate that their analysis was correct. International and domestic movements display different dynamics. The literature on the subject is in general agreement that there is a relationship between GDP and passenger transport, but it is unknown what behavior that relationship takes at any given time or country. This study examined for the existence of cointegration, and the direction of causality, between GDP and domestic and international passenger movement at airports in Brazil. That information is important to decision making on incentives and resource

---

allocation in air transport industry infrastructure in Brazil.

## II. Literature review

A number of published studies relate air transport growth to government measures to liberalise prices, extend freedoms of the air and privatise infrastructure. Some relate air transport to income expressed by GDP or per capita GDP. However, few studies venture to explain the related causality. In particular, studies of Granger causality among macroeconomic series have been little used in relation to air transport.

Kuledran and Wilson [4] investigated for the existence of a relation between international trade and international travel flows between two countries. They tested relations between Australia and another four countries using the cointegration and Granger causality approaches as technical support. Kuledran and Wilson [4], concluding that such a relationship does exist, proposed research continues in this direction. Chang and Chang [5], in Taiwan, examined for the existence of a causal relationship between expansion in air cargo movement and economic growth. Their findings showed bi-directional causality between these variables, indicating that expansion in air-transported cargo movement played an important role in promoting Taiwan's economic growth.

Fernandes and Pacheco [3] tested for a causal relationship between economic growth and domestic air passenger-kilometres in Brazil. Using the Granger causality methodology, they found a unidirectional relationship between GDP and domestic revenue-passenger kilometre. Marazzo et al. [6], studying the behavior of domestic air passenger-kilometres demand and GDP in Brazil, reached findings quite similar to those of Fernandes and Pacheco [3].

Button and Yuan [7] examined the potential for air transport to play a role in economic development in the United States. They analysed trends in employment and income in metropolitan areas with airports processing air cargo. Using Granger causality on panel data from 35 airports and 32 metropolitan areas, they concluded that air transport is a positive driver for local economic development. Mehmood and Kiani [8] examined the hypothesis that, in Pakistan, growth in aviation preceded economic growth. They tested for Granger causality between these variables and concluded that aviation demand contributed positively to economic growth. Mehmood and Shahid [9] tested for causality between aviation and economic growth in the Czech Republic. Their empirical results revealed cointegration between aviation demand series and economic growth. Applying the Granger test to discover the direction of the causal relationship among these series revealed that aviation demand contributed positively to economic growth.

Van De Vijver et al. [10] analysed trade and passenger traffic on selected Asian-Pacific links. Using Granger causality analysis, they discovered – among other things – that, on the South Korea link to the Philippines, passenger traffic was facilitated by trade and that the opposite occurred on the Australia-Malaysia link. Hu et al. [11] examined the Granger causal relationship between domestic passenger traffic and GDP in 29 provinces in China, using heterogeneous panel data models. Granger causality tests indicated bidirectional causality between GDP and passenger movement. In the short run, however, only domestic passenger traffic displayed a causal effect on GDP.

Rodríguez-Brindis et al. [12] analysed for long-run effects between air transport demand and economic growth in Chile. They concluded that a long-run relation does exist between airport passenger movement and economic growth, in addition to there being positive bidirectional Granger causality between these variables in Chile. Baker et al. [13] ascertained the catalytic impacts of regional air transport on regional growth in Australia. Their analysis used passenger movement at 88 airports to represent the activity, whereas representing economic growth by real aggregate taxable income. They found a two-way relationship between regional air transport and local economic growth, pointing to a need for investment in regional airports.

From the literature review, it can be seen that research analyzing causal relations between air transport and macroeconomic variables, such as GDP and foreign trade, are still quite scarce and directed towards specific problem, leaving various lines of research under-explored. The studies reviewed show that causal relations behave differently in different regions. The few studies show

that it is important to learn how passenger movement behaves in specific regions in order to develop public policies for the air transport industry.

### III. Methodology

The methodology of this study follows the procedures for analysing causality among time series known as Granger causality. As noted by Soytaş and Sari [14], Granger causality tests relate to the causality observed in the period of the series under study. In order to investigate the dynamic behaviour of the model, the variance decomposition in these series must be analysed. Accordingly, the methodology described below is designed as a robust test for causality in the time series presented for Brazil, by analysing for stationarity, cointegration and, lastly, causality in the explanatory series, as regards variation in international passenger demand in Brazil. The short-run impact of the explanatory variables was assessed by way of variance decomposition analysis (VDC) for the models used. VDC provides information about the relative importance of each random innovation affecting the variables in the model. Examination of the inverse impact, i.e., impact of international passenger movement on the explanatory variables, lies outside the scope of this study. The inverse effect would not be significantly representative, given the small percentage of GDP represented by air transport in the Brazilian economy. Accordingly, the VDC analyses the impact of innovations in the explanatory variables on international passenger, *PAXINT*.

The first step in the analysis was to ascertain whether the series are stationary, which is a necessary condition for time series analysis. If the hypothesis of non-stationarity  $I(1)$  is confirmed, the series have to be transformed in order to proceed with the analysis. A first transformation is the natural logarithm (log) of the series. Following that, the Augmented Dickey-Fuller (ADF) test [15]-[17] can be performed to determine the number of differences that make the series stationary.

However, two or more non-stationary series may have a linear combination that is stationary. In that situation, they would be cointegrated. Accordingly, a second step is to test for cointegration among the series, with a view to assessing long-run relations among them. This step is required in order to determine the type of Granger causality test to be applied. The test of cointegration used a  $p$ -order Vector Autoregressive (VAR) model, as in Equation (1) [18], [19].

$$y_t = A_1 y_{t-1} + \dots + A_p y_{t-p} + Bx_t + \epsilon_t \quad (1)$$

where  $y_t$  is a  $k$ -vector of non-stationary variables  $I(1)$ ,  $x_t$  is a  $d$ -vector of deterministic variables and  $\epsilon_t$  is a vector of innovations. The widely-used Johansen methodology rewrites Equation (1) as in Equation (2) [18], [19].

$$\Delta y_t = \Pi y_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \Gamma_i \Delta y_{t-i} + Bx_t + \epsilon_t \quad (2)$$

where

$$\Pi = \sum_{i=1}^p A_i - I \quad \text{and} \quad \Gamma_i = - \sum_{j=i+1}^p A_j \quad (3)$$

The Granger representation theorem states that if a matrix of  $\Pi$  coefficients has the rank  $r < k$ , then there exist matrices  $\alpha \in \beta k \times r$ , each with rank  $r$ , such that  $\Pi = \alpha\beta'$  and  $\beta'y_t$  is stationary,  $I(0)$  [20]. The rank  $r$  is the number of cointegration relations and each column of  $\beta$  is the cointegration vector. The likelihood ratio tests the hypothesis that there are at least  $r$  vectors of cointegration and is known as the Trace statistic test.

In the event the series are not cointegrated, the direction of causality can be determined by the F-standard test on the VAR. That is achieved by estimating the bivariate equations (Equations 4 and 5):

$$y_t = \alpha_0 + \alpha_1 y_{t-1} + \dots + \alpha_l y_{t-l} + \beta_1 x_{t-1} + \dots + \beta_l x_{t-l} + \epsilon_t \quad (4)$$

$$x_t = \alpha_0 + \alpha_1 x_{t-1} + \dots + \alpha_l x_{t-l} + \beta_1 y_{t-1} + \dots + \beta_l y_{t-l} + v_t \quad (5)$$

for all possible pairs of the series  $(x,y)$  in the group. Thus, the Wald F-statistic test is used to detect whether Granger X causes Y [21]-[23] for the joint hypotheses (6).

$$\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_l = 0 \quad (6)$$

The Granger representation theorem states that, if two series are cointegrated, their long-run equilibrium will be represented by the Error Correction Model (ECM) [20],[24].

Equations 7 and 8 of the ECM indicate the short- and long-run relations among the cointegrated series:

$$\Delta Y_t = \lambda + \alpha_1 \Delta Y_{t-1} + \dots + \alpha_i \Delta Y_{t-i} + \beta_1 \Delta X_{t-1} + \dots + \beta_j \Delta X_{t-j} + \varphi z_{t-1} + \varepsilon_t \quad (7)$$

$$\Delta X_t = \lambda + \alpha_1 \Delta Y_{t-1} + \dots + \alpha_i \Delta Y_{t-i} + \beta_1 \Delta X_{t-1} + \dots + \beta_j \Delta X_{t-j} + \varphi z_{t-1} + \varepsilon_t \quad (8)$$

where  $\lambda$  is a constant, both  $i$  and  $j$  are the numbers of lags that are sufficiently large to make the disturbance term,  $\varepsilon_t$ , be white noise and  $Z_{t-1}$  is the cointegration vector, as in Equation 9:

$$z_{t-1} = Y_{t-1} - \omega_0 - \omega_1 X_{t-1} \quad (9)$$

All terms in the equation are  $I(0)$ .  $Z_{t-1}$  is included in the ECM as an error-correction term. The coefficients  $\beta_j$ 's of  $\Delta X_{t-j}$  in Equation 7 reflect the immediate response of  $Y$  to a change in  $X$ . In the same way, in Equation 8, the  $\alpha_i$ 's of  $\Delta Y_{t-i}$  reflect the immediate response of  $X$  to a change in  $Y$ . These coefficients represent the short-run elasticities of their variables with respect to the corresponding dependent variables. In the error-correction term, the cointegration vector,  $Z_{t-1}$ , represents the long-run equilibrium among the variables. The coefficient,  $\omega_1$ , of  $X_{t-1}$  is thus the long-run elasticity of  $Y$  with respect to  $X$ . The  $\rho$ -coefficient of  $Z_{t-1}$  measures the speed of adjustment to short-run equilibrium as compared to long-run equilibrium. The t-statistic tests of the coefficients show whether or not each is different from zero.

