

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Carlos Alberto Coelho Gouveia Filho

**Estudo de caso sobre a adoção de combustíveis
alternativos para a aviação nacional e seu possível
impacto ambiental e econômico**

Trabalho de Graduação
2018

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Carlos Alberto Coelho Gouveia Filho

**Estudo de caso sobre a adoção de combustíveis
alternativos para a aviação nacional e seu possível
impacto ambiental e econômico**

Orientador

Prof. Dra. Rogéria de Arantes Gomes Eller (ITA)

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

Filho, Carlos Alberto Coelho Gouveia

Estudo de caso sobre a adoção de combustíveis alternativos para a aviação nacional e seu possível impacto ambiental e econômico.

São José dos Campos, 2018.

62f.

Trabalho de Graduação – Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2018. Orientador: Prof. Dra. Rogéria de Arantes Gomes Eller.

1. Biocombustíveis. 2. Aviação civil. 3. Tier 3. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Estudo de caso sobre a adoção de combustíveis alternativos para a aviação nacional e seu possível impacto ambiental e econômico.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FILHO, Carlos Alberto Coelho Gouveia Filho; **Estudo de caso sobre a adoção de combustíveis alternativos para a aviação nacional e seu possível impacto ambiental e econômico.** 2018. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

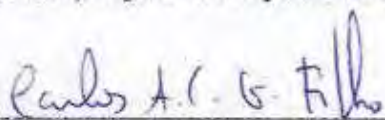
CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Carlos Alberto Coelho Gouveia Filho

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo de caso sobre a adoção de combustíveis alternativos para a aviação nacional e seu possível impacto ambiental e econômico.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2018

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Carlos Alberto Coelho Gouveia Filho
Rua Baluarte, 63
04549-010, São Paulo - SP

Estudo de caso sobre a adoção de combustíveis alternativos para a aviação nacional e seu possível impacto ambiental e econômico

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Carlos Alberto Coelho Gouveia Filho

Autor



Prof. Dra. Rogéria de Arantes Gomes Eller (ITA)

Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 14 de novembro de 2018

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, ao meu pai, a minha mãe que fizeram de tudo para eu chegar até aqui, a Débora que sempre esteve comigo me apoiando e incentivando em todos os momentos, a minha irmã e a toda minha família e amigos.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus que sempre me concedeu paz de espírito, saúde e fé para perseverar em todos os momentos de provação em minha vida.

A minha família, que fizeram de tudo para que eu pudesse seguir meus sonhos, me educaram e me deram todo carinho e amor para que eu me tornasse um cidadão digno e ser humano exemplar. Em especial, a minha mãe que, de onde ela estiver, tenho a certeza que sempre me iluminou e intercedeu por mim com seu infinito amor e cuidado e que, mesmo não estando presente fisicamente, está celebrando essa conquista como ninguém lá no céu.

A Débora, minha namorada, que há quase 6 anos me apoia, me escuta e aconselha em todos os momentos que preciso. Que está lá por mim com toda sua cumplicidade não importando o que aconteça e que quer, acima de tudo, meu bem e minha felicidade.

Aos meus amigos do ITA: Betão, Riquelme, Bunecão, Gutinho, Prof. Beachann, Fimas, Gansi', Smeagol, Sérgio, Panda, que foram fundamentais para que eu me formasse e vencesse cada provação que o Instituto impôs durante esses 5 anos.

Aos meus amigos do CMF: Betão, Mapurunga, Luca B, Castor, Cabeça e Luciano, que estiveram presentes nos 7 melhores anos da minha vida e a quem devo excelentes momentos e lembranças as quais irei carregar por toda a vida.

A todos os mestres e professores que tive tanto no CMF quanto no Colégio Ari de Sá, entre eles: Coronel Dias, Max, Leonardo, Mário Sérgio, Pedro Madeira, João Paulo, Diego Leitão, Leandro Herston, Renato Brito, Ulisses e Hamilton Andrade. A eles devo todo o conhecimento passado e tempo gasto na minha formação técnica e pessoal.

"A persistência é o caminho do êxito".

Charles Chaplin

Resumo

Com uma demanda cada vez maior pelo transporte aéreo, é inevitável a deterioração ambiental em virtude de uma maior emissão de gases poluentes oriundos dos combustíveis utilizados nas aeronaves. Nesse contexto, todos os órgãos ligados ao setor aeronáutico estão cada vez mais atentos a todos os impactos causados pela emissão de gases de efeito estufa. A partir daí o presente trabalho de graduação propõe-se a avaliar os impactos tanto ambientais (emissões) quanto econômicos do uso de combustíveis alternativos para a aviação moderna. Pretende-se realizar um estudo de caso em escopo reduzido, dado as limitações de tempo e de recursos, a fim de estimar os custos envolvidos na utilização de biocombustíveis na aviação civil em âmbito nacional. Ainda, faz-se de vital importância ressaltar os custos de adaptação da infraestrutura aeroportuária existente para acomodar a utilização de combustíveis alternativos, bem como estimar a redução da emissão de poluentes (CO₂ equivalente) advindos da utilização de combustíveis que possuam um menor fator de emissão de poluentes. Por fim, o trabalho objetiva avaliar se o benefício ambiental da referida adoção suplanta seu impacto econômico para os dias atuais e estimar, caso contrário, quando isso será possível de acontecer.

Palavras-chave: biocombustíveis, emissão de gases, efeito estufa, aviação civil, Tier 3.

Abstract

In light of an increasing demand for air transport, environmental deterioration is inevitable due to the increased emission of gaseous pollutants from aircraft fuels. In this context, all the bodies linked to the aeronautical sector are increasingly aware of all the impacts caused by the emission of greenhouse gases. From this point on, the present undergraduate work proposes to evaluate the environmental (emissions) and economic impacts of the use of alternative fuels for modern aviation. The aim is to conduct a case study with limited scope, given time and resource constraints, in order to estimate the costs involved in the use of biofuels in civil aviation at the national level. In addition, it is vitally important to highlight the costs of adapting the existing airport infrastructure to accommodate the use of alternative fuels, as well as to estimate the reduction of the emission of pollutants (CO₂ equivalent) from the use of fuels that have a lower emission factor of pollutants. Finally, the objective of this study is to evaluate whether the environmental benefit of such adoption supplants its economic impact to the present day and estimates, otherwise, when this will be possible.

Lista de Figuras

Figura 1 – Emissões de CO ₂ por tipo de movimentação, 2014 (ANAC, 2014).....	18
Figura 2 – Composição dos custos e das despesas do Transporte Aéreo Brasileiro, 2016 (ANAC, 2016).....	19
Figura 3 – Evolução da quantidade de passageiros pagos transportados – mercado doméstico e internacional, 2007 a 2016 (ANAC, 2016).....	20
Figura 4 – Projeção da demanda nacional dos principais derivados do petróleo, 2017 (EPE, 2017).....	24
Figura 5 – Evolução do preço médio internacional do barril de petróleo, 2007 a 2017 (Fundo Monetário Internacional, 2017).....	25
Figura 6 – Babaçu encontrado de forma bruta na natureza (Inpa, 2014).	27
Figura 7 – Fases de voo (EMEP/CORINAIR, 2013).	31
Figura 8 – Emissão de gases durante as fases de voo (Eurocontrol, 2014).....	32
Figura 9 – Porcentagem de penalização sobre distância voada e distância direta em km (EUROCONTROL, 2014).....	36
Figura 10 – Cadeia de procedimentos e fontes de informação utilizadas para cálculo de emissões de gases poluentes com base na metodologia Tier 3A (ANAC, 2014).	40
Figura 11 – Histórico de market share em número de movimentações por aeronave em 2013 no mercado nacional doméstico (ANAC, 2013).	42
Figura 12 – Histórico de movimentações por par origem-destino em 2013 considerando ambos os sentidos (ANAC, 2013).....	43
Figura 13 – Quadro comparativo do consumo de combustível por etapa de voo comercial em uma aeronave A320 para o trecho CGH-JK para altitudes abaixo de 914,4 metros em 2016..	48

Figura 14 – Distribuição do consumo de combustível por fase de voo comercial nacional, incluindo a fase de cruzeiro para o ano de 2016.....	49
Figura 15 – Consumo de combustíveis utilizando somente QAV e misturando com Pinhão manso na razão 50/50.	50
Figura 16 – Participação (em massa) da emissão de gases de efeito estufa para cada uma das fases de um voo comercial no trajeto CGH-JK.	53
Figura 17 – Emissões totais (em kg) de gases de efeito estufa (CO ₂ ,e) por fase de voo no trajeto CGH-JK.	53
Figura 18 – Participação de cada etapa de voo do trecho CGH-JK na emissão de poluentes atmosféricos (CO ₂ ,e)..	53
Figura 19 – Fatores de emissão por unidade de energia de QAV consumido para 6 diferentes biocombustíveis (Xunmin/ Xiliang/Shiyan/Qingfang, 2009).....	54
Figura 20 – Figura 20 – Emissão de gases de efeito estufa (em kg) para os casos em que se tem somente QAV e o que ocorre a mistura na proporção de 50/50 com Pinhão manso..	55
Figura 21 – Custo de combustíveis de aviação para o curto e longo prazo (Boeing apud Lions, 2012).....	56
Figura 22 – Comparação de preços (\$) por galão de combustíveis utilizados na aviação civil para os anos de 2014 e 2018 (Boeing apud Lions, 2012).....	57
Figura 23 – Curva de preços para QAV e Pinhão manso considerando taxas de crescimento anuais constantes de 2% e -7% para o QAV e Pinhão manso, respectivamente.	58

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Características dos dois tipos de querosene de aviação mais utilizados na aviação civil, 2018 (ExxonMobil, 2018).	23
Tabela 2 – Dados selecionados como base na metodologia explicitada no capítulo anterior..	41
Tabela 3 – Tempos por fase de voo (Anuário de emissões - ANAC, 2014).	44
Tabela 4 – Regime de potência e fluxo de combustível por etapa de voo pertencente ao ciclo LTO (OACI, 2016).	45
Tabela 5 – Consumo de combustível por etapa de voo do ciclo LTO.....	45
Tabela 6 – Tabela com consumo de combustíveis para a aeronave A320 (CORINAIR, 2015).	46
Tabela 7 – Tempo de duração por fase de utilização da APU para jatos de fuselagem estreita (ANAC, 2014).	47
Tabela 8 – Fluxo de combustível por fase de utilização de uma APU para jatos de fuselagem estreita (ANAC, 2014).....	47
Tabela 9 – Consumo de combustível por fase de utilização de uma APU.....	47
Tabela 10 – Voos de demonstração usando biocombustíveis (ICAO, 2011).	50
Tabela 11 – Emissão de gases HC, CO e NO _x (CO ₂ ,e) por fase do ciclo LTO.	51
Tabela 12 – Emissão de gases CO e NO _x (CO ₂ ,e) para a distância de 873 km.	52
Tabela 13 – Emissão de gases HC, CO e NO _x (CO ₂ ,e) por fase de utilização da APU para aeronaves com fuselagem estreita (A320).....	52
Tabela 14 – Cálculo dos Compound Annual Growth Rates para ambas as curvas, conforme	57

Lista de Abreviaturas e Siglas

ASTM American Society for Testing and Materials

ANAC Agência Nacional de Aviação Civil

GAV Gasolina de aviação

QAV Querosene de aviação

ANP Agência Nacional do Petróleo

LTO Landing and Take off

APU Auxiliary Power Unit

CAGR Compound Annual Growth Rate

OACI Organização da Aviação Civil Internacional

CORINAIR Core Inventory of Air Emissions

Lista de Símbolos

ρ_{energia}	densidade energética
C	consumo de combustível
Fe_c	fator de emissão de carbono elementar por unidade de energia
a	caracterização da aeronave utilizada
f	caracterização da fase de voo
T	tempo
E	emissão do gás
g	caracterização do gás utilizado
nM	número de motores da aeronave a
D	distância de voo
M	massa de gás consumido
φ_i	latitude de um aeródromo
λ	longitude de um aeródromo
R_T	Raio da Terra

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	17
1.2	Justificativa	19
1.3	Objetivo	21
1.4	Hipóteses / Escopo	21
1.5	Organização do texto.....	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Cenário atual.....	24
2.2	Introdução aos biocombustíveis	26
2.3	Desafios na utilização de biocombustíveis	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	Tier 1	32
3.2	Tier 3	33
3.3	Tier 3A.....	34
3.4	Emissões provenientes das APUs	36
3.5	Consumo e emissões provenientes dos biocombustíveis.....	37
3.6	Análise econômica: estimativa de custos	38
3.7	Análise econômica: perspectivas de evolução da curva de preços do biocombustível vs QAV	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1	Definição das premissas iniciais	41
4.2	Definição do tempo para cada etapa de voo pertencente ao ciclo LTO	43
4.3	Cálculo do consumo de combustível para cada etapa de voo pertencente ao ciclo LTO	44
4.4	Cálculo do consumo de combustível para a fase de cruzeiro	45
4.5	Cálculo do consumo de combustível devido ao APU.....	46
4.6	Consumo de combustível por etapa de voo	48
4.7	Consumo de biocombustíveis durante voos comerciais de origem nacional.....	49
4.8	Emissão de poluentes originados do QAV.....	51
4.9	Emissão de poluentes originados do biocombustível (Pinhão manso – Jatropha Curcas)	53

4.10	Análise econômica	55
5	CONCLUSÃO.....	58
6	REFERÊNCIAS	60

1 Introdução

A indústria de aviação global se ressent, cada vez mais, de fontes de combustíveis drop-in, isto é, biocombustíveis sustentáveis que possuam desempenho equivalente aos combustíveis fósseis utilizados na aviação comercial moderna.

De acordo com [1], os combustíveis alternativos, quando misturados com aqueles de origem fóssil em concentrações inferiores a 50%, devem atender às mesmas características de desempenho dos combustíveis convencionais. Dessa forma, tais biocombustíveis podem ser misturados com aqueles derivados do petróleo até uma proporção previamente definida de tal forma que o produto final exija a mesma infraestrutura de abastecimento e não requeira adaptações nas aeronaves ou nas turbinas.

1.1 Motivação

A preocupação mundial com as mudanças climáticas está atrelada, em grande parte, ao uso cada vez mais frequente de combustíveis fósseis, visto que quanto mais globalizado a sociedade moderna se torna, maior é a necessidade de transpor barreiras físicas, o que é totalmente viabilizado pela maior utilização do transporte aéreo. Na Figura 1, mostra-se uma tendência crescente quanto à emissão de poluentes provenientes do transporte aéreo. Nesse contexto, em 2009, o setor de transportes foi responsável por 22% das emissões globais de gases de efeito estufa devido ao uso exclusivo de combustíveis fósseis, segundo [2].