In Granger causality testing, it is important to bear in mind that the expression “Granger  $X$  causes  $Y$ ” does not entail that  $Y$  is an effect or result of  $X$ . Granger causality measures precedence but does not in itself indicate causality in the common-sense meaning of the term. The economic argument is fundamental to accepting causality in the common sense.

#### IV. Case study

Brazil ranks as one of the world’s largest national passenger air transport markets and, by 2029, is forecast to become the fourth largest after the USA, China and India. As regards international traffic, Brazil lies off the world’s major air transport routes, reducing the potential for interaction with leading markets [25].

This study examines how GDP relates to total domestic passengers embarked and disembarked (*PAXDOM*) from 2000 to 2015 and to total international passengers embarked and disembarked (*PAXINT*) from 1995 to 2015. The GDP series was obtained from Brazil’s Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA), which publishes aggregate economic data, whereas the domestic and international passenger series were drawn from the Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC). GDP is given in million reais at constant 2013 prices. Domestic and international passengers transported are expressed in millions. The study was conducted using the natural logarithm of the historical series. The variables are thus represented by the natural logarithms of *PAXDOM* (*logpaxdom*), of *PAXINT* (*logpaxint*) and of GDP (*loggdp*).

##### A. GDP and domestic passenger movement

For the stationarity test, it was opted to use Augmented Dickey-Fuller (ADF) unit root test [15]-[17]. The null hypothesis considered: “GDP has unit root” – indicates they are not stationary at level and a first difference was applied. The ADF test statistic with a first difference was -3.634 and a p-value of 0.0126, the null-hypotheses was rejected with 90% of confidence. Similar was observed in *PAXDOM*, as shown in Table I, a first difference was necessary to become stationary.

TABLE I  
Augmented Dickey-Fuller Unit Root Test  
Null Hypothesis: Series has a unit root

ADF test Statistic	t-Statistic	Prob.*
D(LOGGDP)	-3.634	0.0126

D(LOGPAXDOM)	-2.717	0.0974
D(LOGPAXINT)	-3.524	0.0182

\*MacKinnon one-sided p-values [26].

The Johansen test of cointegration was then applied. As shown in Table II, the results revealed that, for the various models tested, there exists at least one valid equation of cointegration and that, in two cases, there are two equations. It can thus be assumed that the series are cointegrated.

TABLE II  
Johansen Cointegration Test Summary for *PAXDOM*  
Number of Cointegrating Relations by Model  
(0.05 level\*)

Data Trend:	None	None	Linear	Linear	Quadrat
	No Intercep t No Trend	Intercep t No Trend	Intercep t No Trend	Intercep t Trend	ic Intercep t Trend
Test Type	Series:				
<i>loggdg, logpaxdom</i>					
Trace	1	2	2	1	0
Max-Eig	1	2	2	0	1

\*Critical values based on MacKinnon-Haug-Michelis [27]

The finding that the series are cointegrated recommends causality analysis using vector error correction (VEC). Table III shows the VEC results for Brazilian *loggdg* and *logpaxdom*. The cointegrating equation selected for the model was linear, intercept and no trend.

TABLE III  
VEC Estimates for *PAXDOM* - Period 2000-2015

Cointegrating Equation	$z_{t-1}$	
<i>loggdg(-1)</i>	1.000000	
<i>logpaxdom(-1)</i>	-0.360499	
<i>C</i>	[-38.4282]*	
	-17.96177	
Error Correction:	<i>D(loggdg)</i>	<i>D(logpaxdom)</i>
$z_{t-1}$	1.450173	3.127088
	[2.69362]*	[3.46858]*
<i>D(loggdg(-1))</i>	-1.623752	-2.884983
	[-2.21517]**	[-2.35031]**
<i>D(loggdg(-2))</i>	-1.082929	-1.645512
	[-1.78679]**	[-1.62132]***
<i>D(logpaxdom(-1))</i>	0.205288	0.841251
	[1.48012]***	[3.62204]*
<i>D(logpaxdom(-1))</i>	0.302482	0.132436
	[1.79382]**	[0.46901]

<i>C</i>	0.067240 [2.51066]**	0.144609 [3.22443]*
R-squared	0.525590	0.788706
Adjusted R-squared	0.186727	0.637782

Sample (adjusted): 2003 - 2015. Included observations: 13 after adjustments  
t-statistics in [ ] (\*) 99%, (\*\*) 95%, (\*\*\*) 90%

Table III shows a long-term, two-way relation between the two variables, which can be ascertained by the tests of significance of the  $Z_{t-1}$  coefficients of  $D(\log gdp)$  [2.69362] and of  $D(\log paxdom)$  [3.46858]. Short-term relations also proved to be significant and two-way in tests of the coefficients of the lag variables. However, it can be seen from the coefficients that the impacts are of differing proportions. The short-term relation of  $D(\log paxdom)$  to  $D(\log gdp)$  is inelastic, with coefficients of 0.205288 for the first lag and 0.302482 for the second. In the opposite direction, the relation can be seen to be elastic, i.e., 1% variation in  $D(\log gdp(-1))$  produces 2.88% first-lag and 1.64% second-lag variations in  $D(\log paxdom)$ . From the decomposition of accumulated variance shown in Fig. 1, the percentage variance of  $\log gdp$  due to  $\log paxdom$  can be seen to increase to around 30% over 10 periods. In the opposite direction, accumulated variance decomposition also shows increasing influence, already reaching around 70% in the fourth period, where it stabilises.

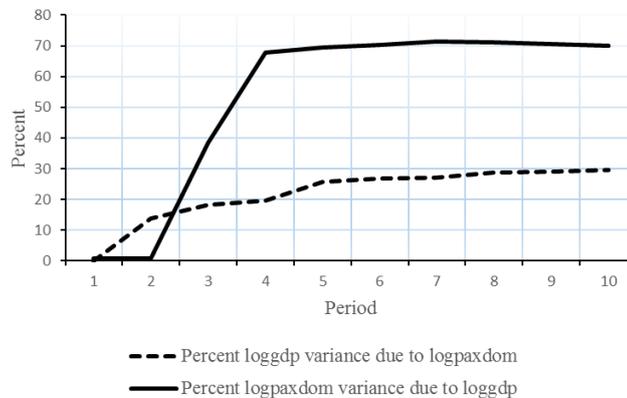


Fig. 1 Variance decomposition of  $\log gdp$  and  $\log paxdom$

### B. GDP and international passenger movement

The first difference of PAXINT, can be considered stationary, the ADF test statistic was -3.524 and a *p-value* of 0.0182, rejecting null hypotheses of unit root, as shown in Table I. Previously, was observed that the first difference of LOGGDP is stationary.

The Johansen test of cointegration was then performed. The results shown in Table IV indicated at least one cointegrating equation in each of the five models. Three models returned two cointegrating equations.

TABLE IV  
Johansen Cointegration Test Summary for *PAXINT*  
Number of Cointegrating Relations by Model  
(0.05 level\*)

Data Trend:	None		Linear		Quadratic	
	No Intercept	Intercept	No Trend	Trend	No Trend	Trend
None	0	1	0	1	0	1
Linear	0	1	0	1	0	1
Quadratic	0	1	0	1	0	1

Test Type	Series:				
<i>loggdp, logpaxint</i>					
Trace	1	2	2	2	1
Max-Eig	1	2	2	2	1

\* Critical values based on MacKinnon-Haug-Michelis [27]

Given that the series are cointegrated, causality analysis using VEC is recommended. Table V shows VEC results for Brazilian *loggdp* and *logpaxint*. The cointegrating equation selected for the model was linear, intercept and no trend.

TABLE V  
VEC Estimates for *PAXINT* - Period 1995-2015

Cointegrating Equation	$z_{t-1}$		
<i>loggdp</i> (-1)	1.000000		
<i>logpaxint</i> (-1)	-0.453098		
<i>C</i>	[-14.2843]*		
	-17.81063		
Error Correction:	$D(\loggdp)$	$D(\logpaxint)$	
$z_{t-1}$	0.142902	1.319728	
	[1.12499]	[5.56746]*	
$D(\loggdp$ (-1))	0.048717	-1.729380	
	[0.10907]	[-2.07486]**	
$D(\loggdp$ (-2))	0.030429	-2.571034	
	[0.06385]	[-2.89115]*	
$D(\logpaxint$ (-1))	-0.052779	0.284944	
	[-0.48710]	[1.40919]***	
$D(\logpaxint$ (-2))	0.007174	0.365173	
	[0.07199]	[1.96381]**	
<i>C</i>	0.023249	0.125058	
	[1.21538]	[3.50330]*	
R-squared	0.171400	0.781325	
Adjusted R-squared	-0.173849	0.690210	

Sample (adjusted): 1998 2015. Included observations: 18 after adjustments  
t-statistics in [ ] (\*) 99%, (\*\*) 95%, (\*\*\*) 90%

Table V shows that, even though the series are cointegrated,  $Z_{t-1}$  does not influence  $D(\loggdp)$ , indicating no long-term effect, and nor do the lag coefficients of  $D(\logpaxint)$  return significant t-statistics, indicating no short-term influence. Indeed, none of the coefficients of the equation for  $D(\loggdp)$  returned significant t-statistics of the variable coefficients. In the opposite direction, Table V shows that  $Z_{t-1}$  has a significant coefficient for  $D(\logpaxint)$ , indicating long-term causality. In the short term, the coefficients of the lag variables of  $D(\loggdp)$  also have significant t-statistics. The coefficient values indicate that the relation is elastic, i.e., 1% variation in  $D(\loggdp)$  results in 1.72% first-lag and 2.57% second-lag variation in  $D(\logpaxint)$ . Accumulated variance decomposition shows that percentage variance in *logpaxint* due to *loggdp* in the early periods is a little over 40%, reaching around 90% over 10 periods (Fig. 2). There can thus be said to be a strong one-way relation between *loggdp* and *logpaxint*.

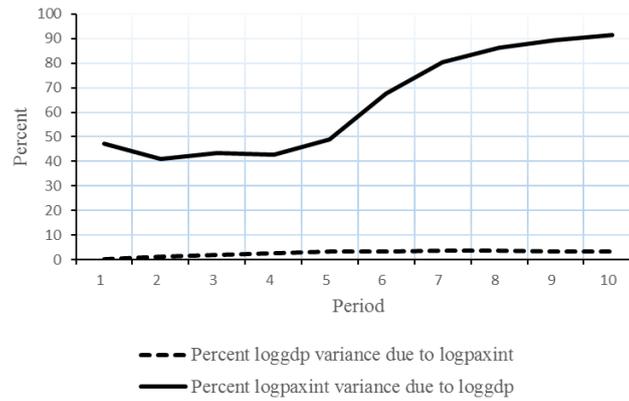


Fig. 2 Variance decomposition of *loggdp* and *logpaxint*

## V. Discussion

The series examined proved stationary at their first differences. Cointegration was observed among the series in both cases studied, showing causality between domestic passenger movement and GDP and between international passenger movement and GDP. However, GDP had much stronger impact on domestic and international passenger movement than passenger movement on GDP. Variance decomposition gave the magnitude of the impacts of percentage variance from series to series. Variance in GDP due to domestic passenger movement reached around 30%, whereas variance in domestic passenger movement due to GDP reached around 70%. No causal relation was observed between international passenger movement and GDP. Variance in GDP due to international passenger movement was no more than about 3%, whereas variance in GDP produced up to 90% variance in international passenger movement. As, for the case of GDP in relation to international passenger movement, the VEC equation returned no significant statistical test, international passenger movement cannot be claimed to have any influence on GDP. Accordingly, one-way causality can be said to exist from GDP to international passengers. As regards Granger causality, this evidence indicates that the variation in GDP is prior and of great importance to variation in both domestic and international passenger movement and that there is a feedback process of lesser proportions from domestic passenger movement to GDP.

This study confirms that the previous findings on the relationship between GDP and domestic passenger transport in Brazil remain at present. However he adds the vision of the international passenger movement which is an important element of the formulation of air transport policy in the country.

## VI. Conclusion

The results indicate that economic development is precedent to development of air transport and that, to a certain extent, domestic passenger movement feeds back into economic growth. In that light, caution is recommended in investing in air transport in Brazil, because returns on such investment may be frustrated by economic downturns. This has been seen in Brazil in the copious investment made to support mega-events and airport expansion, particularly with a view to international traffic, in the expectation that this would draw international air passengers to stimulate the economy. Investment to develop the domestic air transport network seems to promise better returns than when directed to stimulating international passenger traffic. Not only is this emphasis on international air transport apparently mistaken, the question remains as to whether better investment options may exist for leveraging Brazil's GDP. One air transport policy option in Brazil could be to set up secondary airports, with an emphasis on domestic transport, in areas of influence of Brazil's major metropolises. These could decongest large international airports embedded in dense urban networks and yield better results for the economy. This would

certainly expand availability of flight times in Brazil's large metropolises, which would in turn be extremely favourable to development of a regional network in Brazil.

This study did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial or not-for-profit sectors.

#### REFERENCES

- [1] ABEAR, "Panorama 2014: O setor aéreo em dados e análises," Associação Brasileira de Empresas Aéreas (ABEAR), 2015, Rio de Janeiro.
- [2] ATAG, "Aviation benefits beyond borders. Air Transport Action Group," (ATAG), Geneva, 2015.
- [3] Fernandes, E., Pacheco, R.R., "The causal relationship between GDP and domestic air passenger traffic in Brazil. *Transportation Planning and Technology*," 33 (7), 2010, 569-581.
- [4] Kuledran, N., Wilson, K., "Is there a relationship between international trade and international travel?" *Applied Economics* 32 (8), 2000, 1001-1008.
- [5] Chang, Y.-H., Chang, Y.-W., "Air cargo expansion and economic growth: Finding the empirical link," *Journal of Air Transport Management* 15 (5), 2013, 264-265.
- [6] Marazzo, M., Scherre, R., Fernandes, E., "Air transport demand and economic growth in Brazil: A time series analysis," *Transportation Research Part E* 46 (2), 2010, 261-269.
- [7] Button, K., Yuan, J., "Airfreight Transport and Economic Development: An Examination of Causality," *Urban Studies* 50 (2), 2013, 329-340.
- [8] Mehmood, B., Kiani, K., "An inquiry into nexus between demand for aviation and economic growth in Pakistan," *Academicia* 3 (10), 2013, 200-211.
- [9] Mehmood, B., Shahid, A., "Aviation Demand and Economic Growth in the Czech Republic: Cointegration Estimation and Causality Analysis," *Statistika* 94 (1), 2014, 54-63.
- [10] Van De Vijver, E., Derudder, B., Witlox, F., "Exploring causality in trade and air passenger travel relationships: the case of Asia-Pacific," 1980-2010. *Journal of Transport Geography* 34, 2014, 142-150.
- [11] Hu, Y., Xiao, J., Deng, Y., Xiao, Y., Wang, S., "Domestic air passenger traffic and economic growth in China: Evidence from heterogeneous panel models," *Journal of Air Transport Management* 42, 2015, 95-100.
- [12] Rodríguez-Brindis, M. A., Mejía-Alzate, M., Zapata-Aguirre, S., "La causalidad entre el crecimiento económico y la expansión del transporte aéreo: un análisis empírico para Chile," *Revista de Economía del Rosario* 18 (1), 2015, 127-144.
- [13] Baker, D., Merkert, R., Kamruzzaman, M., "Regional aviation and economic growth: cointegration and causality analysis in Australia," *Journal of Transport Geography* 43, 2015, 140-150.
- [14] Soytaş, U., Sari, R., "Energy consumption and GDP: causality relationship in G-7 countries and emerging markets," *Energy Economics*, 25 (1), 2003, 33-37.
- [15] Dickey, D.A., Fuller, W.A., "Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root," *Journal of the American Statistical Association* 74 (366a), 1979, 427-431.
- [16] Fuller, W.A., "Introduction to Statistical Time Series," Wiley, 1976, New York.
- [17] Said, S.E., Dickey, D.A., "Testing for unit roots in autoregressive-moving average models of unknown order," *Biometrika* 71 (3), 1984, 599-607.
- [18] Johansen, S., "Estimation and Hypothesis testing of cointegrating vectors in Gaussian vector autoregressive models," *Econometrica*, 59 (6), 1991, 1551-1580.
- [19] Johansen, S., "Likelihood-based inference in cointegrated vector autoregressive models," Oxford University Press, 1995, Oxford.
- [20] Engle, R.F., Granger, C.W.J. "Co-integration and error correction: representation, estimation and testing," *Econometrica* 55 (2), 1987, 251-276.
- [21] Hassapis, C., Pittis, N., Prodromidis, K., "Unit roots and granger causality in the EMS interest rates: the German dominance hypothesis revisited," *Journal of International Money and Finance*, 18 (1), 1999, 47-73.

- [22] Toda, H., Phillips, P.C.B., “Vector autoregressions and causality,” *Econometrica* 61 (6), 1993, 1367-1394.
- [23] Toda, H., Phillips, P.C.B., “Vector autoregressions and causality: a theoretical overview and simulation study,” *Econometric Reviews* 13 (2), 1994, 259-285.
- [24] Granger, C.W.J., “Causality, cointegration and control,.” *Journal of Economic Dynamics & Control* 12 (2-3), 1988, 551-559.
- [25] Fernandes, E., Pacheco, R.R., “Transporte aéreo no Brasil: uma visão de mercado,” Elsevier, 2016, Rio de Janeiro.
- [26] MacKinnon, J. G., “Numerical distribution functions for unit root and cointegration tests,” *Journal of Applied Econometrics*, 1996, 11, 601–618.
- [27] MacKinnon, J. G., A. A. Haug, and L. Michelis, “Numerical distribution functions of likelihood ratio tests for cointegration,” *Journal of Applied Econometrics*, 1999, 14, 563–577.