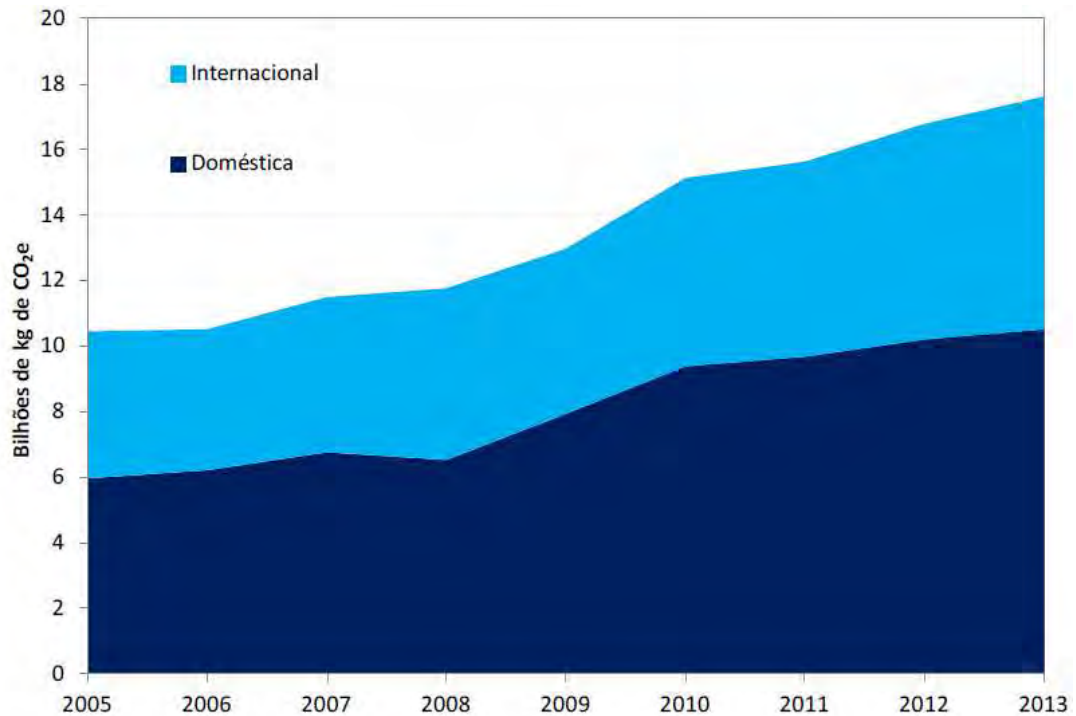


Figura 1 – Emissões de CO₂ por tipo de movimentação, 2014 (ANAC, 2014).

Em particular, o setor de aviação foi responsável por, aproximadamente, 12% das emissões globais de gases de efeito estufa em 1990. Dez anos depois, tal valor sofreu uma drástica redução caindo para 2%, ainda de acordo com [2]. Entretanto, vale a pena ressaltar que tal queda se deveu, principalmente, a um maior crescimento na emissão de poluentes advindos de outros modais de transporte do que propriamente da redução no volume nominal de emissões da aviação.

O que agrava mais ainda a situação é que, de todos os setores que fazem uso intensivo de recursos energéticos, aquele que apresenta uma maior dificuldade no equacionamento dos perfis de combustíveis é o transporte aéreo seja tanto no médio quanto no longo prazo. Para o caso dos segmentos terrestre e marítimo, algumas alternativas energéticas se fazem viáveis, tais como biocombustíveis, bioeletricidade ou até mesmo energia nuclear.

No caso da aviação comercial, no entanto, apenas a alternativa de biocombustíveis se faz plausível, visto que não existe a possibilidade de se usar eletricidade em larga escala no segmento de transporte aéreo e a solução nuclear apresenta natural inviabilidade. Nesse contexto, estudos atuais focam, principalmente, em biocombustíveis como alternativa para os jet-fuels convencionalmente empregados na indústria.

Por fim, o presente trabalho de graduação visa analisar algumas questões fundamentais no que tange ao uso dessas fontes sustentáveis no cotidiano da indústria de transportes aéreos,

tais como: a adoção de combustíveis drop-in constitui uma solução viável para emprego em larga escala na aviação civil? Qual o montante de custos envolvidos na adoção dessa alternativa? Ainda, como tal valor se compara com a atual estrutura de custos que tem por base a utilização de combustíveis de origem fóssil? Qual seria, de fato, o impacto que tais soluções causariam na emissão de gases poluentes? Quais seriam os desafios em termos de escala e logística que esse biocombustível enfrentaria? No que tange à infraestrutura aeroportuária, existiriam impactos adaptativos relevantes que pudessem levar à não adoção de tal solução?

1.2 Justificativa

Tendo por base o Anuário de Transporte Aéreo da ANAC [3], combustíveis e lubrificantes de aeronaves constituíram a maior fonte de custos e despesas dos voos nacionais em 2016, com participação de 24,5% no montante total. Já em 2015, o mesmo item teve participação um pouco maior, de 29,5%. A Figura 2 mostra a composição dos principais custos e despesas presentes no Transporte Aéreo Brasileiro em 2016.

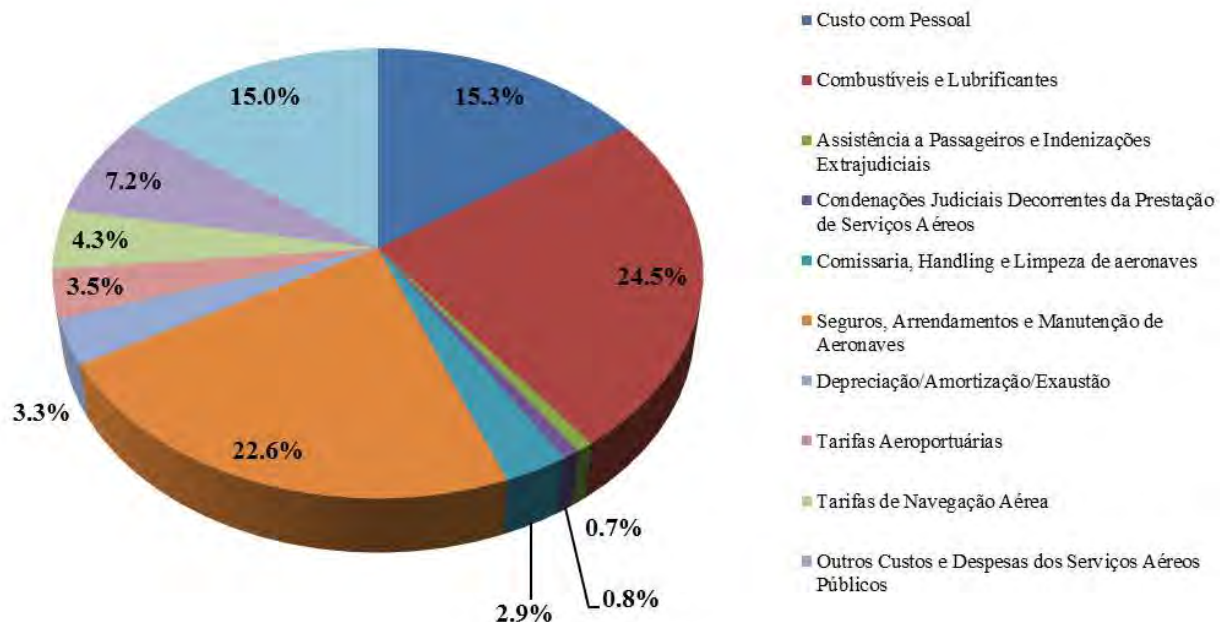


Figura 2 – Composição dos custos e das despesas do Transporte Aéreo Brasileiro, 2016 (ANAC, 2016).

Além disso, avaliando-se a questão da demanda global por voos comerciais, o número de passageiros pagos quase dobrou em um horizonte de apenas 10 anos, passando de 59,7 em 2007 para 109,6 milhões em 2016 como pode ser visto na Figura 3. Para o futuro, existe uma possibilidade clara da demanda continuar crescendo em ritmo acelerado, visto que a necessidade pelo transporte aéreo poderá ser bem maior e impulsionada pelo aumento da população global bem como das econômicas em crescimento. De acordo com [2], até 2050 o setor de aviação será responsável por 3% das emissões de gases de efeito estufa, frente aos 2% anteriormente relatados em 2009.

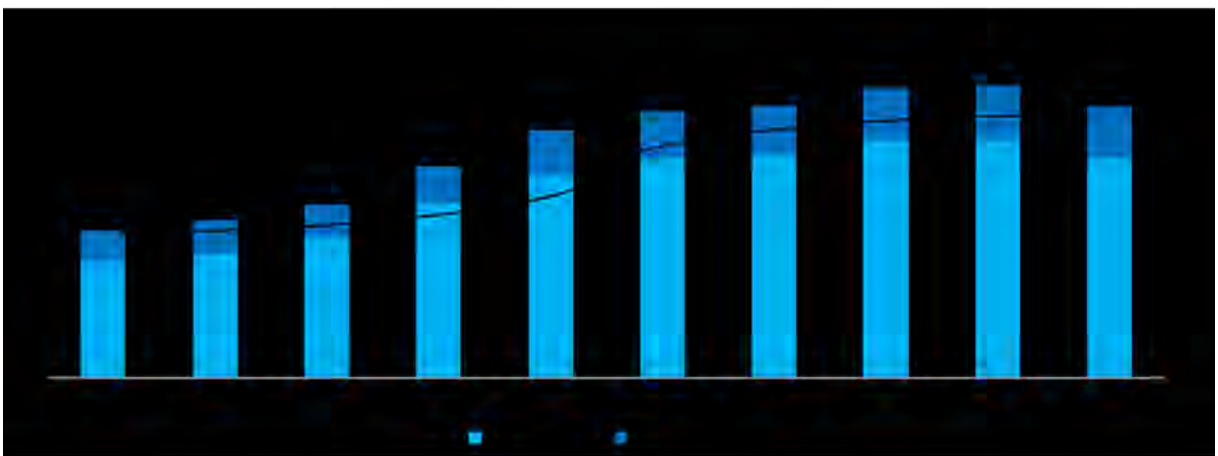


Figura 3 – Evolução da quantidade de passageiros pagos transportados – mercado doméstico e internacional, 2007 a 2016 (ANAC, 2016).

Nesse contexto, com um substancial aumento nas emissões de gases de efeito estufa e um cenário de crescimento na demanda pelo transporte aéreo, os próprios órgãos reguladores definiram metas de estabilização quanto à concentração de CO₂ e outros gases poluentes na atmosfera. Caso tais objetivos não sejam atingidos, outras medidas deverão ser tomadas, que vão além da restrição das operações de tráfego aéreo e da redução do peso das aeronaves.

Dessa forma, faz-se de grande valia um estudo sobre a viabilidade do uso de biocombustíveis na aviação comercial. Estudo esse que irá focar em duas frentes primordiais no estudo da viabilidade dessa solução, englobando tanto uma análise do impacto econômico dos combustíveis drop-in – dado que esse item representa a maior fonte de custos das companhias aéreas –, quanto uma análise do impacto na emissão de poluentes que tal solução poderá trazer. Tais análises serão baseadas em simulações a partir tanto de uma rota quanto de uma aeronave pré-definida. Daí, irão ser produzidos diversos cenários com base em diferentes

matérias primas e diferentes graus de concentração na mistura com os jet-fuels usados atualmente.

1.3 Objetivo

O presente projeto objetiva desenvolver um estudo de caso prático para estimar os impactos ambientais e econômicos relacionados ao uso de combustíveis alternativos para a aviação comercial nacional. Diante dos resultados, efetuar a análise de viabilidade da solução proposta com relação à estrutura de custo atual das companhias aéreas nacionais que, por sua vez, utilizam combustíveis de origem fóssil. Por fim, avaliar se o impacto ambiental é, de fato, relevante tendo em vista os possíveis esforços adaptivos, principalmente com relação às mudanças na infraestrutura aeroportuária que a nova tecnologia poderia requerer.

1.4 Hipóteses / Escopo

A hipótese inicial é de que, nesse primeiro momento, a solução de substituir o QAV amplamente utilizado em voos domésticos na aviação civil por qualquer biocombustível em escala comercial no âmbito nacional não é eficaz em termos financeiros. Porém, a hipótese se baseia na crença de que, com o contínuo avanço técnico-científico na busca de um combustível que gere menos gases de efeito estufa, tal solução será economicamente viável em um horizonte de tempo, no máximo, 4 anos.

Com isso, o escopo criado neste trabalho engloba a análise de um trecho nacional (par origem-destino) realizado por uma aeronave selecionada com a utilização de dois tipos de combustível: o primeiro deles é o já conhecido QAV, e o segundo sendo a proposta de biocombustível sujeito à análise de viabilidade. A escolha das variáveis de estudo será posteriormente descrita na seção de Resultados e Discussões do presente trabalho de graduação.

1.5 Organização do texto

O trabalho estrutura-se de acordo com as seguintes partes: no capítulo 1 faz-se a introdução do assunto ressaltando sua importância para as questões ambientais hodiernas, descrevendo ainda os objetivos e as hipóteses/escopo do presente trabalho. Já no capítulo 2 é apresentado um referencial teórico do problema em questão, o qual contempla: uma breve

descrição do cenário atual em termos de emissão de poluentes, os principais biocombustíveis em estudo na atualidade e, por fim, um breve resumo sobre os desafios quanto à utilização da alternativa aqui proposta. No capítulo 3 apresenta-se a metodologia na qual será descrita a formulação do problema e as fontes de embasamento utilizadas. De forma adicional, esse capítulo engloba ainda a apresentação detalhada das equações matemáticas que serão empregados a fim de realizar todas as estimativas necessárias. No capítulo 4, os resultados para as análises previamente descritas serão apresentados e discutidos. Por fim, o capítulo 5 contém a conclusão acerca dos resultados alcançados nas análises, alguns cenários de sensibilidade com as variáveis empregadas e sugestões de possíveis esforços futuros baseados nos frutos do presente trabalho de graduação.

2 Referencial teórico

A demanda global por querosene de aviação vem tomando proporções gigantescas de forma a já possuir volumes de consumo na mesma ordem de grandeza dos da gasolina. Em 2009, somente os EUA foram responsáveis por um consumo de 92 bilhões de litros de querosene de aviação de acordo com [4]. No mesmo ano, a demanda total pelo mesmo produto foi de 319 bilhões, o que representou cerca de um quarto do consumo total de gasolina. Vale ressaltar que no Brasil são consumidos, principalmente, dois tipos de combustíveis aeronáuticos: o primeiro deles é a gasolina de aviação, utilizada nos motores a pistão e, o segundo, é o querosene de aviação, o qual destina-se ao uso nas turbinas aeronáuticas.

A gasolina de aviação (GAV) é produzida a partir de uma mistura de hidrocarbonetos com, predominantemente, 5 a 10 átomos de carbono. De forma geral, ela é obtida através da reforma catalítica seguida de isomerização, polimerização e alquilação, tendo por objetivo apresentar alto índices de desempenho para uso aeronáutico. Por outro lado, o querosene de aviação (QAV), também conhecido como jet-fuel, possui componentes mais pesados que os da GAV e contém entre 9 e 16 átomos de carbono. Além disso, corresponde a uma fração dos produtos destilados a partir do petróleo bruto.

Vale ressaltar que, independentemente da substância a ser produzida, a ANP (Agência Nacional do Petróleo) estabelece normas rígidas com relação aos requisitos técnicos que tais elementos devam ter de forma a atender diferentes demandas, seja em voos domésticos ou em

internacionais, como mostrado na Tabela 1. De forma geral, além de cumprir os condicionantes de preço e de disponibilidade, tais combustíveis devem apresentar:

- Alta densidade energética: produtos com elevados poderes calorífico e densidades, porém com peso e volume reduzidos.
- Potências elevadas: combustíveis que apresentem misturas com alta taxa de compressão, permitindo assim uma maior potência. Nesse aspecto, vale ainda ressaltar que tal razão de compressão é diretamente ligada à octanagem da gasolina, o que pode ser melhorada através do uso de aditivos.
- Volatilidade adequada: produtos que possuam relativa facilidade de assumir a forma de vapor, o que pode ser eventualmente dificultado dado que os atuais combustíveis fósseis são compostos por vários hidrocarbonetos com diferentes temperaturas de ebulição além de curvas de destilação característica.
- Baixo ponto de congelamento: característica essa que visa evitar a formação de cristais nos tubos de alimentação das aeronaves que, por sua vez, estão diariamente expostas a temperaturas dezenas de graus abaixo de zero.
- Quimicamente estável e com baixa corrosividade: devido ao grande tempo de armazenagem a que esses produtos são expostos, eles devem apresentar significativa resistência a processos de oxidação.

Em virtude de todas essas rígidas especificações técnicas, é comum a utilização de aditivos nos combustíveis aeronáuticos. Tais elementos detêm as mais amplas funções, tais como: antidetonantes, antioxidantes, dissipadores de carga eletrostáticas, anticorrosivos, anticongelantes, entre outros.