## ANEXO 4

### MODELO PARA O FLUXO AÉREO DE CARGA TRANSPORTADA ENTRE AS CIDADES BRASILEIRAS: ABORDAGEM COM DADOS EM PAINEL, XXX

Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes

### MODELO PARA O FLUXO AÉREO DE CARGA TRANSPORTADA ENTRE AS CIDADES BRASILEIRAS: ABORDAGEM COM DADOS EM PAINEL

**Manoela Cabo da Silva**

**Elton Fernandes,**

**Ronaldo Balassiano**

**Márcio dos Santos**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Programa de Engenharia de Produção e de Transportes

#### RESUMO

A importância do setor aéreo para o transporte de mercadorias e o desenvolvimento da economia remetem à necessidade da realização de estudo sobre o fluxo de carga movimentada por meio do transporte aeroviário. O objetivo desse trabalho é a elaboração de um modelo estatístico para o fluxo aéreo de carga entre cidades, possibilitando seus dimensionamento e previsão. Foi proposta uma análise empírica para o caso da carga de porão entre cidades brasileiras, com análise exploratória para desenvolvimento de base de dados com variáveis significativas, tanto macroeconômicas quanto do setor aéreo e posterior proposição de modelo baseado na análise multivariada e nos estudos dessas séries temporais resultantes da pesquisa. Nesse contexto, a carga transportada pode ser explicada estatisticamente pelo seu passado histórico e por outros fatores, utilizando a metodologia de dados em painel autorregressivo de efeito fixo, para acompanhamento e tratamento dessas informações e suas correlações ao longo do tempo.

#### ABSTRACT

The importance of air cargo transportation industry for commodities transportation and the economic development indicates the need for studies of air cargo flow through air transportation mode. The aim of this work is to develop a statistical model for cargo air flow between cities, making possible to scale and forecast it. This article proposes an empirical analysis for the belly cargo between Brazilian cities, by an exploratory analysis for database development with significant variables in both macroeconomic and aviation industry and propose a model based on multivariate analysis and time series studies resulting from the research. In this context, the cargo can be explained statistically by its historical past and other factors using autoregressive data panel methodology for monitoring and treating of such information and their correlation over time.

**Palavras-chave:** Transporte aéreo de carga, Dados em painel, Séries Temporais, *Belly Cargo*

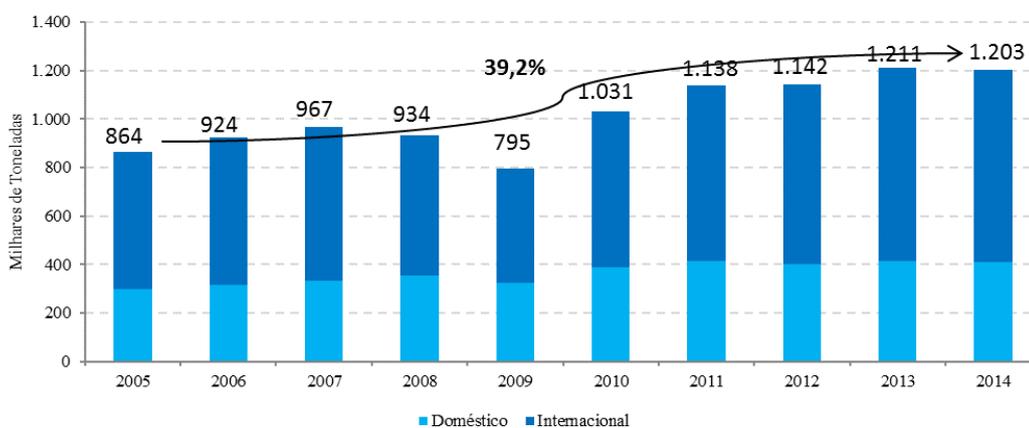
#### 1. INTRODUÇÃO

O transporte aéreo de cargas tem sido objeto de grande interesse para diversas empresas do setor público e privado nos últimos anos, em todas as partes do mundo, nas linhas de ligação domésticas e internacionais. Com a aumento da globalização, no mercado em

acirrada competição, cada vez mais empresas necessitam oferecer o melhor preço com o menor tempo de entrega da mercadoria, por isso, a importância da logística just-in-time (JIT) vem contribuindo para alavancar o setor de carga aérea (Azadian, Murat, & Chinnam, 2012). Esse estudo será desenvolvido em um momento em que o transporte aéreo de carga está em pleno desenvolvimento e dobra seu volume a cada 10 anos, desde 1970 (Chang, Yeh, & Wang, 2007). Além disso, segundo o World Air Cargo Forecast (WACF), publicado pela Boeing, bianualmente, a previsão para o tráfego aéreo mundial de carga é de crescimento médio de 4.7% ao ano, nos próximos 20 anos, e a receita de toneladas por quilômetros será o dobro do observado em 2013 (Boeing, 2015).

O Brasil, com extensão territorial de 8,5 milhões Km<sup>2</sup> e 204 milhões de habitantes em 2015, de acordo com o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), está classificado com a quinta maior superfície e a quinta maior população mundial. Um país com essa magnitude necessita de um sistema de transportes eficiente para o carregamento de bens, que permita a integração efetiva do território nacional e internacional de acordo com a atividade econômica exercida por essa nação. Além disso, segundo a ANAC (Agência Nacional de aviação Civil), existem cerca de 4000 aeroportos e aeródromos no Brasil, sendo 721 com pistas pavimentadas, incluindo as áreas de desembarque. O país tem o segundo maior número de aeroportos em todo o mundo, atrás apenas dos Estados Unidos.

Segundo o Anuário do transporte aéreo 2014, da Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC, a quantidade de carga paga transportada no mercado doméstico, em toneladas, registrou crescimento médio de 3,6% ao ano nos últimos dez anos, com incremento de 37% desde 2005. Pode-se observar na Figura 1, que em 2014, 410,6 mil toneladas foram transportadas no mercado doméstico. No mercado internacional, a quantidade de carga paga transportada vem registrando crescimento médio de 3,8% ao ano, nos últimos dez anos e atingiu 792,3 toneladas nesse mesmo ano, o que representou alta de 40,2% desde 2005, totalizando um crescimento de 39,2% nos dois mercados.



**Figura 1:** Evolução da quantidade de carga aérea paga transportada – mercados doméstico e internacional, 2005 a 2014. (ANAC – Anuário do transporte aéreo 2014)

No ano de 2014 o Brasil sediou a Copa do Mundo e em 2016 sediará as Olimpíadas, com dois eventos de tão grande impacto para o fluxo de pessoas, em tão curto prazo, inédito para esse país, houve uma grande demanda de pesquisa sobre fluxo aéreo de passageiros, sobretudo para o dimensionamento de aeroportos para essa recepção e forte

interesse do governo no desenvolvimento dessa estrutura. Não obstante, os estudos sobre de transporte aeroviário de cargas ficaram escassos.

Com base nessas informações, diante de um setor tão promissor, com perspectiva de crescimento, que está em pleno desenvolvimento e acumula com forte tendência de alta desde 2005 (Figura 1) e com escassez de pesquisas e aplicação de técnicas de modelagem avançadas, mundialmente e em especial no Brasil, que esse estudo foi desenvolvido. Servirá de subsídio para tomada de decisão dos diversos setores da economia e como insumo de pesquisas.

Nesse sentido, desenvolver modelos de identificação, dimensionamento e previsão do fluxo de carga aérea transportada entre as cidades brasileiras é de suma importância para a avaliação de capacidade dos principais aeroportos brasileiros, das condições do setor e oferta de serviços aéreos, para o desenvolvimento da economia global e local, para escolha do modal a ser utilizado, redimensionamento de volume e tempo para transporte das mercadorias entre as diversas cidades brasileiras e da análise de diversos outros fatores.

Outro ponto que foi ressaltado nesse trabalho, são as linhas de ligações aéreas, para comparar a posição de cada cidade brasileira com a quantidade de carga movimentada, resumindo os aeroportos pelos municípios. As ligações aéreas domésticas representam não só um importante meio clássico de interconexão entre cidades, sobretudo com a extensão territorial do Brasil, com a característica da carga transportada, bem como o tempo para chegada ao destino da carga, também o canal da conectividade do território com os fluxos internacionais.

Com essa finalidade foi proposto um modelo estatístico para o fluxo aéreo de carga transportada entre nas linhas de ligação, podendo ser o aeroporto ou cidade, de forma que possibilite o dimensionamento e previsão desse fluxo. A metodologia foi desenvolvida com base na análise empírica do caso do transporte aéreo de carga de porão, ou *belly cargo*, entre as cidades brasileiras, aproveitou-se toda especificidade do setor, diante de um país com dimensões continentais.