Característica	Jet A-1	Jet A
Ponto de fulgor	42°C	51,1°C
Temperatura de autoignição	210°C	210°C
Ponto de congelamento	-47°C	-40°C
Temperatura de combustão	260-315°C	260-315°C
Densidade a 15°C	804 kg/L	820 kg/L
Energia específica	43,15 MJ/kg	43,02 MJ/kg
Densidade energética	34,7 MJ/L	35,3 MJ/L

Tabela 1 - Características dos dois tipos de querosene de aviação mais utilizados na aviação civil, 2018 (ExxonMobil, 2018).

2.1 Cenário atual

Como já explicado anteriormente, o contexto atual da indústria global de aviação baseia-se, quase que inteiramente, na demanda por combustíveis derivados de componentes fósseis. De acordo com [5], a demanda brasileira por esses produtos acarretou em uma produção de 297 mil metros cúbicos, por dia, em 2017. Além disso, as refinarias brasileiras foram responsáveis pela produção de 62% desse montante nacional, sendo o restante importado de outros países. Ainda segundo o plano decenal de expansão de energia, mostrado na Figura 4 (EPE, 2017), a produção do combustível de aviação prevê um aumento em sua demanda para 346 mil metros cúbicos, por dia, em 2026, sendo 35% desse valor advindo da manufatura interna. Em adição, óleo diesel, do tipo A, seguido de gasolina, também tipo A, possuíram as maiores representatividades em comparação com os outros derivados em 2017, sendo fatias de 44% e 25% respectivamente.

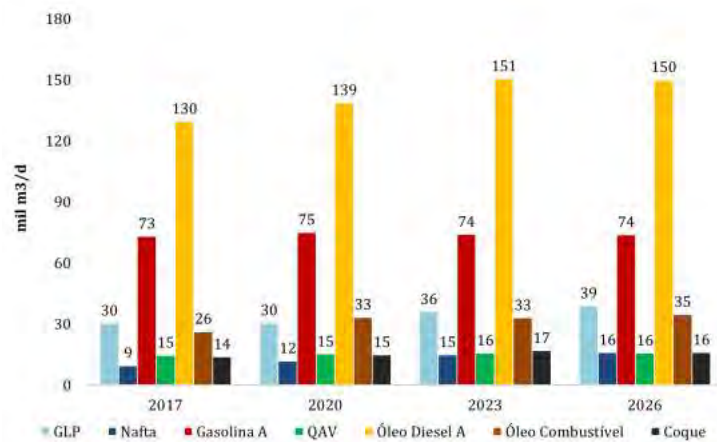


Figura 4 – Projeção da demanda nacional dos principais derivados do petróleo, 2017 (EPE, 2017).

Nesse contexto, dado que a indústria de aviação comercial possui combustíveis com demandas crescentes no longo prazo e que esses ainda são a principal fonte dos custos das companhias aéreas brasileiras, pode-se elencar duas principais preocupações quanto ao fato de se ter uma indústria tão atrelada aos produtos acima mencionadas.

A primeira delas consiste no fato de que os preços do barril de petróleo negociados nas bolsas internacionais possuem grande volatilidade, como mostrado na Figura 5, a qual mostra

oscilações de mais de 50% nesses preços em intervalos de apenas dois anos. Dessa forma, tal comportamento imprevisível introduz preocupações quanto às dificuldades consideráveis no planejamento orçamentário e na administração gerencial das companhias aéreas tanto a nível nacional quanto global. Vale ressaltar que a precificação desses combustíveis é geralmente feita de acordo com três modelos: fórmula baseada no mercado, paridade das importações e, por fim, preço fixado. Tomando por base o primeiro modelo – precificação baseada no mercado – o spread médio em relação ao preço do petróleo bruto negociado é de US\$9.6 por barril (Ebner, 2012a).



Figura 5 – Evolução do preço médio internacional do barril de petróleo, 2007 a 2017 (Fundo Monetário Internacional, 2017).

A outra preocupação é representada pelo impacto ambiental causado pela emissão de gases de efeito estufa que, por sua vez, tem tido um impacto cada vez maior no meio ambiente terrestre. Como já mencionado no capítulo anterior, o setor de aviação foi responsável por 2% da emissão total de poluentes em 2009. Dado que o consumo de combustíveis de aviação bem como a demanda por produtos derivados de petróleo só tende a aumentar futuramente, espera-se que o nível de emissão de poluentes na atmosfera em 2050 atinja um nível 6 vezes maior do que o atual de acordo com [2].

Nesse contexto, existem diversos tipos de gases que são considerados poluentes e contribuem com o aumento dos níveis de poluição. São eles: óxidos de nitrogênio (NO_x), óxido nitroso (N_2O), monóxido e dióxido de carbono (CO e CO_2), dióxido de enxofre (SO_2), metano (CH_4), compostos orgânicos voláteis (COV), dentre outros materiais particulados (MP)

– que são partículas de matéria sólida ou líquido que possuem uma diversa variedade de componentes químicos (EMEP/EEA, 2013).

Com base nas projeções de crescimento do tráfego aéreo, em nível global, combinado com a pressão pública para um sistema mais sustentável de transporte aéreo, a OACI definiu metas ambiciosas para seus associados. Entre outros aspectos, foi estabelecido que:

- A melhoria da eficiência média da frota deve ser de 2,0% a.a, até 2020;
- O biocombustível a ser utilizado deve ser misturado com o jet-fuel convencional (drop in fuel), deve usar o mesmo tipo de infraestrutura atual e não deve exigir adaptações das aeronaves ou das turbinas;
- O biocombustível de aviação deve atender as mesmas especificações do jet-fuel e, além disso, deve atender critérios de sustentabilidade, como redução das emissões de carbono no ciclo de vida, não competir por suprimento de água e não competir com a produção de alimentos, além de não ocasionar desmatamento;
- As emissões setoriais devem ter uma redução absoluta de 40% até 2050 em comparação com 2000.

2.2 Introdução aos biocombustíveis

Na atualidade, em escala global, os biocombustíveis com potencial para substituir o querosene de aviação são essencialmente obtidos a partir de óleos vegetais, de origem diversificada, tratados em processos termoquímicos (craqueamento catalítico), ou transesterificados de forma convencional e ajustados para as especificações aeronáuticas e, em cenários ainda incertos, os produtos de processos fermentativos avançados, como descritos a diante.

Além das matérias-primas que vêm sendo utilizadas de forma ampla na produção de biodiesel no Brasil e no exterior, como soja, colza, palma e sebo, que dispensam descrição, outras fontes de óleos vegetais têm sido propostas nos estudos e testes em curso, em especial para a produção dos biocombustíveis destinados ao uso em turbinas aeronáuticas, como pinhão manso, babaçu, falso linho ou camelina e algas. Os principais fatores que justificam o interesse nessas culturas são a produtividade potencial e a possibilidade de cultivo em terras marginais, bem como a composição em termos de óleos graxos.

Um dos principais candidatos a biocombustível, atualmente, é o pinhão manso (*Jatropha curcas*) da família das Euforbiáceas. Essa planta é considerada pouco exigente e bem adaptada aos climas mais secos e solos fracos, podendo apresentar boa produtividade de sementes oleaginosas. O óleo de pinhão manso é composto basicamente por ácidos graxos insaturados com 18 átomos de carbono, como o ácido linoleico e ácido oléico. Tais características conferem bom potencial para a produção de biocombustíveis e têm motivado um grande interesse nesse vegetal. Em países como Índia e Tailândia, onde o pinhão manso é utilizado de modo incipiente para fabricação de biodiesel, a colheita do pinhão se dá apenas um ano após o cultivo e alcança, no quarto ano sua estabilidade de produção (DRUMOND, 2007).

Outro vegetal bastante famoso é o babaçu, o qual é uma palmeira de grande porte da família das Arecaceae, nativa na região de transição entre a caatinga e a floresta amazônica, dotada de frutos drupáceos com sementes oleaginosas e comestíveis, empregado na alimentação e com potencial para a produção de biocombustíveis. Os principais componentes do óleo do babaçu são ácidos graxos saturados: ácido láurico, ácido mirístico e ácido palmítico, sendo um óleo mais leve que a maioria dos óleos vegetais e mais adequado à produção do bioquerosene. A safra vai de setembro a março e os principais produtos comerciais extraídos do babaçu são o óleo e a torta resultante do processo de extração do óleo (VIVACQUA, 1968).



Figura 6 – Babaçu encontrado de forma bruta na natureza (Inpa, 2014).

Ainda que o óleo de babaçu dê origem a um biodiesel de alta qualidade, com alto índice de cetano e boa estabilidade à oxidação, suas características de escoamento a baixas temperatura são piores que produtos de igual peso molecular, mas com níveis mais elevados de insaturação. Ademais, embora os babaçuais sejam um importante recurso natural e a sua exploração extrativista seja fonte de subsistência para muitos brasileiros, ocupando milhões de hectares do território nacional, as informações agrônômicas sobre essa palmeira são escassas quanto aos

aspectos produtivos, pragas e doenças, que são dados fundamentais para promover seu uso em bases econômicas. Observações similares poderiam ser feitas sobre outras palmeiras de bom potencial, como a macaúba (*Acrocomia aculeata*) e o licuri (*Syagrus coronata*), que devem merecer mais atenção (VIVACQUA, 1968).

Além disso, todos esses insumos necessitam de rigorosos processos de manufatura dadas as rígidas normas técnicas que os combustíveis de aviação devem cumprir perante os órgãos reguladores. Os processos de obtenção de biocombustíveis com perspectivas de substituir o querosene de aviação podem ser:

- Químicos: como a transesterificação e o hidrocrackeamento catalítico, em ambos os casos, utilizando como matéria-prima óleos vegetais ou gorduras animais;
- Termoquímicos: utilizando em geral biomassa lignocelulósica, inicialmente gaseificada, com posterior produção de hidrocarbonetos líquidos, e
- Bioquímicos: empregando leveduras ou bactérias modificadas, capazes de processar açúcares e produzir hidrocarbonetos.

Atualmente, o processo mais desenvolvido para a produção de biodiesel é a transesterificação (considerado um processo químico), que pode ser seguida da separação das frações mais leves, para acerto das especificações e obtenção de um biocombustível similar ao querosene. A transesterificação é um processo de conversão de triglicerídeos (gorduras animais ou óleos vegetais) a ésteres de ácidos graxos e glicerina, através da reação com alcoóis (geralmente metanol, podendo ser utilizado também o etanol, com menor rendimento). Como catalisadores em geral são utilizadas bases fortes, podendo também ser adotados ácidos ou enzimas (SCHUCHARDT et al., 1998). Os produtos finais dessa reação são os ésteres metílicos ou etílicos, com composição correspondente aos ácidos graxos disponíveis na matéria-prima processada e a glicerina.

Para a produção do bioquerosene, considerando as especificações necessárias para o uso aeronáutico, é necessária uma etapa posterior de purificação e separação das frações mais adequadas para uso em turbinas a gás (PARENTE, 2008).

2.3 Desafios na utilização de biocombustíveis

Nos últimos anos têm sido apresentados diversos projetos e programas relacionados a biocombustíveis de aviação. Estas atividades, tanto no Brasil como no exterior, têm envolvido empresas aéreas, fabricantes de aviões, turbinas aeronáuticas e institutos de pesquisas ligados à prospecção de combustíveis alternativos. A seguir, são sumarizadas algumas dessas iniciativas no exterior que, em diferentes níveis de maturação, indicam o crescimento do interesse nesse grupo de biocombustíveis:

- Em julho de 2008, a British Airways divulgou um programa de avaliação de quatro combustíveis alternativos em um banco de ensaio de turbinas Rolls Royce. Em março de 2009, essa companhia informou estar tendo dificuldades para obter biocombustível para os testes, contudo essa dificuldade aparentemente foi superada, pois em novembro do mesmo ano confirmou esses testes, sem informar os tipos de biocombustíveis ou apresentar detalhes (A SEMANA, 2010).
- A empresa norte-americana Rentech informou que está produzindo combustível sintético para jatos e diesel renovável em sua planta de demonstração no Colorado (EUA). A tecnologia empregada é termoquímica, associada a um processo Fischer-Tropsch modificado. Essa companhia informou ainda ter assinado contratos com 13 companhias aéreas para entrega de biocombustíveis produzidos a partir da biomassa de resíduos sólidos. Quando estiver em plena operação, espera produzir 600 mil barris por dia de combustíveis sintéticos e 35 MW de energia elétrica (WORLD BIOFUELS MARKETS NEWS, 2010).

Já em nível nacional, em maio de 2010 um grupo de dez empresas dos setores aeronáutico, transporte aéreo e de desenvolvimento de combustíveis fundou a Aliança Brasileira para Biocombustíveis de Aviação (Abraba), com o objetivo de promover o uso desta fonte de energia. Essa iniciativa teve como motivações básicas promover a segurança de suprimento e eventualmente a competitividade dos biocombustíveis frente aos combustíveis fósseis, bem como a reconhecida capacidade do Brasil em bioenergia e o menor impacto ambiental dos biocombustíveis.

Participam da Abraba, a Embraer, indústria aeronáutica brasileira de classe mundial, a Associação das Indústrias Aeroespaciais do Brasil, as companhias aéreas TAM, Gol, Azul e Trip, e representantes e empresas produtoras de biocombustível: a União da Indústria de Cana-de-açúcar (Unica), a Algae Biotecnologia, a Amyris Brasil e a Associação Brasileira de Produtores de Pinhão Manso (ABPM). Essa associação, aberta a outras empresas, tem o

objetivo de “promover iniciativas públicas e privadas que busquem o desenvolvimento e a certificação de bicomustíveis sustentáveis para a aviação por meio de diálogos com criadores de políticas públicas” e a formação de uma visão positiva dos biocombustíveis aeronáuticos pelo público e pelos tomadores de decisão, defendendo ainda que esses combustíveis devem apresentar preços competitivos e alcançar os mesmos níveis de segurança que o querosene de aviação (BIODIESELBR, 2010).

3 Metodologia

Como explicado anteriormente, um dos objetivos desse trabalho de conclusão de curso é o de analisar os impactos que a utilização de biocombustíveis possui vis-a-vis os jet-fuels utilizados hoje em dia em termos tanto econômicos quanto ambientais.

Primeiramente, focou-se na determinação da emissão dos poluentes para os dois tipos de combustível em questão. Para tanto, o IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, desenvolveu protocolos que são extensamente utilizados nos dias atuais. Tal metodologia (IPCC, 2006) segmentou os níveis de detalhamento da análise de emissão de gases de efeito estufa em tiers (o que significa definir a metodologia por “camadas” de complexidade de análise) de forma que, quanto maior a numeração da camada, maior o nível de detalhamento. No entanto, antes de explicitar a camada utilizada e o porquê da escolha, vale à pena descrever alguns conceitos a fim de tornar o entendimento da metodologia propriamente dita mais fluida e compreensível.

Primeiramente, o ciclo completo de voo (EEA, 2017) de uma aeronave, conforme mostrado na Figura 7, envolve duas macros etapas, que podem ser denominadas como:

- Ciclo LTO (partida e chegada – excluindo a fase de cruzeiro): contempla todas as etapas do voo nos quais a aeronave se encontra em uma altitude menor que 914,4 metros, sendo assim composto por 6 fases:
 - Taxi de partida (Taxi out);
 - Decolagem (Take off);
 - Início da subida para etapa de cruzeiro (Climb out);
 - Aproximação final (Final approach);
 - Toque e corrida de desaceleração (Landing);

- Taxi de chegada (Taxi in).
- Etapa de cruzeiro: contempla 3 fases nas quais a aeronave se encontra acima da altitude de 914,4 metros, as quais são:
 - Continuação da subida para a etapa de cruzeiro (Climb);
 - Cruzeiro (Cruise);
 - Descida (Descent).

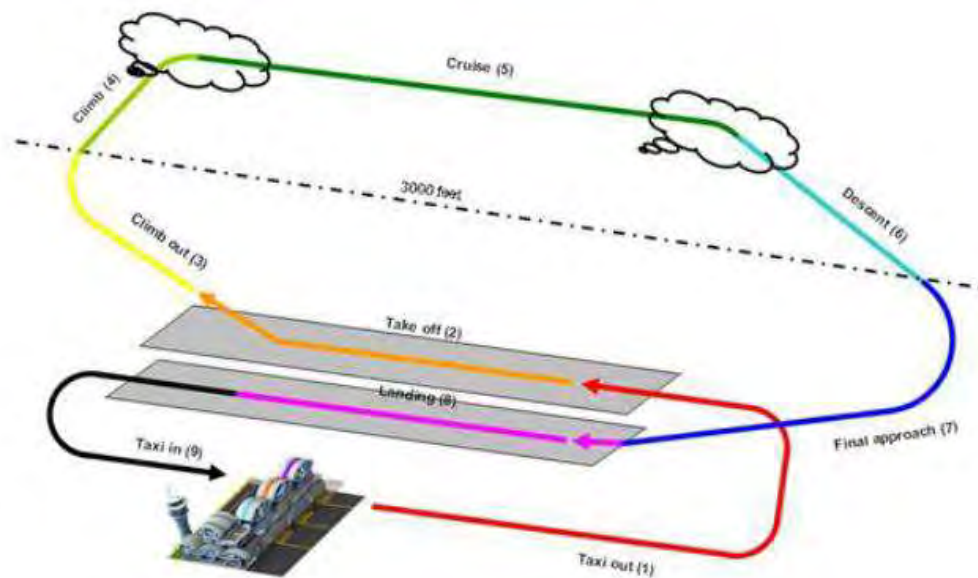


Figura 7 – Fases de voo (EMEP/CORINAIR, 2013).

Dessa forma, durante cada uma das etapas acima mencionadas existe a emissão de uma vasta gama de gases de efeito estufa em diferentes intensidades. Nesse contexto, a Figura 8 ilustra a dinâmica do fluxo e da queima de combustível, bem como da emissão de poluentes durante o voo.

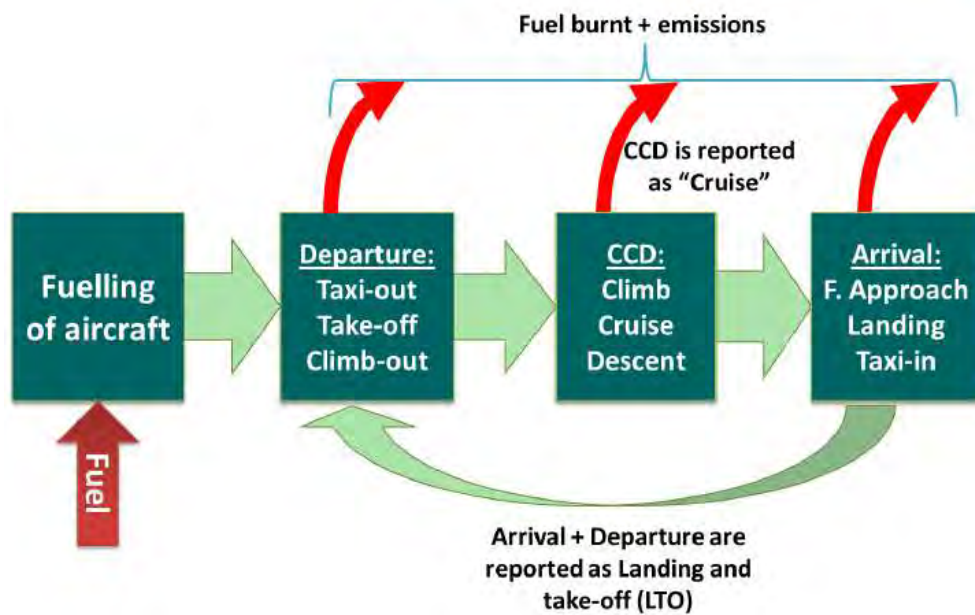


Figura 8 – Emissão de gases durante as fases de voo (Eurocontrol, 2014).

Além disso, vale ressaltar que, para muitos voos destinados ao transporte doméstico, existem as chamadas APUs que são equipamentos formados por uma turbina a gás conectada a um gerador elétrico. De acordo com [6], tais equipamentos têm por objetivo suprir o fornecimento de energia elétrica durante as operações em solo e localizam-se no cone das caudas das aeronaves após a caverna de pressão. Portanto, as emissões de gases de efeito estufa provenientes de um APU são através da combustão do QAV.

3.1 Tier 1

O método Tier 1 não será explorado no presente trabalho de graduação devido a razões posteriormente expostas. No entanto, faz-se de grande valia uma breve explicação a cerca do que tal procedimento considera em sua análise. Ainda de acordo com [6], tal método se baseia, em suma, em uma abordagem top-down para estimar a emissão de poluentes com base apenas no consumo de combustível na operação aeroviária em questão. Logo, não sendo levados em consideração informações sobre as etapas do voo. Como exemplo, reproduz-se o racional para as emissões de CO₂ segundo a Equação 1:

$$E(\text{CO}_2) = \text{Cons} \cdot \rho_{\text{energia}} \cdot F_{\text{Ec}} \cdot (\% \text{O}_2) \cdot \frac{44}{12} \quad (1)$$

No qual, de [6]:

- $E(\text{CO}_2)$: emissão anual de CO_2 (tCO_2/ano);
- Cons : consumo ou doméstico ou internacional de combustível (m^3/ano);
- ρ_{energia} : densidade energética do combustível utilizado (tep/m^3);
- Fe_c : fator de emissão de carbono elementar por unidade de energia contida no combustível (tC/TJ);
- $\% \text{Oxi}$: fração do carbono elementar oxidado no processo de combustão;
- $\frac{44}{12}$: razão entre as massas moleculares de CO_2 e do carbono elementar (gCO_2/gC).

Tem-se ainda que, para conversão de unidades entre a densidade energética e o fator de emissão deve-se utilizar a taxa $1 \text{ TJ} = 0,041868 \text{ tep}$.

3.2 Tier 3

Com base ainda em [6], pode-se também estimar a emissão de gases de efeito estufa com base na metodologia Tier 3. Tal método, por sua vez, segmenta as emissões como um produto do consumo de combustível por fases de voo, sendo então uma metodologia mais exata quando comparada ao método Tier 1. Logo, tomou-se a presente metodologia como base para a obtenção dos resultados desse trabalho de graduação. Vale ressaltar ainda que, como o Tier 3 leva em consideração as diferentes etapas do voo, só é necessário segmentar o ciclo de voo em duas etapas: ciclo LTO e cruzeiro.

Tem-se então que, em linhas gerais, a emissão de gases de efeito estufa se originam do consumo de combustível aeronáutico que, por sua vez, seguem a Equação 2 e 3 abaixo descritas para fases do ciclo LTO:

$$C_{a,f,p} = nM_a \cdot F_{Ca,f} \cdot t_{a,f,p} \quad (2)$$

$$E_{g,a,f,p} = F_{Eg,a,f} \cdot C_{a,f,p} \quad (3)$$

No qual, de [6]:

- C representa o consumo de combustível da aeronave a , em kg, para cada fase f (do ciclo LTO) de voo no aeródromo p ;
- nM significa o número de motores da aeronave a ;

- F_c é o fluxo de combustível, expresso em kg/s, por motor da aeronave a na fase f (do ciclo LTO);
- t significa o tempo, em segundos, no qual a aeronave a permanece na fase f (do ciclo LTO) no aeródromo p;
- E representa a emissão, em kg, do gás g, em $\text{kg}_{\text{gás}} / \text{kg}_{\text{combustível}}$, da aeronave a na fase f (do ciclo LTO).

3.3 Tier 3A

Além disso, sabe-se ainda que a fase de cruzeiro também é responsável por uma considerável emissão de gases dado seu longo tempo quando comparada às outras fases. Para tanto, o presente trabalho de conclusão de curso utiliza a metodologia Tier 3A que se baseia, por sua vez, em nas distâncias entre aeródromos (EMEP/CORINAIR, 2013). Daí a própria CORINAIR gera uma tabela contendo o consumo de combustível e as emissões totais por aeronave. Uma vez que se tem as referidas distâncias para cada família de aeronaves, pode-se interpolar linearmente os dados da tabela mencionada anteriormente de acordo com a Equação 4:

$$M_{a,d,g} = Y_{1,a,g} + (Y_{2,a,g} - Y_{1,a,g}) \cdot \frac{(D - X_1)}{(X_2 - X_1)} \quad (4)$$

No qual:

- D representa a distância de voo, em km, entre os aeródromos de origem e destino;
- M significa a massa, expressa em kg, do combustível consumido ou do gás emitido g no voo com distância D realizado pela aeronave a;
- X_1 representa a distância (tabelada) imediatamente inferior à distância D;
- X_2 representa a distância (tabelada) imediatamente superior à distância D;
- Y_1 significa a massa de combustível consumida ou do gás g emitida (tabelada) para a aeronave a considerando a distância X_1 ;
- Y_2 significa a massa de combustível consumida ou do gás g emitida (tabelada) para a aeronave a considerando a distância X_2 .

Ainda, vale ressaltar que a distância D é calculada, em linhas gerais, como a menor distância medida entre dois pontos ao longo da superfície de uma esfera (EMEP/CORINAIR, 2013), o que pode ser visto na Equação 5.

$$D = 2 \cdot \arcsen\left(\sqrt{\text{sen}^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \text{sen}^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}\right) \cdot R_T \quad (5)$$

No qual:

- D representa a distância direta estimada;
- $\Delta\varphi$ significa a diferença entre as latitudes dos aeródromos contigas no par origem-destino;
- φ_1 é a latitude do aeródromo de origem;
- φ_2 é a latitude do aeródromo de destino;
- $\Delta\lambda$ representa a diferença entre as longitudes dos aeródromos do par origem-destino;
- R_T significa o raio médio da Terra.

Todavia, sabe-se que a maioria dos voos comerciais nacionais não seguem o trajeto mínimo entre seu aeródromo de origem e destino, pois outros fatores envolvidos podem ser determinantes tais como: posição de fixos de navegação, aeroportos com órbita de espera congestionada ou eventos meteorológicos (ANAC, 2014).

Com o intuito de simular as reais distâncias percorridas pelas aeronaves na vida real, estimou-se um fator de “penalização” que pode variar entre 9% a 10% com relação a distância direta calculada (IPCC, 1999). Já de [7], apresenta-se um levantamento da relação média entre as distâncias reais e as distâncias diretas das rotas conforme Figura 9, a qual segue Equação 6:

$$\Delta_{\text{distâncias}} (\%) = \frac{(D_{\text{real}} - D_{\text{direta}})}{D_{\text{direta}}} \quad (6)$$

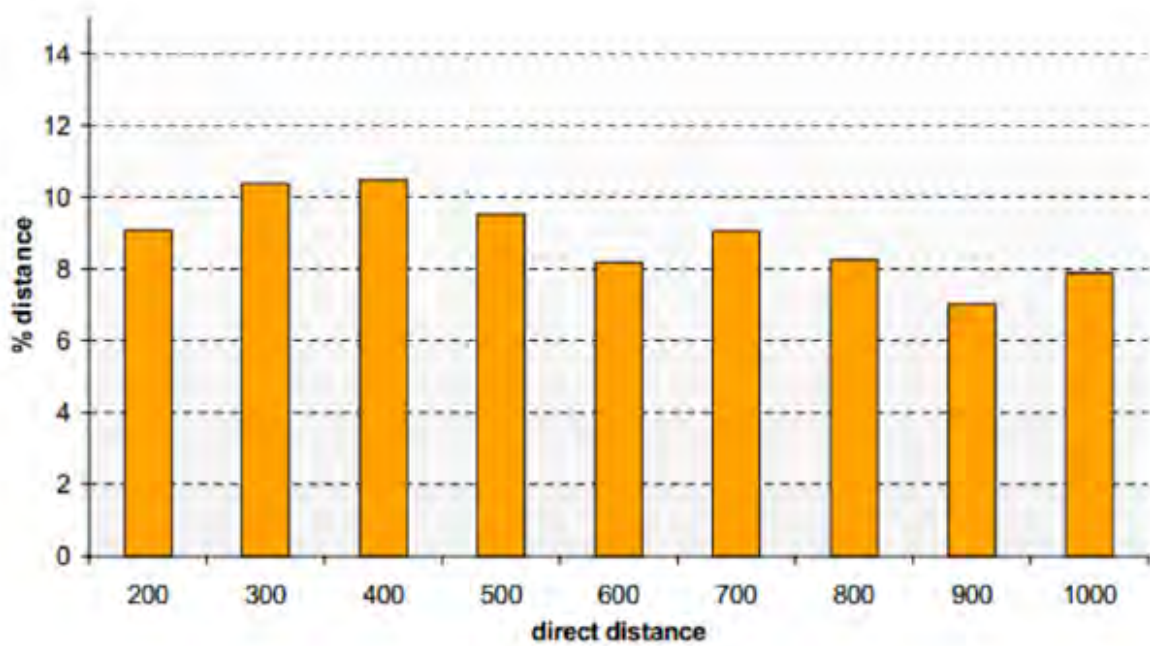


Figura 9 – Porcentagem de penalização sobre distância voada e distância direta em km (EUROCONTROL, 2014).

De forma adicional, o mesmo racional pode ser aplicado para se calcular a emissão de poluentes gerados pela etapa de cruzeiro, o que só se torna viável pois a tabela gerada pela CORINAIR também provê dados de emissão por fase e por gás. Daí deve-se interpolar linearmente as emissões com a distância objetivada e os valores tabelados de forma similar ao demonstrado acima.

De forma adicional, vale ressaltar ainda que a Equação 4 acima citada considera um comportamento linear de consumo ao longo da distância percorrida através da fase cruzeiro. No entanto, baseado na equação de Breguet pode-se considerar também que tal consumo seja de natureza exponencial, visto que, à medida que a aeronave avança em seu trajeto, esta, por sua vez, perde massa dado que seu combustível é consumido. Tal método pode ser considerado como sugestões de próximos passos para a evolução de tal trabalho.

3.4 Emissões provenientes das APUs

Uma última fonte de emissão de gases de efeito estufa que deve ser considerada nesse estudo são aquelas provenientes das Unidades Auxiliares de Potência. Para isso, a metodologia utilizada para calcular o consumo de combustível e emissão de poluentes também se baseia no

tempo de uso desses dispositivos bem como no fluxo de combustível conforme a Equação 7 e 8 (ACRP, 2012).

$$C_{a,f} = F_{Ca,f} \cdot t_{a,f} \quad (7)$$

$$E_{g,a,f} = F_{Ea,f} \cdot C_{a,f} \quad (8)$$

No qual:

- C representa o consumo de combustível da APU na aeronave a, em kg, para cada fase de uso f;
- F_c é o fluxo de combustível, expresso em kg/s, de cada APU na aeronave a na fase de uso f;
- T significa o tempo, em segundos, no qual a unidade APU é usada na aeronave a na fase de uso f;
- E representa a emissão, em kg, do gás g, em $\text{kg}_{\text{gás}}/\text{kg}_{\text{combustível}}$, da aeronave a na fase de uso f.

Ainda, vale ressaltar que para o cálculo das emissões advindas do APU é necessário considerar os tempos para cada um dos 4 modos de operação, conforme [6]:

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

Adicionalmente, os tempos para cada fase de gate (in/out) podem variar consideravelmente de acordo com o tipo de aeródromo, aeronave e o combustível requerido para a fase voo. Porém, no presente trabalho adota-se os valores padrões da indústria conforme cada tipo de aeronave (ACRP, 2012).