Como primeiro passo, a pesquisa e identificação de variáveis significativas, tanto macroeconômicas, geográficas e do setor aéreo, para criação de uma base de dados adequada à finalidade do estudo. Em seguida, após várias simulações, a proposição de modelo, baseado na análise multivariada e nos estudos dessas séries temporais resultantes da pesquisa, para estimar o fluxo aéreo de carga. Nesse contexto, a carga pode ser explicada estatisticamente por outros dados socioeconômicas e demográficos, além de seu passado histórico.

Para atingir esse objetivo, foi utilizada a metodologia de dados em painel autorregressivo com efeito fixo, *autoregressive panel data*, ou dados longitudinais, para o acompanhamento e tratamento dessas informações e suas correlações ao longo do tempo.

## **2. REVISÃO LITERÁRIA**

Os estudos do fluxo de carga aérea são escassos, a maior parte dos estudos está concentrado para a identificação e previsão do fluxo de passageiros, no entanto, internacionalmente, o transporte de carga subiu 50% mais rápido que transporte de passageiro, entre 1995 e 2004 (Wong, Zhang, Hui, & Leung, 2009). Antes de meados

da década de 1980, as pesquisas sobre transporte aéreo de carga, concentrava-se basicamente na descrição dos sistemas, o processo operacional, e no desenvolvimento dessa indústria, essa revisão bibliográfica foi bem demonstrada no trabalho “Operações de carga aérea: revisão da literatura e comparações práticas” (Feng, Li, & Shen, 2015). Desde então, houve uma demanda crescente de estudos examinaram métodos de decisão quantitativos, utilizando modelos matemáticos, para as operações de carga aérea em resposta ao crescimento desse mercado e o surgimento de novas técnicas estatísticas para esse propósito.

No caso de passageiros, (Brueckner, 1985) realizou uma análise empírica do mercado utilizando variáveis socioeconômicas e demográficas, como tamanho, emprego e renda das regiões metropolitanas que influenciam o transporte de passageiros nos Estados Unidos. Ele descobriu que existe uma relação proporcional entre população e de passageiros de uma cidade, e também deu a primeira visão empírica entre o tráfego aéreo e essas variáveis, guiados por esse trabalho, outros estudos foram realizados para reexaminar os efeitos das características do emprego e a dimensão urbana no tráfego do aeroporto em os EUA e Canadá, mas descobriram que as relações entre o tráfego aéreo e as características econômicas estudadas por Brueckner permaneciam inalteradas.

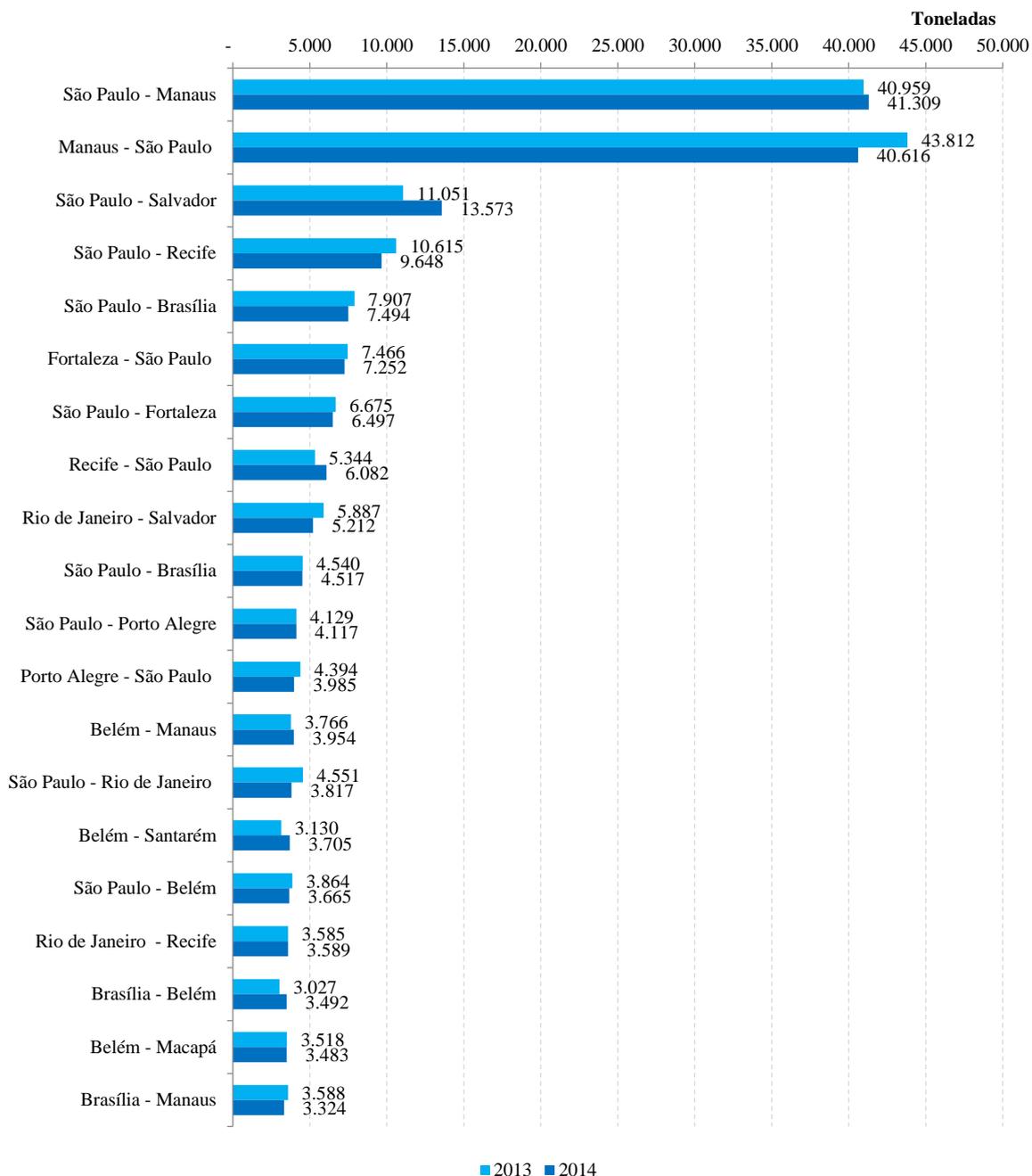
Como relatado anteriormente, o transporte de carga aérea, tem recebido menos atenção na literatura, embora as expectativas de influência dos determinantes socioeconômicas e demográficas também afetem o transporte de carga, pois o fluxo de carga se conecta à demanda das cidades (Lakew, 2015). Seguindo a mesma linha de pensamento, (Kasarda & Green, 2005) analisou o papel que a carga aérea desempenha no desenvolvimento econômico e que fatores condicionam o seu impacto, como produto interno bruto per capita, em seguida, utilizou MLG (modelos lineares generalizados) para avaliar os efeitos investimento estrangeiro e produto interno no transporte de carga para alguns países do mundo. Enquanto (Chang et al., 2007) aplicou testes de causalidade de Granger para examinar a relação causal entre a expansão da carga aérea e o crescimento econômico, em Taiwan, para o período 1974-2006, e mostrou que existe esse equilíbrio para os testes aplicados.

Grande parte dos estudos examinam a relação do PIB como transporte aéreo de passageiros, (Fernandes & Pacheco, 2010) examina a relação causal entre o crescimento econômico e o transporte aéreo de passageiros domésticos no Brasil, utilizando também o teste de causalidade de Granger. O total de passageiros- quilômetro são utilizados como um proxy para a procura de transporte aéreo e PIB como um proxy para o crescimento econômico. No caso de (Lakew, 2015), o artigo avalia os impactos da dimensão urbana, emprego e renda sobre o tráfego aéreo de passageiros e carga entre as cidades. Além de diferenças específicas de cada cidade, que podem influenciar os controladores de tráfego aéreo e é baseado em uma de em um painel trimestral aplicado às áreas metropolitanas dos Estados Unidos. E no caso da China, (Hu, Xiao, Deng, Xiao, & Wang, 2015) utiliza dados em painel para o fluxo aéreo de passageiros, (Button & Yuan, 2013) utilizaram a mesma metodologia analogamente para a carga.

Em relação a essa breve revisão bibliográfica, observou-se que existem poucos estudos sobre previsão de fluxo de carga aérea entre cidades, sobretudo utilizando dados em painel auto regressivos, muito menos aplicado ao mercado brasileiro. Posto isso, será grande a contribuição que esse artigo para o mercado e para o desenvolvimento de novas pesquisas, além preencher a lacuna na literatura acerca do assunto.

### 3. DESCRIÇÃO DOS DADOS

A decisão de desenvolver um modelo para o fluxo de carga das ligações aéreas surgiu após observar que o maior volume de carga paga transportada está entre as cidades de Manaus e São Paulo e vice-versa, Figura 2, os dois maiores polos produtores do Brasil, de acordo com a pesquisa industrial mensal produção física, PIM-PF, divulgada pelo IBGE, ou seja, a maior produção industrial regional brasileira se localiza exatamente nessas duas regiões.