3.5 Consumo e emissões provenientes dos biocombustíveis

Por fim, com todas as metodologias anteriormente mencionadas, consegue-se calcular tanto o consumo de QAV quanto a sua respectiva emissão de gases. No entanto, dado que a utilização de biocombustíveis ainda se encontra em estágios iniciais de pesquisa, ainda não se desenvolveu metodologias que realizem os cálculos precisos para estimar o impacto ambiental das fontes alternativas de energia (tais como os métodos Tier 1 e 3). Dessa forma, o volume de consumo para o biocombustível utilizado no presente trabalho de conclusão de curso foi calculado como função de sua percentagem (em massa) na mistura final com o QAV. Isso se respalda no fato da Equação 2 e 3 serem independentes do tipo de combustível utilizado.

Quanto ao fator de emissão dos biocombustíveis, encontrou-se em [10] um estudo que ressaltava, dentre outros fatores, uma análise do consumo de energia e da emissão de gases de efeito estufa de 6 diferentes biocombustíveis na China:

- Etanol derivado de milho (CE);
- Etanol derivado de mandioca (KE);
- Etanol derivado de sorgo sacarino (SE);
- Biodiesel derivado de soja (SB);
- Pinhão manso (JB); e
- Biodiesel derivado de óleo de cozinha (UCO).

Embora um pouco distante da realidade brasileira, o estudo foi publicado nas melhores instituições de ensino Chinesa e se utilizou de ferramentas de modelagem tais como: WTW (Well-to-Wheels) com auxílio do módulo de Tsinghua-CA3EM. Tais análises ainda englobaram todo o ciclo de vida das matérias primas acima mencionadas: cultivo das matérias primas, produção do combustível, transporte e distribuição. Nesse contexto, acabou-se utilizando os resultados da pesquisa como base para se estimar o fator de emissão do biocombustível a ser escolhido no presente trabalho de graduação.

3.6 Análise econômica: estimativa de custos

Para o atingimento do objetivo final do presente trabalho, faz-se necessário um segundo estudo que consiste em comparar financeiramente a estrutura de custos dos dois tipos de combustíveis em questão: o atual querosene de aviação e o biocombustível drop-in). No entanto, quando se fala em tais componentes financeiros, envolve-se, na verdade, aspectos bem mais relevantes do que apenas um preço que se observa nas bombas de combustível e que, por sua vez, é atualizado periodicamente com base na política de preços da Petrobrás. A discussão

de valores monetários pode envolver uma esfera muito mais ampla do que a que se objetiva nesse trabalho, englobando, eventualmente, todos os custos que compõem a cadeia de valor dos produtos em questão. Sem mencionar que, eventuais custos de adaptação de infraestrutura aeroportuária podem vir a ser um agravante nessa questão.

Dessa forma, com o intuito de analisar de forma mais simplista o problema em discussão, dadas as limitações de tempo e recurso, restringiu-se o escopo do problema de custos à utilização do preço por galão em dólar vastamente difundido na literatura atual conforme mostrado em [9]. Tais valores serão mostrados a seguir na seção de Resultados e Discussões.

3.7 Análise econômica: perspectivas de evolução da curva de preços do biocombustível vs QAV

Até o presente momento, descreveu-se, metodologicamente, como seriam obtidos:

- O consumo, em kg, dos combustíveis envolvidos no processo comparativo (jet-fuel e biocombustível escolhido);
- Preço, em \$/galão, de cada um dos combustíveis analisados.

A última etapa desse trabalho foca nas perspectivas de evolução da curva de preços do biocombustível em comparação com o jet-fuel. Percebe-se que, no decorrer das últimas décadas, as curvas de preços dos biocombustíveis têm assumido uma trajetória decrescente, o que reflete os avanços técnicos que a indústria vem obtendo em adaptar o uso dessa fonte alternativa a uma escala comercial.

Nesse contexto, com o intuito já mencionado de estimar a curva futura de preços para os elementos aqui discutidos, a metodologia empregada será utilizar o mesmo CAGR (Compound Annual Growth Rate) que se observa nos anos passados e projetá-lo para um futuro próximo. No entanto, reconhece-se que tal forma preditiva não contempla eventuais avanços tecnológicos que podem, conseqüentemente, aumentar a velocidade de decréscimo dos preços desses biocombustíveis. A título metodológico, utilizar uma metodologia de CAGR significa que, baseando-se no primeiro e no último resultado, será assumido um crescimento geométrico (constante) entre os intervalos intermediários da série, de acordo com a Equação 9:

$$V_i = V_0 \cdot (1 + j)^i \quad (9)$$

No qual:

- V_i representa o resultado da série na i -ésima posição;
- V_0 representa o resultado da série na primeira posição;
- j significa a taxa de crescimento geométrico (constante durante toda a série);
- i é o número de intervalos entre o primeiro e o i -ésimo elemento da série.

Por fim, existem algumas fontes externas vastamente utilizadas na indústria que também fazem uso das mesmas metodologias descritas nessa seção, tais como CORINAIR, OACI e ANAC. Dessa forma, por serem consideradas de vasta confiabilidade e seguirem rigorosamente as metodologias Tier 3 e Tier 3A, alguns desses dados foram extraídos de tais fontes conforme explicitado na próxima seção de Resultados e Discussões. A Figura 10 ilustra os procedimentos e as fontes de fato utilizadas na coleta dos dados.

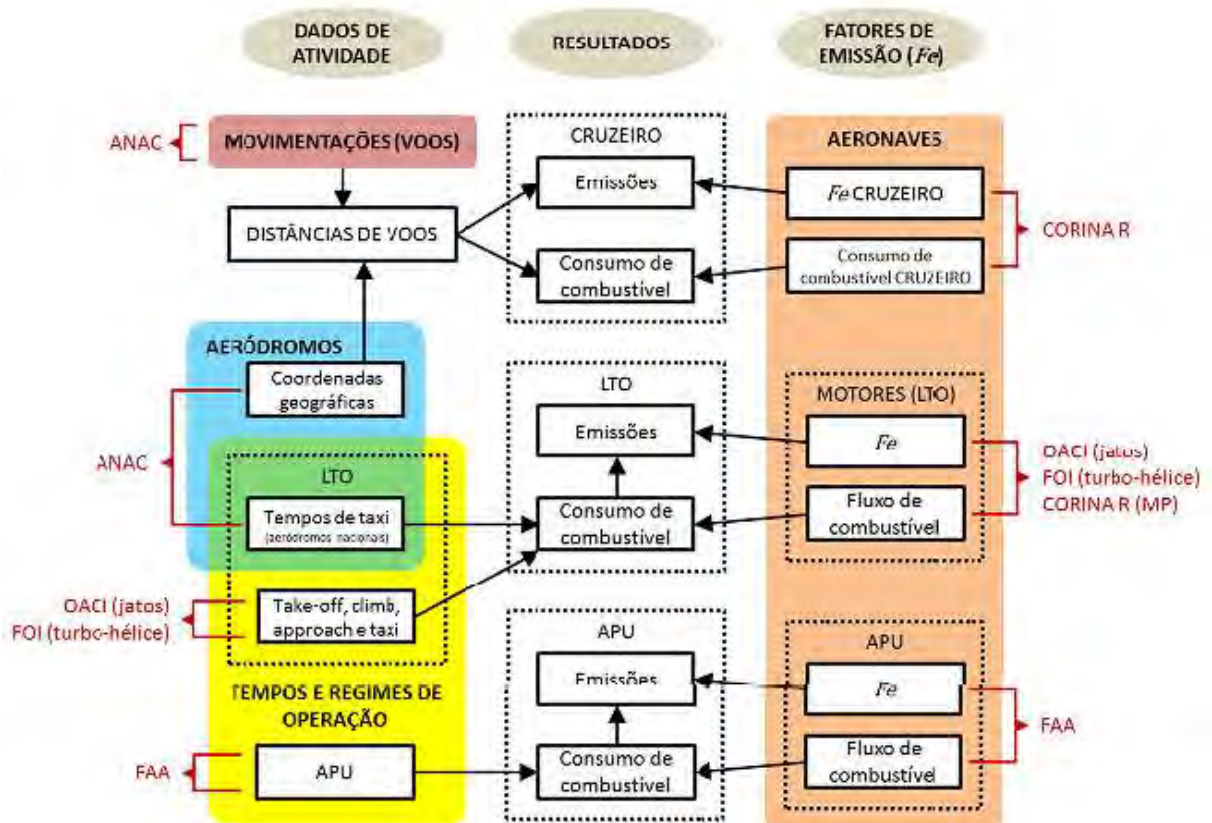


Figura 10 – Cadeia de procedimentos e fontes de informação utilizadas para cálculo de emissões de gases poluentes com base na metodologia Tier 3A (ANAC, 2014).

4 Resultados e Discussões

4.1 Definição das premissas iniciais

A presente seção tem por objetivo mostrar e discutir os resultados obtidos em cada uma das etapas da cadeia metodológica descrita acima. Para isso, definiu-se, primeiramente, as premissas básicas no qual tal trabalho de graduação se baseou para alcançar os resultados, conforme Tabela 2.

Dados	
Aeronave	A320
Motor (ID)	CFM International CFM56-5B4/2P
# Motores	2
Rota (partida/destino)	CGH/JK
Biocombustível	Pinhão manso

Tabela 2 – Dados selecionados como base na metodologia explicitada no capítulo anterior.

Com o intuito de realizar um estudo que mais se aproxime da realidade da maioria das companhias aéreas que oferecem voos comerciais em âmbito nacional, decidiu-se por escolher a aeronave A320 por esse ser um dos modelos mais adotados pelas empresas do setor, de acordo com Figura 11. Ainda na mesma linha de raciocínio, escolheu-se um par origem-destino muito comum aos passageiros nacionais que foi a rota entre o aeroporto de Congonhas (CGH - São Paulo) e o aeroporto Juscelino Kubitschek (JK - Brasília), a qual foi responsável por cerca de quase 20.000 movimentações no ano de 2013 (ANAC, 2013), como mostrado na Figura 12. Por fim, escolheu-se como biocombustível o pinhão manso (*Jatropha curcas*) por seu uso comum em várias tentativas de voos comerciais realizados pelas companhias aéreas, conforme será demonstrado no item 4.6.

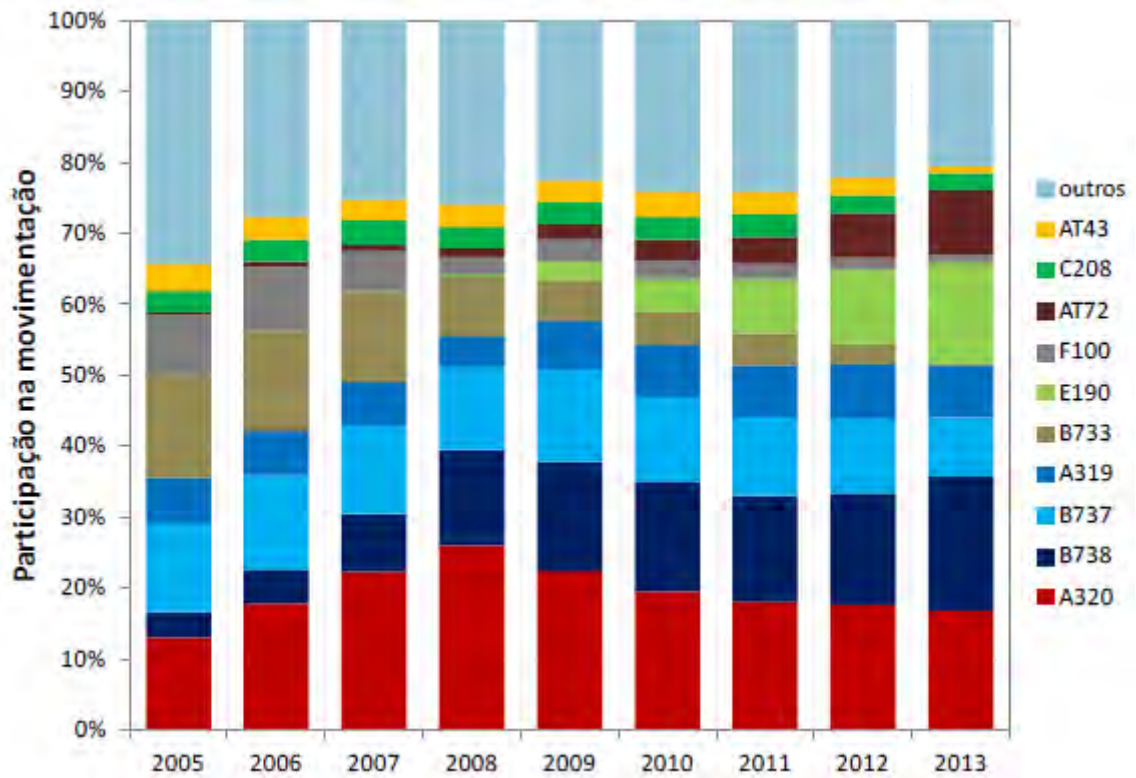


Figura 11 – Histórico de market share em número de movimentações por aeronave em 2013 no mercado nacional doméstico (ANAC, 2013).

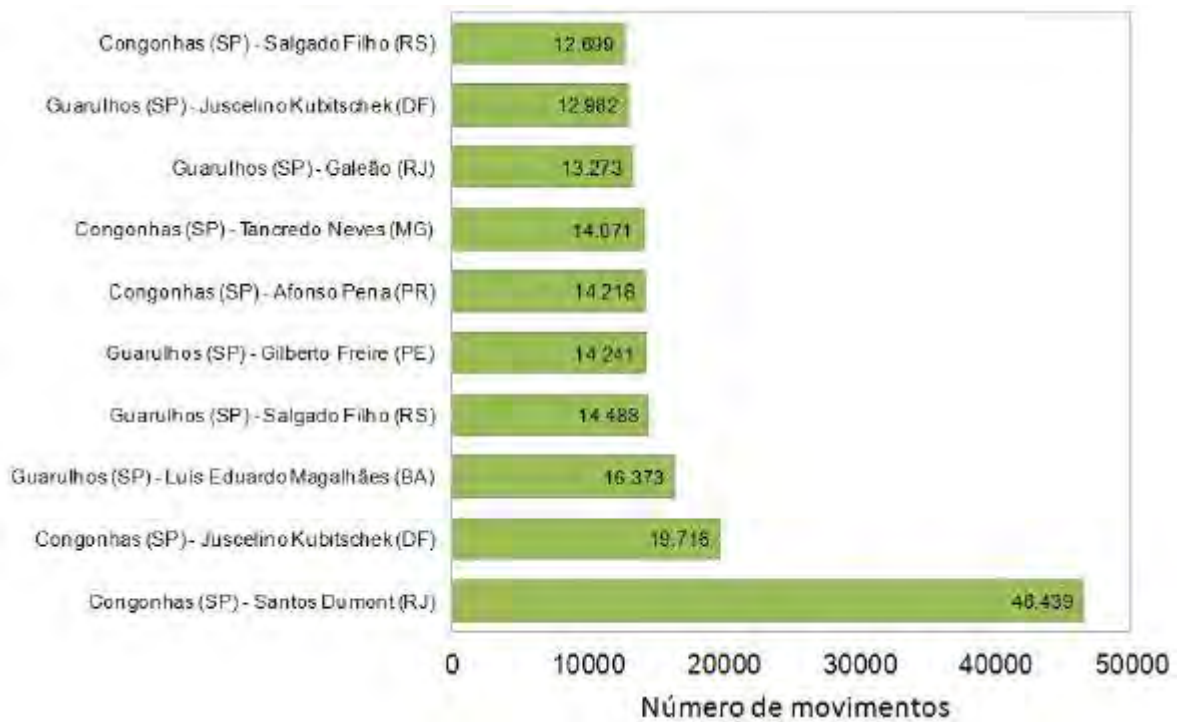


Figura 12 – Histórico de movimentações por par origem-destino em 2013 considerando ambos os sentidos (ANAC, 2013).