**Figura 2** – Carga aérea paga transportada nas principais cidades – mercado doméstico, 2013 e 2014. (ANAC – Anuário do transporte aéreo 2014)

#### 3.1. Criação do banco de dados

Com base na literatura elencada na Seção 2, iniciou-se a seleção de variáveis para criação do banco de dados e montagem de painel em corte transversal, levando em consideração a série temporal de cada uma delas. Primeiramente, procedeu-se à análise exploratória dos dados. Posteriormente, uma análise das variáveis explicativas que poderiam fazer parte do modelo, não obstante a variável a ser explicada ou dependente ser a “a carga aérea paga”.

Optou-se por utilizar uma modelagem estatística multivariada para captar os efeitos quando se as observa simultaneamente ou as relações existentes entre as mesmas. Foram selecionadas e estudadas diversas variáveis do setor aéreo de transporte e macroeconômicas, para analisar suas distribuições e a influência que esses dados agregam ao modelagem e eventuais problemas de multicolinearidade.

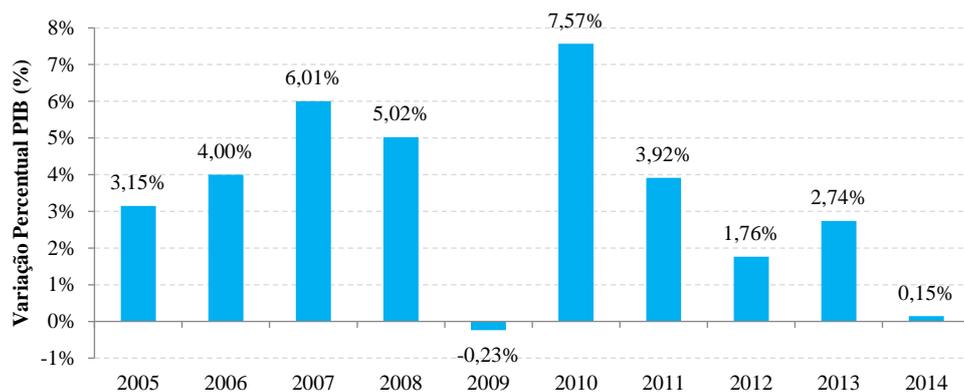
Após essa análise, criou-se um banco de dados com as séries históricas dessas variáveis. Finalizada a estruturação desse banco, verificou-se que as informações apresentavam repetidas observações *cross section*, ou seja, as variáveis preditoras, que é a carga paga, e as explicativas, são medidas ao longo do tempo e essas observações, por causa dessas características, são correlacionados, necessitando de técnicas estatísticas para tratar essa dependência. Diante desse fato optou-se por aplicar o conceito de dados em painel, *panel data* ou dados longitudinais. Procedendo a estimação de um modelo, atendendo todos os pressupostos e suas particularidades.

### **3.2. Descrição das informações**

Antes da presunção do modelo final, foram incluídas e simulados inúmeros modelos contendo distintas variáveis macroeconômicas, como PIB, taxa de câmbio e juros entre outras; variáveis demográficas, como população e distância entre as cidades; e do setor aéreo, por exemplo, *payload*, decolagens, distância. Mas esta seção, ateu-se à descrição apenas dos dados que foram utilizados no modelo proposto. Todas as informações elencadas abaixo estão esturadas em horizonte temporal anual e cada dado observado entre a cidade de origem da carga paga e a cidade de destino.

A carga aérea paga transportada, variável explicativa objeto desse trabalho, refere-se à quantidade total, expressa em quilogramas, de todos os bens que tenham sido transportados na aeronave, exceto correio e bagagem, e tenham gerado receitas direta ou indireta para a empresa aérea. Essa carga é transportada no porão das aeronaves, denominada *belly cargo*.

A variável PIB real dos municípios foi construída a partir de dados nominais provenientes do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), trazidos a valor presente pela aplicação do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), a última informação divulgada pelo IBGE é o PIB municipal de 2013. De forma ilustrativa, pose-se observar na Figura 3, com a informações do PIB do Brasil com grande queda em 2014, o que pode auxiliar a explicar parte da queda de carga também nesse ano.



**Figura 3** – Variação do PIB brasileiro, de 2005 a 2014. (IBGE - Contas Nacionais Trimestrais)

Quanto aos dados referentes ao setor aéreo, eles provêm da Base de Dados Estatísticos do Transporte Aéreo, disponibilizada pela Agência de Aviação Civil (ANAC) divulgados periodicamente, foram obtidos mediante a manipulação desta base de dados, acumulados de forma anual contemplado na amostra até as informações do fechamento de 2015. Trata-se de um banco de dados amplo, cujas extensão e diversidade permitem diversos experimentos em estudos empíricos de transporte aéreo.

As variáveis utilizadas foram, decolagens, refere-se ao número de decolagens que ocorreram entre as cidades de origem e destino da etapa; *payload*, que é a capacidade total de peso na aeronave, expressa em quilogramas, disponível para efetuar o transporte de passageiros, carga e correio e por último a distância voada, que, como o próprio nome, é a distância, expressa em quilômetros, entre as cidades de origem e destino, considerando a curvatura do planeta Terra.

Para este estudo, foram consideradas somente as ligações existentes entre cidades brasileiras em termos de oferta, a Figura 2 resume bem essa informação do fluxo de ligação de carga aérea transportada entre as algumas cidades brasileiros, ordenada pelo maior volume de carga.

As estatísticas descritivas para as variáveis contínuas foram realizadas, inclusive para testar as suposições do modelo, sendo que nenhuma dessas variáveis apresenta média negativa. No entanto, a modelagem econométrica permitirá evidenciar que algumas destas variáveis podem apresentar impacto negativo sobre a determinação do valor da carga paga transportada, notadamente a parte auto regressiva incorporada ao modelo.

#### 4. METODOLOGIA

O modelo de dados em painel autorregressivo com efeito fixo, que analisa as variáveis ao longo do tempo, foi proposto após observar o modelo gravitacional tradicional e suas extensões, para estimar o fluxo teórico entre duas aglomerações urbanas. O modelo gravitacional padrão (MG), prevê que a interação entre duas aglomerações será diretamente proporcional ao produto de suas massas, definidas de acordo com a natureza do fluxo, e inversamente proporcional a suas distâncias. Esse modelo foi aprimorado e aplicado ao transporte aéreo de carga (Hwang & Shiao, 2011), que indicou o seguinte modelo econométrico, de forma reduzida ao modelo gravitacional estendido:

$$T_{ijt} = \alpha + \beta_1 \ln Y_{it} Y_{jt} + \beta_2 \ln N_{it} N_{jt} + \beta_3 \ln D_{ij} + \beta_4 \ln F_{ijt} + \beta_5 \ln R_{ijt} + \beta_6 DM_j + \beta_7 OSA_j + \beta_8 COL_j + \mu_{ij} \quad (1)$$

Onde,  $i$  é o aeroporto de origem e  $j$  o aeroporto de destino,  $T_{ijt}$  é o volume total de carga transportadas entre os aeroportos  $i$  e  $j$ ; no ano  $t$ .  $Y$  é PIB per capita e  $N$  a população do país onde o aeroporto está localizado, no ano  $t$ .  $D_{ij}$  é a distância entre dois aeroportos.  $R_{ijt}$  corresponde ao custo médio do frete de mercadorias na rota que liga os aeroportos.  $F_{ijt}$  é a frequência de voo do serviço de carga aérea entre os aeroportos.  $DM_j$ ,  $OSA_j$ , e  $COL_j$  são variáveis *dummies* para caracterizar aeroportos que possuem acordo com a região, representando os laços coloniais com Taiwan.

Em seguida (da Silva & de Almeida D'Agosto, 2013) sugere um modelo de gravidade restrita para estimar a origem-destino da matriz para o fluxo de exportação de brasileira de soja, combinado com técnicas de otimização multi-objetivos para garantir o equilíbrio da

Matriz. O modelo de fácil aplicação e auxilia no planejamento estratégico de transporte para a exportação de produtos de soja do Brasil, desde que a configuração de cadeia de fornecimento é conhecida e os erros percentuais absolutos são monitorizadas ao longo do tempo.

Com base nesses referenciais, decidiu-se desenvolver uma modelagem, para o fluxo de carga transportada, não só entre os aeroportos de origem e destino, mas entre as cidades brasileiras, ou seja, sumarizando-se esses aeroportos por cidade. Utilizou o passado histórico da série e os dados demográficos e socioeconômicos dessas cidades, como variáveis, sendo observada a correlação temporal.

Vários modelos englobam um conjunto de métodos auxiliares na análise e inferência de um grupo de variáveis. Entretanto, estas técnicas somente podem ser aplicadas separadamente à cada variável, não conseguindo, portanto, captar os efeitos quando se as observa simultaneamente ou as relações existentes entre as mesmas. Neste sentido, criaram-se técnicas de estatística multivariada com o objetivo de incorporar todas as variáveis na interpretação teórica de um determinado conjunto de dados.

Porém, a necessidade de compreender as relações entre diversas variáveis torna a análise multivariada um instrumento inerentemente difícil (Johnson & Wichern, 2002)), de forma a tornar-se primordial a cautela no manuseio desta técnica. A análise multivariada abrange diversos métodos com diferentes finalidades, exigindo de início o entendimento dos resultados que se pretende gerar a partir de suas aplicações. A essência de seu uso está na escolha das opções mais apropriadas para detectar os padrões esperados nos seus dados de acordo com os objetivos da pesquisa (Vicini & SOUZA, 2005).

De acordo com (Johnson & Wichern, 2002), os objetivos de investigações científicas em que os métodos multivariados mais são utilizados incluem redução de dimensões ou simplificação estrutural, agrupamento, investigação da dependência entre variáveis, predição e teste de hipóteses. Assim, as técnicas multivariadas podem ser divididas em dois grupos distintos: as técnicas de dependência e as de interdependência. As técnicas de dependência são caracterizadas por serem usadas em situações em que é necessário uma ou mais variáveis dependentes serem preditas ou explicadas por um conjunto de variáveis independentes. Já as técnicas de interdependência são utilizadas em casos em que não há separação das variáveis entre dependentes e independentes, porém quer-se analisá-las simultaneamente.

#### 4.1 Dados em painel

Como existe dependência temporal da variáveis explicativas e fator autorregressivo, utilizou-se dados em painel ou *panel data*, também chamados dados longitudinais, e são definidos por apresentarem repetidas observações de um determinado conjunto de unidades em *cross section*. Isto é, as variáveis de interesse, preditora e explicativas, são medidas em diferentes ocasiões, geralmente ao longo do tempo, para um mesmo indivíduo ou elemento. Em estudos longitudinais as observações de um indivíduo ao longo do tempo são correlacionadas, tornando-se assim necessárias técnicas estatísticas que considerem esta dependência (Twisk, 2013).

Há diversas vantagens na utilização de dados longitudinais quando comparada ao uso de dados distribuídos puramente em cross section ou séries temporais. Estudar relações dinâmicas em função do tempo e modelar as diferenças entre os indivíduos são alguns benefícios obtidos. (Frees, 2004)

O modelo linear padrão utilizado para dados longitudinais pode ser definido por:

$$Y = XB + E \quad (2)$$

Em que,

$$Y_{NT \times 1} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_N \end{bmatrix}, X_{NT \times k} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}, E_{NT \times 1} = \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix}, B_{k \times 1} = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_N \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Sendo,

$$Y_i = \begin{bmatrix} Y_{j1} \\ \vdots \\ Y_{jT} \end{bmatrix}, X_i = \begin{bmatrix} X_{j11} & \dots & X_{jk1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{j1T} & \dots & X_{jkT} \end{bmatrix}, E_i = \begin{bmatrix} E_{j1} \\ \vdots \\ E_{jN} \end{bmatrix}, \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, N, \\ j = 1, \dots, n. \end{matrix} \quad (4)$$

Os pressupostos assumidos por este modelo correspondem aos definidos pelo modelo clássico de regressão linear múltipla, uma vez que este ignora a estrutura de dados em painel. Assim, os erros deverão ser iid (independentes e identicamente distribuídos), além de homocedásticos, ou seja, para um determinado indivíduo, as observações são não-correlacionadas e, entre indivíduos e tempo, a variância do erro é constante. Entretanto, a vantagem de utilizar os dados na estrutura de painel é obter a análise do comportamento dos indivíduos ao longo do tempo, implicando na existência de diferenças entre os mesmos (Frees, 2004).

Esta desigualdade pode ser interpretada como maior similaridade entre observações de um mesmo indivíduo quando comparado a outro indivíduo. A falha na inclusão deste fator ao modelo pode causar problemas de viés nos estimadores.

Assim, um novo modelo é proposto, no qual há uma estrutura diferenciada para o termo de erro, assumindo que as diferenças entre as unidades podem ser captadas através de diferenças no termo constante.

$$Y_{it} = X_{it}B + \varepsilon_{it},$$

(5)

$$\varepsilon_{it} = \alpha_i + N_{it},$$

Onde,

$$N_{it} \sim iid(0, \sigma^2).$$

Então, a equação se resume em

$$Y_{it} = \alpha_i + X_{it}B + N_{it}.$$

(6)

Nesta formulação,  $\alpha_i$  representa o efeito individual, possuindo variação entre indivíduos e constância ao longo do tempo, enquanto  $N_{it}$  varia independentemente do indivíduo ou tempo. Com um modelo caracterizado desta forma, torna-se simples capturar a heterogeneidade entre indivíduos (JOHNSTON, 1988). Este modelo, porém, pode se segmentar em outros de acordo com as suposições feitas sobre o efeito individual.

Uma primeira vertente consiste no modelo de efeitos aleatórios, no qual o efeito individual é não correlacionado com as variáveis explicativas. Isto implica na aleatoriedade deste efeito, não sendo influenciado pelas covariáveis do modelo. Outra vertente trata-se do modelo de efeitos fixos, que considera a existência de correlação entre o efeito individual e as variáveis independentes do modelo. Neste caso, o efeito não ocorre ao acaso, mas sim de acordo com as covariáveis, tornando-o fixo.

Os modelos citados possuem grande flexibilidade por considerarem as diferenças entre indivíduos em sua abordagem. Entretanto, esta heterogeneidade é incorporada apenas no intercepto do modelo, em ambos os casos. Isto significa que a possibilidade de existirem diferenças entre indivíduos para cada variável explicativa utilizada do modelo não está sendo levada em consideração. Uma abordagem mais completa seria, portanto, adicionar a hipótese de variação do vetor paramétrico  $B$  entre indivíduos aos modelos existentes. A formulação se tornaria

$$Y_{it} = \beta_{it}^T X_{it} + u_{it}, \quad i = 1, \dots, N \text{ e } t = 1, \dots, T,$$

(7)

Em que,  $u_{it}$  denota o termo de erro aleatório;

$X_{it}$  é um vetor com  $K$  variáveis independentes;

$\beta_{it}$  é um vetor paramétrico de dimensão  $K \times 1$ .

Como dito, este modelo simplesmente considera que cada indivíduo possui seus próprios coeficientes, os quais são específicos para cada período de tempo. O grande obstáculo desta formulação é a impossibilidade de estimação dos parâmetros devido ao

baixo número de observações, e para ultrapassar tal dificuldade é necessário impor alguma estrutura nos parâmetros.

## 5. RESULTADOS EMPÍRICOS

A quantidade de informações utilizadas, ano de início e fim do painel do modelo são restritas, iniciando em 2003 e finalizando em 2013, principalmente pela disponibilidade dos dados das cidades de origem e destino. O Brasil tem hoje 2.498 aeroportos e aeródromos (locais sem terminais de passageiros), sendo 739 públicos e 1.759 particulares, conforme dados da Agência Nacional de Aviação Civil (Anac), comparando com os registros da Organização Internacional da Aviação Civil (Icao), isso significa o segundo maior número de aeroportos do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos, que têm 16.507 locais para pouso e decolagem de aeronaves. Com essa informação pode-se observar a dificuldade para coletar essas informações.

### 5.1. Variáveis selecionadas

O painel foi construído com as informações entre as cidades de origem e destino em seções transversais de dados anuais. Após aplicação de técnica de estatística multivariada, as séries significativas e incluídas no modelo são: a carga paga de porão ou *belly cargo*; a distância entre as cidades; a quantidade de decolagens; o *payload* e o PIB das cidades, a definição dessas variáveis está disponível na Tabela 1 abaixo. Nota-se, após a análise exploratória das variáveis, algumas cidades com níveis relativamente baixos de fluxo de carga, ainda assim estão incluídas na amostra. Após a aplicação das restrições para tratamento dos dados, foi formado um *unbalanced panel*, ou painel não balanceado, em que o número de períodos de tempo não é o mesmo para todos os indivíduos.

**Tabela 1:** Definição de Variáveis

Variável	Definição
Carga Paga	Quantidade total, expressa em quilogramas, de todos os bens que tenham sido transportados na aeronave, exceto correio e bagagem, e tenham gerado receitas direta ou indireta para a empresa aérea;
Distância	Refere-se à distância, expressa em quilômetros, entre os aeródromos de origem e destino da etapa, considerando a curvatura do planeta Terra
<b>Decolagens</b>	Número de decolagens que ocorreram entre os aeródromos de origem e destino da etapa
<i>Payload</i>	É a capacidade total de peso na aeronave, expressa em quilogramas, disponível para efetuar o transporte de passageiros, carga e correio
<i>PIB</i>	Produto Interno Bruto (PIB) municipal do Brasil segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)

### 5.2. Modelo Ajustado

Estimou-se um modelo longitudinal dos dados estáticos com efeito fixo (*Static Painel Data – fixed Effects*). Foram incluídas algumas *dummies* de tempo conforme proposto por (Hwang & Shiao, 2011), no entanto, não foram significativas para o modelo. Identificaram-se picos na FAC–Função de autocorrelação para defasagens 1 a 3, que sugere um Modelo Autorregressivo de ordem 2, sendo assim foi incluído o termo AR(1) e AR (2).

Esse painel estático de efeito fixo considera que heterogeneidade característica entra as variáveis selecionada para o estudo do fluxo de carga é constante e impacta somente do

intercepto, seja em um determinado instante ou ao longo do tempo. Escolha por efeito fixo ao invés de variável deu-se, pois, as variáveis explicativas não estavam correlacionadas com o termo erro, para esse propósito foi utilizado um teste qui-quadrado para independência.