Definidos os parâmetros básicos da análise, resta cumprir todas as etapas metodológicas previamente definidas.

4.2 Definição do tempo para cada etapa de voo pertencente ao ciclo LTO

Primeiramente, definiu-se o tempo que cada uma das etapas de voo despende durante o trajeto origem-destino. Nesse contexto, tais informações foram obtidas através das mais diversas fontes, conforme mostrado anteriormente na Figura 10. Os tempos do ciclo LTO bem como os de taxi (in/out) são amplamente divulgados pela ANAC. Contudo, para o presente estudo, utilizou-se os dados advindos do Sistema Eletrônico de Registro e Voo, desenvolvido pelo GGAP – Gerência Geral de Análise e Pesquisa de Segurança Operacional, de [6]. Isso se deve ao fato de que, para os aeródromos mais relevantes na aviação civil brasileira, tem-se um acompanhamento mais fidedigno e sujeito a constantes auditorias pelos operadores da aviação regular. A Tabela 3 demonstra a diferença entre as duas amostragens. Já a duração das operações de take-off, climb-out e final approach baseiam-se nos dados providos pela OACI. Portanto, para o ciclo LTO em questão (CGH-JK), tem-se um total de, aproximadamente, 23 minutos, com base nos dados do GGAP.

Em particular, de [6], além da falta de informações disponíveis, não se considerou emissões durante a corrida de desaceleração no pouso (landing), quando do acionamento do reverso pode elevar o regime do motor a até 30%. Portanto, toda essa etapa foi considerada como pouso sem a utilização do reverso e com o regime do motor estando o tempo todo em 7%.

#	Etapa	Duração/Fonte (min)			Δ
		GGAP	ANAC	OACI	GGAP vs ANAC
1	Partida				
a	Taxi-out (idle)	12.4	19		53%
b	Take-off			0.7	
c	Climb-out			2.2	
2	Chegada				
a	Final approach			4	
b	Landing			0	
c	Taxi-in (idle)	4	7		75%

Tabela 3 – Tempos por fase de voo (Anuário de emissões - ANAC, 2014).

Vale ainda ressaltar que, mesmo ao confrontar os dados provenientes de duas fontes de grande confiabilidade (GGAP e ANAC), encontram-se resultados que diferem em até 75%, segundo Tabela 3. Daí reforça-se a ideia de que, para o âmbito da pesquisa científica nacional, é de grande valia a comparação entre diferentes fontes visto que a qualidade e periodicidade das medições podem influenciar bastante o resultado final.

4.3 Cálculo do consumo de combustível para cada etapa de voo pertencente ao ciclo LTO

Ainda com relação ao ciclo LTO, o próximo passo foi a determinação do fluxo de combustível para todas as etapas já mencionadas. Nessa etapa, dado que o modelo de aeronave escolhido foi um jato A320, os dados foram extraídos da OACI, conforme Figura 10. Tais resultados podem ser vistos na Tabela 4, de [8].

#	Etapa	Regime potência	Fc (kg/s)
1	Partida		
a	Taxi-out (idle)	7%	0.12
b	Take-off	100%	1.14
c	Climb-out	85%	0.95
2	Chegada		
a	Final approach	30%	0.34
b	Landing	0%	0
c	Taxi-in (idle)	7%	0.12

Tabela 4 – Regime de potência e fluxo de combustível por etapa de voo pertencente ao ciclo LTO (OACI, 2016).

Percebe-se, portanto, que as etapas nas quais existe um maior consumo de combustível de aviação por unidade de tempo são as de take-off seguida da de climb-out, visto que ambas requerem os maiores níveis de potência para os motores da aeronave (100% e 85%, respectivamente).

Agora que se dispõe do número de motores da aeronave escolhida, do tempo de duração e do fluxo de combustível de cada fase do ciclo LTO pode-se calcular o consumo de QAV durante um voo completo. Para isso, utiliza-se a Equação 2, de acordo com a metodologia Tier 3 da seção 3.2. Os resultados podem ser vistos na Tabela 5. Em suma, o trajeto entre o aeroporto de Congonhas e o aeroporto Juscelino Kubitschek realizado por um A320 consome, aproximadamente, 745,9 kg de QAV.

#	Etapa	Regime potência	Consumo (kg)
1	Partida		
a	Taxi-out (idle)	7%	178.6
b	Take-off	100%	95.8
c	Climb-out	85%	250.8
2	Chegada		
a	Final approach	30%	163.2
b	Landing	0%	0
c	Taxi-in (idle)	7%	57.6

Tabela 5 – Consumo de combustível por etapa de voo do ciclo LTO.

É interessante notar que, mesmo a etapa de take-off sendo uma das que mais requerem potência e consomem combustível, por unidade de tempo em um voo comercial, esta não é a que mais consome no volume total de combustível gasto, visto sua curta duração.

4.4 Cálculo do consumo de combustível para a fase de cruzeiro

Da mesma forma que se calculou um consumo de combustíveis para as fases do ciclo LTO, faz-se necessário também avaliar o consumo para a etapa de cruzeiro (altitude de voo superior a 914,4 metros), a qual compreende três fases (conforme explicado no capítulo de

Metodologia): climb, cruzeiro, propriamente dita, e descent. Primeiramente, a metodologia de cálculo baseou-se no processo Tier 3A, no qual utiliza a tabela fornecida por CORINAIR com os respectivos consumos de combustível por fase e aeronave, segundo Tabela 6.

Aeronave: A320			
Distância (km)	Climb/cruise/descent (kg)	LTO (kg)	Consumo total (kg)
232	1,063	873	1,936
463	1,831	873	2,704
926	2,949	873	3,823
1,389	4,200	873	5,074
1,852	5,439	873	6,312
2,778	7,995	873	8,868
3,704	10,465	873	11,338
4,630	13,423	873	14,296
5,556	16,059	873	16,932

Tabela 6 – Tabela com consumo de combustíveis para a aeronave A320 (CORINAIR, 2015).

Portanto, como estipulado pelo método Tier 3A, basta interpolar linearmente a distância desejada na tabela acima para obter o consumo de combustível. No entanto, tem-se ainda que calcular a distância entre o par origem-destino conforme definido na primeira etapa do presente capítulo. Conforme a Equação 5 e de [6], tem-se que a distância entre os aeroportos em questão é de 873 km. Por fim, obtem-se um consumo de QAV na etapa de cruzeiro de 2.748 kg.

Nesse ponto, vale o seguinte sanity-check: dado que a tabela CORINAIR também fornece o consumo de QAV para o ciclo LTO e esse, por sua vez, permanece constante durante tal ciclo, pode-se comparar com o valor obtido no item 4.3 (745,9 kg). Encontra-se, porém, uma pequena diferença de, aproximadamente, 17% entre os dois valores. Tal discrepância se explica, dentre outras razões, pelos diferentes valores medidos para a fase de taxi (in/out) entre GGAP e ANAC como já observado anteriormente.

4.5 Cálculo do consumo de combustível devido ao APU

Conforme as Equações 7 e 8, tem-se que o cálculo do consumo de QAV proveniente do acionamento das Unidades Auxiliares de Potência é similar à metodologia Tier 3, a qual se baseia no tempo de cada fase e no fluxo de combustível para cada uma delas. Tem-se ainda que, pelos critérios da FAA, é de vital importância saber o tipo de fuselagem da aeronave escolhida

para o estudo. No presente caso, o jato A320 possui uma fuselagem do tipo estreita o que resulta nos tempos refletidos na Tabela 7 para cada uma das fases.

#	Etapa	Duração (min)
1	Partida da APU	3.00
2	Gate-out	3.60
3	MES	0.58
4	Gate-in	67.82
5	Uso total	75.00

Tabela 7 – Tempo de duração por fase de utilização da APU para jatos de fuselagem estreita (ANAC, 2014).

No entanto, percebe-se que os tempos são constantes para um ciclo LTO. Ou seja, para um voo doméstico entre o trecho escolhido (CGH-JK) tem-se 1 hora e 15 minutos de uso de APU durante um voo de, aproximadamente, 1 hora e 35 minutos. De forma adicional, de [6], ainda se sabe os fluxos de combustível para cada uma das fases, segundo a Tabela 8. Daí com tais dados, pode-se calcular o consumo de combustível conforme Equação 7 através de uma multiplicação simples. Os resultados podem ser vistos na Tabela 9.

#	Etapa	Fc (kg/s)
1	Partida da APU	0.021
2	Gate-out	0.033
3	MES	0.038
4	Gate-in	0.033
5	Uso total	0.125

Tabela 8 – Fluxo de combustível por fase de utilização de uma APU para jatos de fuselagem estreita (ANAC, 2014).

#	Etapa	Consumo (kg)
1	Partida da APU	3.78
2	Gate-out	7.13
3	MES	1.32
4	Gate-in	134.28
5	Uso total	146.51

Tabela 9 – Consumo de combustível por fase de utilização de uma APU.

Nota-se, portanto, que mesmo a operação de MES tendo o maior consumo por unidade de tempo, a operação que mais consumo combustível é a de gate in, sendo responsável por 92% do consumo total com 134,3 kg de QAV.

4.6 Consumo de combustível por etapa de voo

Agora que se dispõe do consumo de QAV por cada etapa de um voo comercial nacional para uma aeronave A320, pode-se comparar tais dados e analisar qual etapa é responsável pelo maior consumo de QAV. No entanto, retirou-se a etapa de cruzeiro da comparação para fins ilustrativos em uma das comparações, dado que seu consumo excede bastante aquele de outras etapas por causa de sua extensa duração. Dessa forma, segundo a Figura 13, observa-se que a etapa de climb-out representa o maior consumo de QAV (28,1%) para um voo nacional e comercial seguido de perto pela fase de taxi-out (20,0%) e final approach (18,3%). Dai ressaltasse ainda que quase a totalidade o consumo pelo uso de uma APU se deve à fase de gate-in (15,0%).

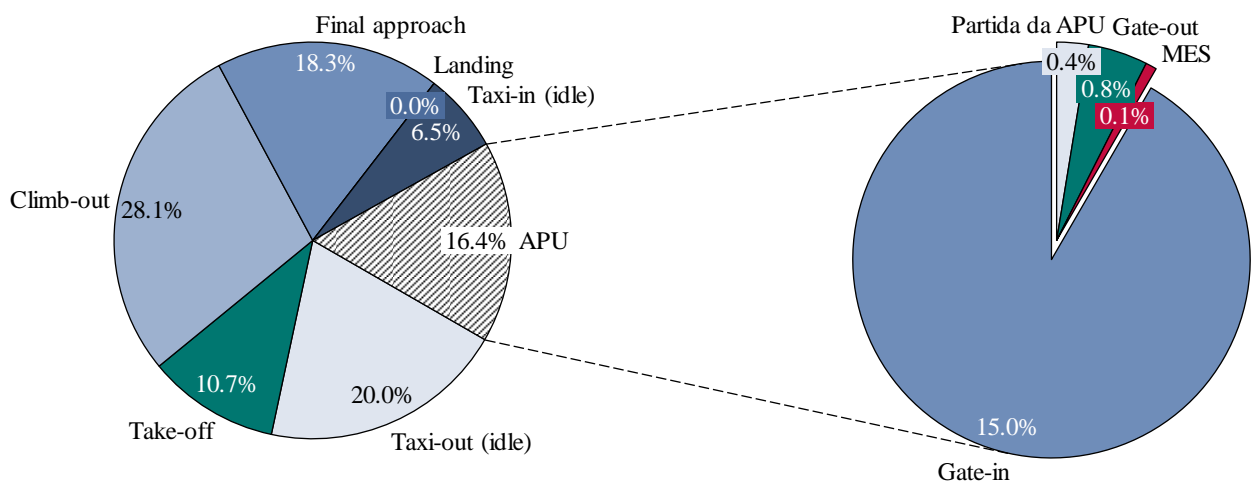


Figura 13 – Quadro comparativo do consumo de combustível por etapa de voo comercial em uma aeronave A320 para o trecho CGH-JK para altitudes abaixo de 914,4 metros em 2016.

Da Figura 14, pode-se observar que, como já comentado anteriormente, a etapa de cruzeiro é responsável pelo maior consumo de combustível com 75,5% de um total de 3.640 kg de QAV. Tal resultado se deve, em grande parte à sua maior duração pois, sabe-se que, de um

tempo total de 1 hora e 35 minutos de voo entre o par CGH-JK, 1 hora e 12 minutos são de voos com altitudes maiores a 914,4 metros (cruzeiro). Utilizando a ferramenta disponibilizada pela OACI fornecida em [11], obtem-se um resultado similar ao deste trabalho de 4.655,7 kg para o consumo de combustível percorre o mesmo trecho. As diferenças se dão, nesse caso, devido ao fato desse trabalho utilizar uma aeronave diferente e com diferentes tempos por etapa durante o ciclo LTO.

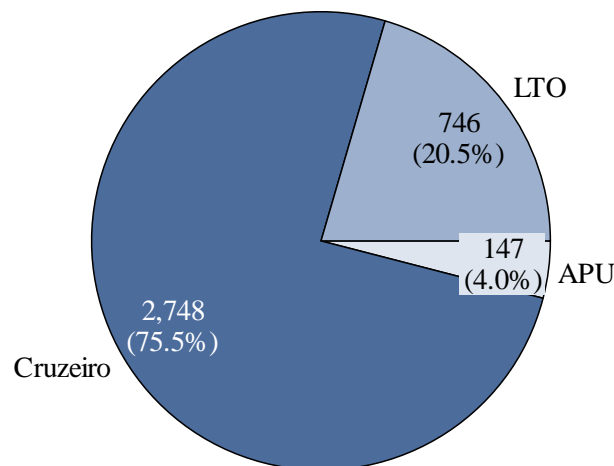


Figura 14 – Distribuição do consumo de combustível por fase de voo comercial nacional, incluindo a fase de cruzeiro para o ano de 2016.

4.7 Consumo de biocombustíveis durante voos comerciais de origem nacional

No presente tópico, o trabalho de graduação irá abordar o consumo de biocombustíveis em voos comerciais no âmbito nacional. Dai, de 3.4, como o consumo de combustível de aviação independe de seu tipo, foi adotado que o consumo do biocombustível em questão dependerá apenas da sua razão em massa quando comparado ao QAV. Na literatura atual, fala-se bastante na utilização de biocombustíveis com características sustentáveis e que, ao serem misturados com o QAV, não gerem custos adaptativos tanto na infraestrutura aeroportuária quanto nas aeronaves (drop-in). Tal requisito, conforme explicitado em 2.1, se tornou até uma medida regulamentar pela IATA. Nesse contexto, várias tentativas têm sido feitas com diversos biocombustíveis nos mais variados tipos de mix, de [9]. A Tabela 10 mostra algumas das tentativas anteriormente mencionadas.

Data	Empresa	Aeronave	Bio-fuel
dez/08	Air New Zeland	B747-400	50% Pinhão manso
jan/09	Continental Airlines	B747-800	47.5% Pinhão manso / 2.5% Algas
jan/09	Japan Airlines	B747-300	42% Camelina / 7.5% Pinhão manso
dez/09	KLM	B747-400	50% Camelina
nov/10	Tam Airlines	A320	50% Pinhão manso
abr/11	Interjet	A320	27% Pinhão manso

Tabela 10 – Voos de demonstração usando biocombustíveis (ICAO, 2011).

Dai tal espaço amostral foi usado para determinar o percentual em massa do bio-fuel na mistura com o QAV. O percentual escolhido foi de 50%/50% QAV/Pinhão manso (*Jatropha curcas*) dado o seu uso comum nas tentativas anteriores. Além disso, este também foi o bio-fuel que foi testado por mais de uma vez com a aeronave A320, a qual foi a escolhida para o presente estudo. Assim, sabendo que para um combustível sendo composto por 100% de QAV consumiu-se um total de 3.640 kg deste, a massa de Pinhão manso consumida será de 1.820 kg para as mesmas condições do problema em questão, conforme Figura 15.

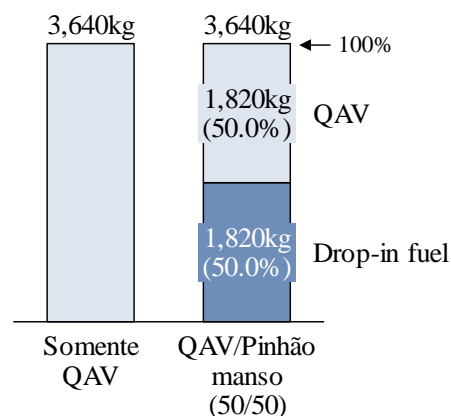


Figura 15 – Consumo de combustíveis utilizando somente QAV e misturando com Pinhão manso na razão 50/50.

4.8 Emissão de poluentes originados do QAV

Até o presente capítulo, desenvolveu-se as etapas que resultaram no consumo de QAV para todas as etapas de um voo comercial no âmbito nacional. Daí, tendo em vista a metodologia já descrita anteriormente, resta calcular-se as emissões de poluentes devido ao consumo desses combustíveis (que é o objetivo do presente tópico) e, por fim, o custo que se tem com relação a tal consumo.

Ainda de [6], a metodologia Tier 3A estipula que, para se obter a emissão de gases de efeito estufa, basta multiplicar o consumo de combustível durante certo trecho (no presente caso o par origem-destino: CGH-JK) pelo fator de emissão em cada uma das fases: ciclo LTO, etapa de cruzeiro e utilização de APUs.

Primeiramente, vale ressaltar que, para cada uma das fases acima mencionadas, segue-se uma fonte de consulta diferente. Dessa forma, cada fonte tem sua peculiaridade. Para as emissões provenientes do ciclo LTO, a base utilizada foi a Emissions Databank (OACI) para o caso de motores de aeronaves a jato. Todavia, tal base dispõe apenas os fatores de emissão para os gases HC, CO e NO_x (CO_{2,e}) conforme mostrado na Tabela 11. Já para a etapa cruzeiro, por sua vez, além da distância do voo, o consumo de combustível e as emissões de poluentes de uma aeronave são ligados a outros fatores, tais como a trajetória altimétrica, as variações de velocidade, a carga transportada, dentre outros. Similarmente à metodologia adotada para a determinação do consumo de combustível na etapa de cruzeiro, a base CORINAIR apresenta uma tabela com valores de emissão (em kg) e distância de voo tabelados apenas para os gases CO e NO_x (CO_{2,e}) de acordo com os mesmos parâmetros da Tabela 6, o que pode ser encontrado na Tabela 12. Por último, as emissões advindas do APU são fornecidas pela FAA com base no modelo da aeronave e nas 4 fases de utilização desses aparelhos, de acordo com a Tabela 13.

#	Etapa	Consumo (kgQAV)	Fe (g/kgQAV)			Emissão (g)		
			HC	CO	NO _x	HC	CO	NO _x
1	Partida							
a	Taxi-out (idle)	178.6	0.1	12.4	4.7	18.7	2,219.5	839.2
b	Take-off	95.8	0.0	0.5	26.5	3.9	50.8	2,537.6
c	Climb-out	250.8	0.0	0.6	22.3	10.3	155.5	5,592.8
2	Chegada							
a	Final approach	163.2	0.1	2.4	8.9	10.0	398.2	1,452.5
b	Landing	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
c	Taxi-in (idle)	57.6	0.1	12.4	4.7	6.0	716.0	270.7
3	Total	745.9	0.4	28.5	67.1	49.0	3,539.9	10,692.9

Tabela 11 – Emissão de gases HC, CO e NO_x (CO_{2,e}) por fase do ciclo LTO.

Consumo (kgQAV)	Emissão (g)	
	CO	NO _x
2,748.0	33.8	191.8

Tabela 12 – Emissão de gases CO e NO_x (CO_{2,e}) para a distância de 873 km.

#	Etapa	Consumo (kgQAV)	Fe (g/kgQAV)			Emissão (g)		
			HC	CO	NO _x	HC	CO	NO _x
1	Partida da APU	3.78	6.5	31.8	5.5	24.7	120.0	20.6
2	Gate-out	7.1	0.4	5.7	6.9	3.1	40.8	48.8
3	MES	1.3	0.3	4.9	7.6	0.4	6.5	10.1
4	Gate-in	134.3	0.4	5.7	6.9	57.7	768.1	919.8
5	Total	146.5	7.7	48.1	26.8	85.9	935.4	999.4

Tabela 13 – Emissão de gases HC, CO e NO_x (CO_{2,e}) por fase de utilização da APU para aeronaves com fuselagem estreita (A320).

Portanto, das tabelas acima, vale comparar a emissão de gases de efeito estufa por tipo de gás e fase de voo. Nesse contexto, a Figura 16 ressalta a emissão de NO_x se sobressai quando comparada aos outros gases de efeito estufa tendo participações (em massa) que totalizam 11,9 kg. Além disso, da Figura 17, pode-se notar que a fase na qual existe mais emissões de gases de efeito estufa é no ciclo LTO, sendo este responsável por 86,4% das emissões, o que equivale a 14,3 kg de gases (sendo a emissão total de 16,5 kg). Da última análise relacionada ao presente tópico, a Figura 18 mostra que a fase de climb-out seguida da de take-in (para o ciclo LTO) e a gate-in para o uso de APUs são as responsáveis pelas maiores emissões de poluentes atmosféricos.

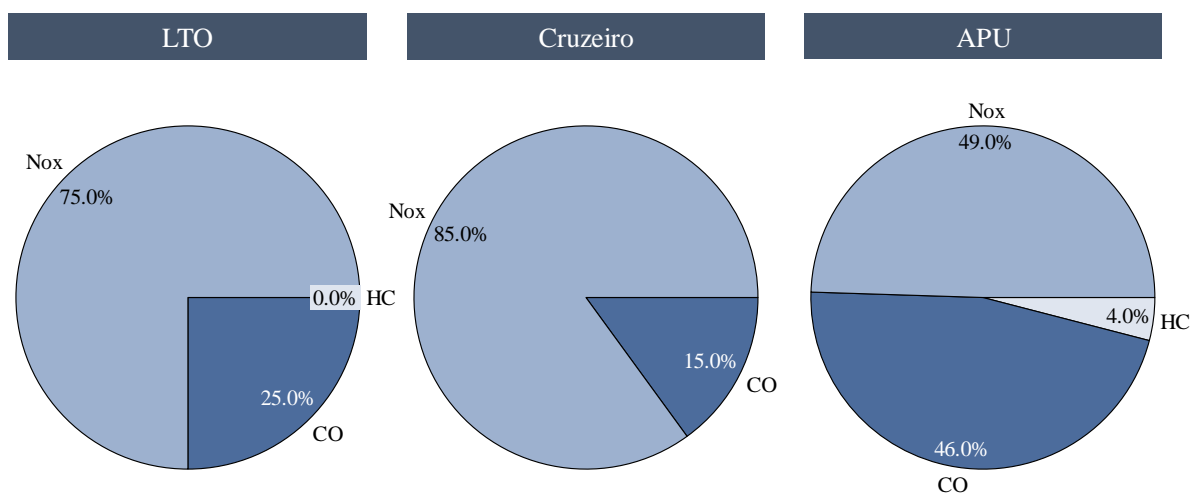


Figura 16 – Participação (em massa) da emissão de gases de efeito estufa para cada uma das fases de um voo comercial no trajeto CGH-JK.

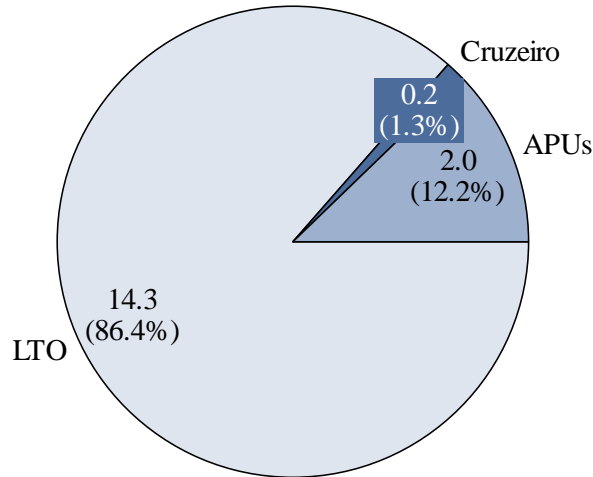


Figura 17 – Emissões totais (em kg) de gases de efeito estufa (CO_{2,e}) por fase de voo no trajeto CGH-JK.

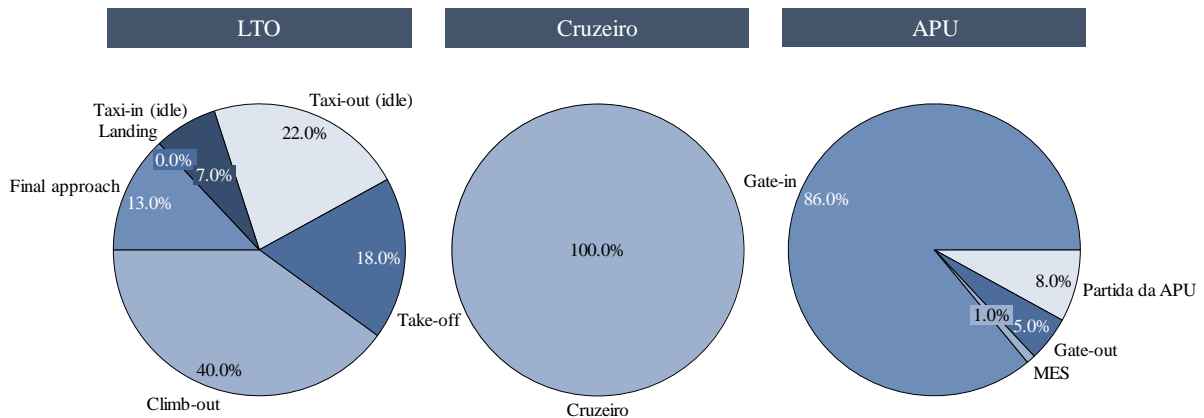


Figura 18 – Participação de cada etapa de voo do trecho CGH-JK na emissão de poluentes atmosféricos (CO_{2,e}).

4.9 Emissão de poluentes originados do biocombustível (Pinhão manso – Jatropha Curcas)

Finalmente, tem-se no presente tópico uma estimativa para a emissão de gases de efeito estufa provenientes da utilização de biocombustíveis, em particular, do Pinhão Manso (*Jatropha Curcas*) que foi o bio-fuel escolhido para o presente estudo. À título de recapitulação, no item 4.7, estimou-se o consumo de Pinhão Manso para o trecho Congonhas (São Paulo) – Juscelino

Kubtschek (Brasília) através de sua proporção em massa na mistura com o QAV. Com base em tentativas de voos anteriores, utilizou-se a razão de 50%/50% entre o querosene de aviação e Pinhão manso. Dito isso, da Figura 15, o consumo tanto do Pinhão manso quanto do QAV foi de 1.820 kg.

Vale ressaltar ainda que, tendo em vista a escassez de informações disponíveis em fontes públicas além de os estudos científicos ainda não serem tão evoluídos quando comparados com os de QAV, baseou-se em [10] para estimar-se o fator de emissão do Pinhão manso. Dai do estudo tomado por base, resultou a análise mostrada na Figura 19, o que retrata os fatores de emissão para os 6 biocombustíveis já descritos no tópico 3.5. Nota-se que o Pinhão manso (JB) possui o menor índice de emissão quando comparado aos demais com apenas 51,971 gCO_{2,e}/1MJ QAV. No entanto, uma vez que a densidade energética é dada em tep/m³ e o fator de emissão em tC/TJ deve-se utilizar o fator de conversão de 1MJ = 0,041868 tep para adequar as unidades utilizadas.

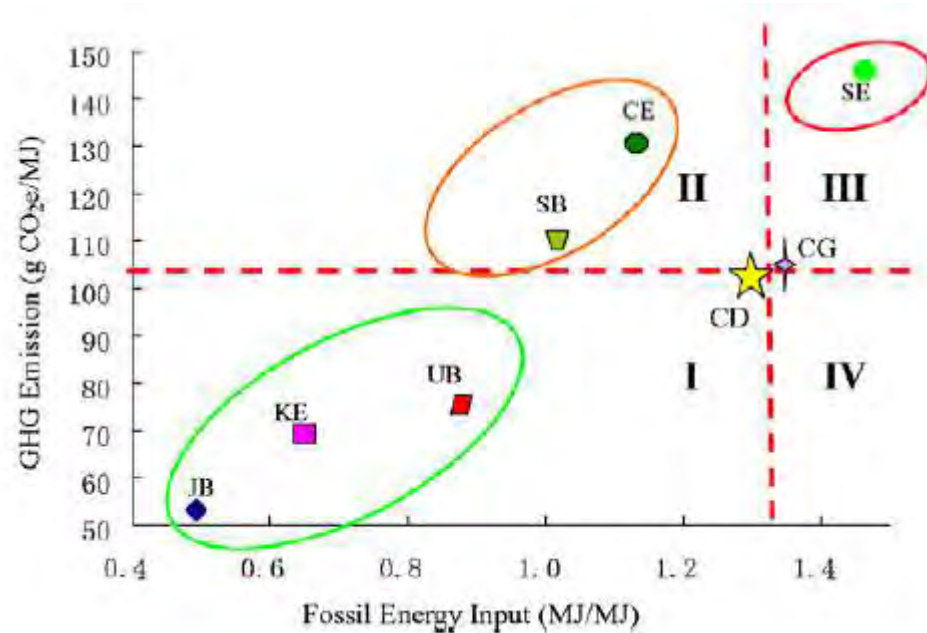


Figura 19 – Fatores de emissão por unidade de energia de QAV consumido para 6 diferentes biocombustíveis (Xunmin/ Xiliang/Shiyan/Qingfang, 2009).

Ora, tem-se então que o fator de emissão para o Pinhão manso é calculado como a multiplicação do fator de conversão descrito acima pelo valor de 51,971 gCO_{2,e}/1MJ QAV, o que resulta em 2,1759 gCO_{2,e}/kgQAV. Portanto, para um consumo de 1.820 kg, tem-se um total de 3,96 kg de CO_{2,e}. O que significa que, para o caso de se utilizar 50% de QAV, tem-se uma emissão total de 8,25kg em gases de efeito estufa (dado que a emissão total seria de 16,5 kg de

CO_{2,e} para uma proporção de 100% de QAV, conforme o tópico 4.8). Percebe-se então uma queda notória de, aproximadamente, 26% nas emissões de poluentes atmosféricos, conforme, Figura 20 com as emissões provenientes do consumo de Pinhão manso representando apenas 32% do total.

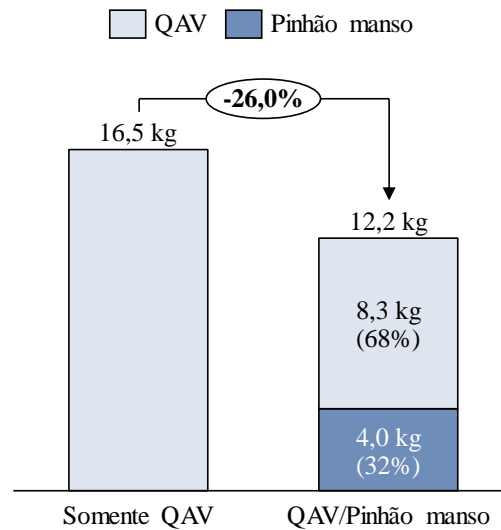


Figura 20 – Emissão de gases de efeito estufa (em kg) para os casos em que se tem somente QAV e o que ocorre a mistura na proporção de 50/50 com Pinhão manso.