De acordo com exposto na seção 3, foram selecionadas diversas variáveis do setor aéreo, socioeconômicas e demográficas para concepção de um banco de dados com cortes transversais. Foram simulados diversos modelos, incluiu-se e retirou-se variáveis ao modelo, para verificar qual o melhor modelo ajustado. Outro ponto foi a inclusão do termo autorregressivo de ordem 2 ao modelo, identificou-se pico nos lags 1 e 2 da função de autocorrelação (FAC)

Sendo assim, segue abaixo, o modelo que melhor se ajustou para identificação do fluxo aéreo de carga semanal entre as cidades brasileiras. As variáveis de carga e decolagens foram divididas por 52 para obter em resultado de simples análise, dado volume, em quilogramas, de carga transportada, essa divisão por uma variável não afeta o modelo:

$$C_{ij,t} = \alpha + \beta_1 PIB_{i,t} + \beta_2 F_{i,t} + \beta_3 PL_{i,t} + \beta_4 D_{i,t} + \beta_5 \ln(-C)_{i,t} + \beta_6 AR(1)_{i,t} + \beta_7 AR(2)_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (8)$$

Em que  $i$ : cidade de origem  
 $j$ : cidade de destino  
 $C$ : logaritmo da carga paga semanal;  
 $\alpha$ : constante, efeito fixo;  
 $\beta_i$ : coeficientes da regressão;  
 $PIB$ : logaritmo PIB da cidade de origem multiplicado pelo da cidade de destino;  
 $F$ : logaritmo da frequência de decolagens semanal entre as cidades;  
 $PL$ : logaritmo do total do *Payload* das aeronaves dividido pela quantidade de decolagens;  
 $D$ : logaritmo da distância entre as cidades dividido pela quantidade de decolagens;  
 $AR(1)$ : termo autorregressivo de ordem 1( $C_{t-1}$ );  
 $AR(2)$ : termo autorregressivo de ordem 1( $C_{t-2}$ ); e  
 $\varepsilon$  representa o termo de erro aleatório

Depois da estimação do modelo, as variáveis, os seus coeficientes correspondentes estimados para o modelo baseado na Equação 8 foram descritos na Tabela 1. Também nessa tabela, está o resultado do teste t, demonstrados através dos p-valores correspondentes. Todos os coeficientes apresentados são significativos com nível de confiança de 95% de probabilidade.

**Tabela 2:** Regressão variável dependente Carga paga

Variáveis	Variáveis	Coefficiente	p-valor
Constante	$\alpha$	-6,0328	0,000

<b>PIB</b>	$\beta_1$	0,0174	0,012
<b>F</b>	$\beta_2$	0,0192	0,000
<b>P</b>	$\beta_3$	0,0524	0,000
<b>D</b>	$\beta_4$	0,2341	0,000
<b>C (-1)</b>	$\beta_5$	0,8080	0,000
<b>AR(1)</b>	$Y_{t-1}$	-0,1724	0,000
<b>AR(2)</b>	$Y_{t-2}$	-0,1216	0,000

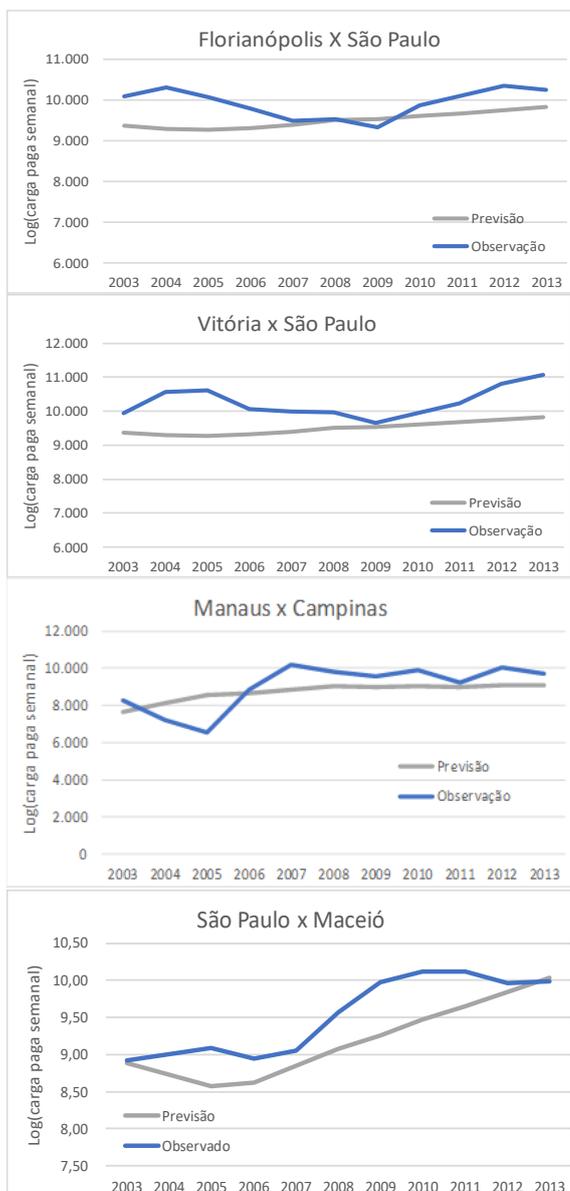
Conforme descrito, após simular diversos modelos, foram selecionados os modelos que possuíam o maior R2 e R2 ajustado, outro critério de escolha para o modelo, foi aquele que possuía o menor critério de informação AIC (Akaic Information Criteria) e BIC (Bayesiano Information Criteria), que leva em consideração a quantidade de parâmetros, ou seja, modelo parcimonioso, vis a vis a minimização da soma dos erros da regressão. O resultado dessas análises, para o modelo selecionado está na Tabela 3. Após seleciona-se o modelo, foram verificados resíduos para atender os pressupostos da análise, como normalidade homogeneidade, para detectar a presença de autocorrelação (dependência) nos resíduos foi utilizado teste de Durbin-Watson, com um nível de significância de 5%, não rejeitamos  $H_0$ , assim, dizemos que os resíduos são independentes.

**Tabela 3 – Análise das estatísticas e critérios de seleção**  
**Resultados dos testes**

<b>R<sup>2</sup></b>	0,852332
<b>R<sup>2</sup> Ajustado(ln)</b>	0,852119
<b>S. E. da Regressão</b>	1,25596
<b>F-Statistic</b>	4004.075
<b>Prob(F-Statistic)</b>	0,00000
<b>AIC</b>	3,294740
<b>BIC</b>	3,305414
<b>Durbin Watson Statistic</b>	-0,1216

### 5.3. Previsões

Depois a formulação do modelo para o fluxo de carga aérea transportada semanalmente, poder-se-á dimensionar e fazer previsões desse fluxo. Para isso realizou-se uma previsão dentro da amostra, que considera todas as informações disponíveis para estimar o modelo e verificar o poder preditivo em relação às observações dentre da própria amostra. Processaram-se as previsões e foram comparadas com os dados observados, foram vários pares de ligação entre as cidades, dobrando em número, pois considera o fluxo de ida e de volta, por exemplo, na ligação ente Manaus e Campinas, é considerado Manaus-Campinas e Campinas-Manaus



**Figura 4** – Gráficos das observações versus previsões para os pares de cidades

Como exemplo, selecionou-se uma pequena amostra de quatro pares de cidades, Figura 4, em que pode-se notar um boa aderência das previsões aos dados observados. Na totalidade das comparações, pode-se observar que o modelo suaviza os dados, sendo um bom indício, pois minimiza o erro de previsão. Esse tipo de gráfico também pode servir como um *backtesting*, ou seja, uma validação do modelo, um tipo de retrodição, validação cruzada aplicada às séries temporais.

## 6. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um modelo para o fluxo semanal de carga aérea, ele pode ser utilizado para estimar esse volume transportado, semanalmente, entre pares de cidades brasileiras, para atingir esse objetivo, aplicou-se a técnica de dados em painel autorregressivo com efeito fixo. Sendo assim, a carga pode ser explicada utilizando variáveis geoeconômicas, tais como PIB, *payload*, distância e decolagens entre as cidades, como fatores independentes, além do seu passado histórico. Foram realizadas diversas previsões dentro da amostra para analisar a série do fluxo de carga, na grande maioria dos pares de cidades, há tendência de crescimento nesse

movimento entre os municípios brasileiros. Mas no contexto atual, além de retratar o fluxo de cargas semanal nas linhas aéreas de ligação entre as diversas cidades do Brasil, o principal objeto é poder recorrer a um modelo único, de fácil aplicação, podendo ser utilizado por diversos segmentos, para medir a capacidade do volume carga, mapear e analisar as mudanças operadas nesses fluxos de mercadorias, e verificar como estão fluindo ao longo do tempo, além de prospectar o futuro desses mesmos fluxos, ou seja, fazer previsões, sendo utilizada técnica estatística apropriada para esse propósito. Esses são os resultados esperados dessa pesquisa. Ademais, o trabalho servirá de input para a elaboração de políticas públicas e privadas sobre o setor de carga aérea, para melhoria das conexões entre cidades e assim para o desenvolvimento da economia.