4.10 Análise econômica

Por fim, a análise remanescente do trabalho de graduação foca em avaliar, economicamente, os impactos da adoção do drop-in fuel. Em virtude da metodologia simplista adotada, conforme item 3.6, tal tarefa foi realizada com base no gráfico da Figura 21, conforme [9] que, por sua vez, compara os gastos em 2014 vis-a-vis estimativas para 2018 de vários biocombustíveis bem como de QAV. Daí nota-se que, ao mesmo tempo em que os jet-fuels aumentam de preço, os biocombustíveis conseguem incorporar economias de escala e incorporaram avanços tecnológicos de forma a ficarem mais baratos.

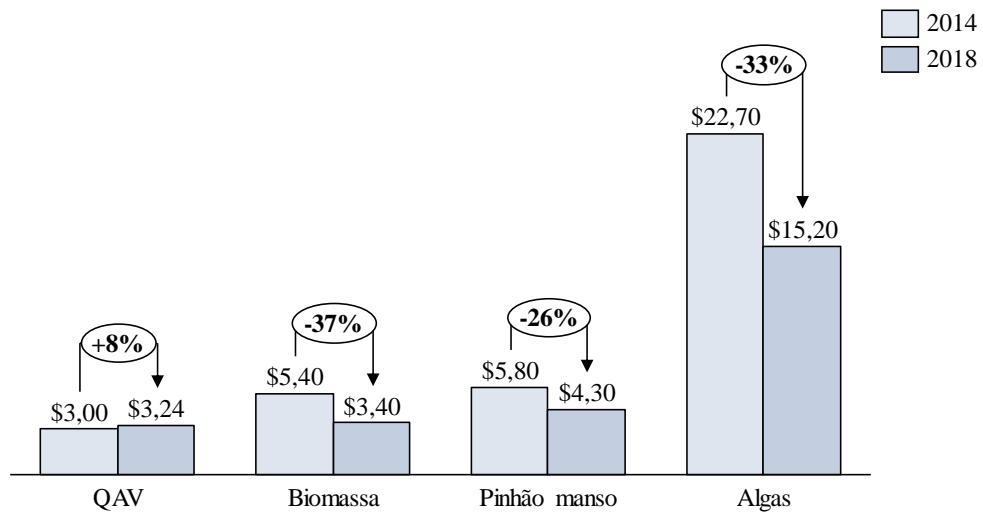


Figura 21 – Custo de combustíveis de aviação para o curto e longo prazo (Boeing apud Lions, 2012).

Ou seja, ainda da Figura 21, conclui-se que, com base nos valores expostos para o ano de 2014, um trecho de aviação comercial entre os aeroportos de Congonhas (SP) e Juscelino Kubitschel (Brasília) teria um custo 93% superior caso fosse utilizado somente Pinhão manso como combustível ao invés de somente QAV (\$3 vs \$5,8). Todavia, para o caso em análise no qual considera-se a razão de 50/50 entre QAV e Pinhão manso, tem-se um custo apenas 47% superior com preços de 2014, de acordo com Figura 22. Ainda, vale apenas ressaltar que, para as premissas de preço com base no ano de 2018, se somente Pinhão manso fosse usado, aquele custo que era 93% superior (quando comparado somente à utilização do QAV) seria de apenas 33%. Já se fosse usando a mistura entre Pinhão manso e QAV, tal custo só seria 16% maior, o que já configura uma oportunidade de implementação de bio-fuels com alcance comercial caso tais premissas fossem, de fato, viáveis.

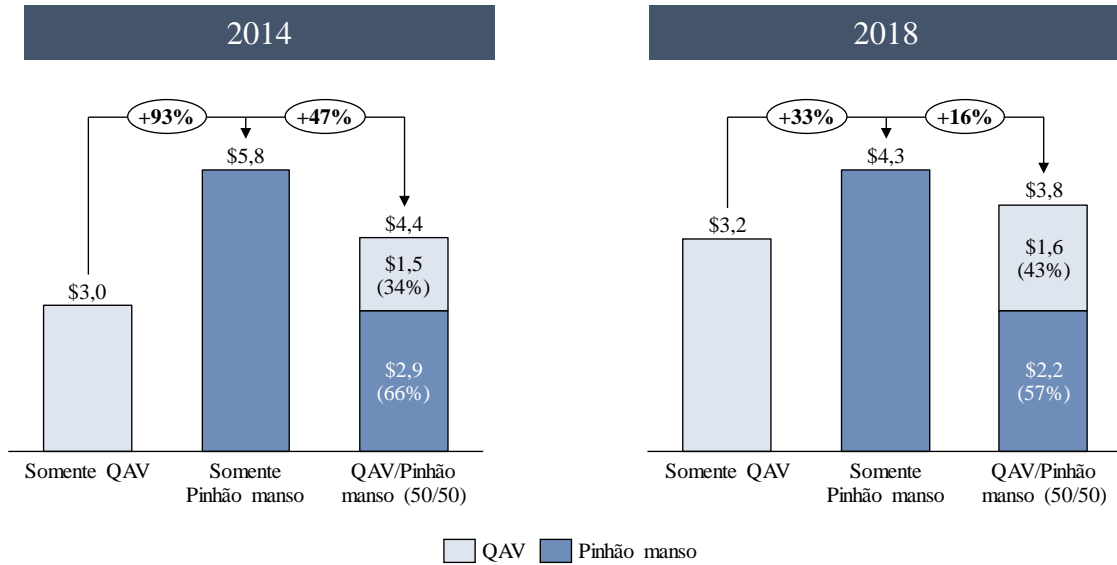


Figura 22 – Comparação de preços (\$) por galão de combustíveis utilizados na aviação civil para os anos de 2014 e 2018 (Boeing apud Lions, 2012).

Em última instância, baseando-se nas projeções de [9] que são mostradas na Figura 21, tentou-se estimar a curva de preços tanto para o QAV quanto para o Pinhão manso. Ou seja, de acordo com a metodologia dos CAGRs descrita em 3.7, considerando que se tem os crescimentos/decrescimentos para os preços em um horizonte de 4 anos (2014 a 2018), analisou-se tais razões. Com isso, assumiu-se que para os próximos anos ambas as cruvas iriam continuar crescendo conforme tais taxas, da Tabela 14. Tentou-se, por fim, encontrar o ponto de intersecção entre as duas curvas de preço, conforme Figura 23. Nota-se que, caso as projeções fossem confirmadas, seria razoável assumir que o Pinhão manso se tornaria economicamente viável até 2021 considerando que ambos cresçam a taxas constantes. No entanto, sabe-se que estudos hodiernos indicam ainda que esse break-even pode levar mais tempo do que o estimado abaixo, mesmo assumindo que a tecnologia tenha avançado a taxas cada vez maiores ao passar dos anos.

Preços (\$)	2014	2018	Anos	CAGR
QAV	3	3.24	4	2%
Pinhão manso	5.8	4.3	4	-7%

Tabela 14 – Cálculo dos Compound Annual Growth Rates para ambas as curvas, conforme Equação 9.

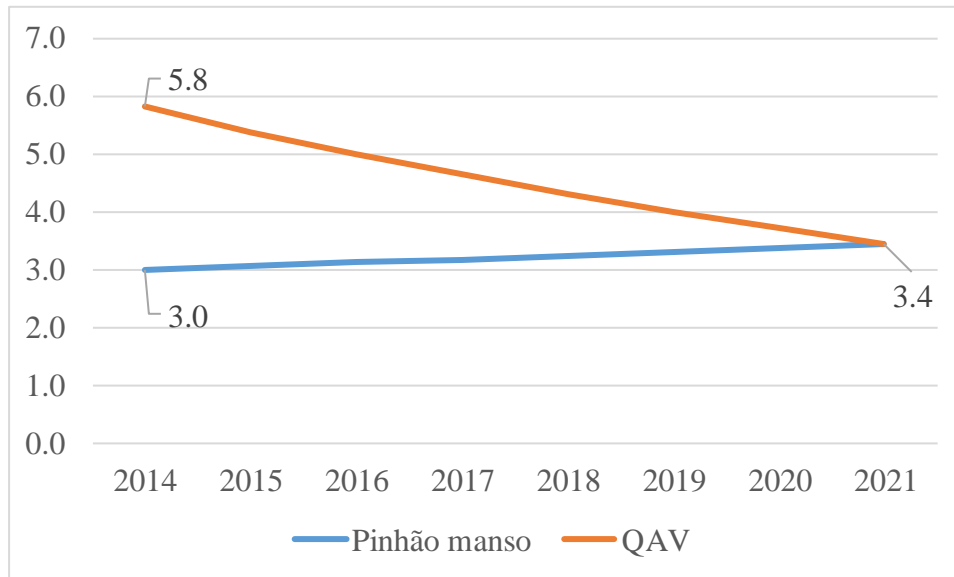


Figura 23 – Curva de preços para QAV e Pinhão manso considerando taxas de crescimento anuais constantes de 2% e -7% para o QAV e Pinhão manso, respectivamente.

5 Conclusão

Este trabalho foi responsável por realizar um estudo de caso que envolveu a comparação tanto sob o aspecto ambiental quanto sob o econômico com relação a substituição do QAV por um biocombustível na aviação comercial em âmbito nacional. O estudo então foi realizado para um par origem-destino em específico que foi o trecho Congonhas (São Paulo) e Juscelino Kubitschek (Brasília). Além disso, o biocombustível em teste foi o Pinhão manso, o qual já havia sido testado em outros voos em âmbito comercial.

A primeira descoberta relevante é que os biocombustíveis que estão sendo cada vez mais incentivados pelos órgãos reguladores são aqueles chamados de drop-in, o que significa que ele pode ser usado não devendo exigir nenhuma adaptação de infraestrutura nem na aeronave nem no aeródromo. A partir daí umas das questões que se objetivava responder foi concluída, visto que o montante de custos envolvidos nesse processo se relaciona apenas com a capacidade de tornar tal solução escalável em termos comerciais. Nesse contexto, viu-se que isso ainda não é possível, mas que também a diferença de preços de vários biocombustíveis quando comparados ao galão de QAV só tende a diminuir com o passar dos anos. Sob o aspecto ambiental, para o trecho e condições em questão, viu-se que os biocombustíveis sim representam uma fonte bem

mais limpa de energia podendo reduzir em cerca de 26% a emissão total de gases poluentes, no caso de o Pinhão manso ser misturado com QAV na proporção de 50/50.

No entanto, algumas considerações podem ser feitas sob a qualidade das fontes pesquisadas e a disponibilidade dos dados necessários. Nesse contexto, sabe-se que as pesquisas sobre fontes de combustíveis alternativos para a aviação civil ainda estão em estágio inicial e que, por conseguinte, não devem de fato apresentar amplas fontes de consulta. Um exemplo disso é que a base de dados para o preço de comercialização dos biocombustíveis não é amplamente divulgada sendo achada apenas em literatura restrita. Ainda, vale ressaltar que, enquanto os dados e metodologias para o consumo de QAV e emissão de gases de efeito estufa são amplamente divulgados, tais dados para os biocombustíveis ainda são escassos sem uma metodologia padrão e amplamente utilizada pela indústria. Tudo isso, por sua vez, acabou dificultando o presente trabalho de graduação visto que, para se obter por exemplo os dados do fator de emissão do Pinhão manso, teve-se que recorrer a uma literatura da China. Tal literatura, por sua vez, tinha por base metodologias totalmente discrepantes daquela usada no trabalho e além disso em condições climáticas e ambientais totalmente diferentes.

Por último, como próximos passos sugere-se que seja realizado uma pesquisa envolvendo uma gama maior de aeroportos, rotas e biocombustíveis para a mesma metodologia utilizada nesse trabalho. Isso poderá fornecer resultados mais abrangentes e que, por sua vez, auxiliem de forma mais generalizada a utilização ou não de biocombustíveis. Além disso, deve-se tentar desenvolver uma metodologia própria para o cálculo do fator de emissão para os biocombustíveis citados aqui visto que as condições ambientais e de cultivo desses elementos são totalmente diferentes daquelas de outros países.

6 Referências

- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM**: American Society for Testing and Materials, 2008. Pensilvânia, 2008. 01 CD e versão on-line.
- [2] HOUGHTON, J. T.; JENKINS, G. J.; EPHRAUMS, J. J. **Climate change: The IPCC Scientific Assessment**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [3] ANAC. Anuário do Transporte Aéreo, Dados Estatísticos e Econômicos, 2016. In: <http://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/mercado-de-transporte-aereo/anuario-do-transporte-aereo/dados-do-anuario-do-transporte-aereo>.
- [4] EIA. Energy Information Administration, **The Flight Paths for Biojet Fuel**, 2009. In: http://www.eia.gov/dnav/pet/pet_cons_prim_dcu_nus_a.html.
- [5] EPE. Empresa de Pesquisa Energética, **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**, 2017. In: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-72/Cap6_Texto.pdf.
- [6] ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil, **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil**. IEMA: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2014.
- [7] CHESNEAU, S.; FULLER, I.; HUSTACHE, J. C. **ATM flight efficiency and its impact on the environment**. EUROCONTROL: European Organization for the Safety of Air Navigation, 2014.
- [8] EEA. European Environment Agency, **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook: a technical guidance to prepare national emission inventories**. EEA: European Environment Agency, 2016.
- [9] UNICAMP. Universidade de Campinas, **Roadmap for sustainable aviation biofuels for Brazil: a flightpath to aviation biofuels in Brazil**. Blucher, 2016.
- [10] XUNMIN, OU.; XILIANG, Z.; CHANG, S.; QINGFANG, G.. **Energy consumption and GHG emissions of six biofuels pathways by LCA in (the) People's Republic of China**. Elsevier: Applied energy, 2009.
- [11] OACI. Organização da Aviação Civil Internacional, **Carbon Emissions Calculator**, 2018. In: <http://www.icao.int/environmental-protection/CarbonOffset/Pages/default.aspx>.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO			
1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TC	2. DATA 19 de novembro de 2018	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TC-062/2018	4. N° DE PÁGINAS 62
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Estudo de caso sobre a adoção de combustíveis alternativos para a aviação nacional e seu possível impacto ambiental e econômico.			
6. AUTOR Carlos Alberto Coelho Gouveia Filho			
7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: 1. Biocombustíveis. 2. Aviação civil. 3. Tier 3.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Combustíveis alternativos; Aviação civil; Poluição por gases; Estimativas de custos; Transportes.			
10. APRESENTAÇÃO: ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Profa. Dra. Rogéria de Arantes Gomes Eller. Publicado em 2018.			
11. RESUMO: Com uma demanda cada vez maior pelo transporte aéreo, é inevitável a deterioração ambiental em virtude de uma maior emissão de gases poluentes oriundos dos combustíveis utilizados nas aeronaves. Nesse contexto, todos os órgãos ligados ao setor aeronáutico estão cada vez mais atentos a todos os impactos causados pela emissão de gases de efeito estufa. A partir daí o presente trabalho de graduação propõe-se a avaliar os impactos tanto ambientais (emissões) quanto econômicos do uso de combustíveis alternativos para a aviação moderna. Pretende-se realizar um estudo de caso em escopo reduzido, dado as limitações de tempo e de recursos, a fim de estimar os custos envolvidos na utilização de biocombustíveis na aviação civil em âmbito nacional. Ainda, faz-se de vital importância ressaltar os custos de adaptação da infraestrutura aeroportuária existente para acomodar a utilização de combustíveis alternativos, bem como estimar a redução da emissão de poluentes (CO2 equivalente) advindos da utilização de combustíveis que possuam um menor fator de emissão de poluentes. Por fim, o trabalho objetiva avaliar se o benefício ambiental da referida adoção suplanta seu impacto econômico para os dias atuais e estimar, caso contrário, quando isso será possível de acontecer.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () SECRETO			