



COMUNICAÇÃO NACIONAL DO
BRASIL À CONVENÇÃO-QUADRO
DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE
MUDANÇA DO CLIMA

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

PROJETO BRA/16/G31

**QUARTA COMUNICAÇÃO NACIONAL E RELATÓRIOS DE ATUALIZAÇÃO
BIENAL DO BRASIL À CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS
SOBRE MUDANÇA DO CLIMA**

**QUARTO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES E REMOÇÕES
ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

RELATÓRIO DE REFERÊNCIA

**SETOR ENERGIA
SUBSETOR QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS
CATEGORIA AVIAÇÃO CIVIL**

Versão de agosto de 2020

QUARTO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA

SETOR ENERGIA

SUBSETOR QUEIMA DE COMBUSTÍVEIS

CATEGORIA AVIAÇÃO CIVIL

Coordenadora Técnica da Quarta Comunicação Nacional
Danielly Godiva Santana Molleta (PNUD/MCTI)

Supervisor do Quarto Inventário Nacional
Mauro Meirelles de Oliveira Santos (PNUD/MCTI)

Analista Técnica do setor Energia do Quarto Inventário Nacional
Renata P. S. Grisoli (PNUD/MCTI)

Analista Técnica do Quarto Inventário Nacional
Mayra Braga Rocha (PNUD/MCTI)

Coordenador Técnico-Científico do Quarto Inventário Nacional pela Rede Clima
Eduardo Delgado Assad (Embrapa)

Coordenadores Técnico-Científicos do setor Energia pela Rede Clima
Emilio Lèbre La Rovere (UFRJ)
Carolina Burle Schmidt Dubeux (UFRJ)

Autores

Aguinaldo José de Paula (ANAC)
Ana Paula Cunha Machado Cavalcante (ANAC)
Carlos Eduardo Rocha Araújo (ANAC)
Carolina Burle Schmidt Dubeux (COPPE)
Daniel Marcellos Calçado (ANAC)
Daniel Neves Schmitz Gonçalves (COPPE)
Emilio Lèbre La Rovere
George Vasconcelos Goes (COPPE)
Henrique Costa Tavares (ANAC)
Márcio de Almeida D'Agosto (COPPE)
Ricardo Antônio Binotto Dupont (ANAC)
Rodrigo Ayres Padilha (ANAC)
Tássia Faria de Assis (COPPE)

Instituição colaboradora
ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil

Aviso

Este documento compreende atualizações das estimativas de emissões com base na aplicação das diretrizes metodológicas de 2006 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC no acrônimo em inglês) que servirão de subsídios para elaboração futura do capítulo do “Inventário Nacional de Emissões Antrópicas e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal”, parte integrante da Quarta Comunicação Nacional do Brasil à Convenção do Clima. Neste trabalho, foram consideradas, na medida do possível, informações oficiais públicas para o período de 1990 a 2016.

Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelo(s) autor(es). O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações ou o(s) autor(es) não podem ser responsabilizados por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo direto ou indireto resultante do uso ou confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo, ou direta ou indiretamente resultante dos erros, imprecisões ou omissões de informações neste estudo.

Os resultados, as interpretações, as recomendações, as estimativas e as conclusões expressas neste estudo são de responsabilidade dos autores, não refletindo a opinião do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, nem de outros órgãos do governo participantes e consultados para elaboração deste estudo. O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações e outros órgãos governamentais se eximem da responsabilidade de implementar quaisquer dos resultados, interpretações, recomendações, estimativas ou conclusões contidos neste estudo.

Sumário

Sumário Executivo	9
1 Introdução	12
2 Metodologia	13
<i>Tier 1 - Abordagem top-down</i>	14
<i>Tier 3a - Abordagem bottom-up</i>	15
2.1 Dados de atividade	19
2.1.1 Ciclo LTO	19
2.1.2 Unidade Auxiliar de Potência (APU)	20
2.1.3 Estimativa das distâncias de voos	21
2.2 Fatores de emissão e outros parâmetros	22
3 Resultados	25
4 Diferenças em relação ao Terceiro Inventário	30
5 Referências	34
Apêndice A - Detalhamento metodológico	36
<i>A.1. Consumo energético para aviação doméstica e bunker</i>	36
Apêndice B - Resultados	37
<i>Emissões de GEE para aviação doméstica e bunker (em Gg)</i>	37

Lista de Figuras

Figura 1. Emissões de CO ₂ para a aviação doméstica e internacional	9
Figura 2. Série histórica das emissões de CH ₄	10
Figura 3. Série histórica das emissões de N ₂ O.....	10
Figura 4. Série histórica das emissões de GEE indiretos para aviação doméstica.....	11
Figura 5. Série histórica das emissões de GEE indiretos para aviação internacional	11
Figura 6. Ciclos de voo-padrão	16
Figura 7. Procedimentos para estimar emissões - Tier 1 e Tier 3a.....	18
Figura 8. Série histórica dos movimentos por tipo de voo	19
Figura 9. Série histórica do consumo energético de gasolina de aviação	26
Figura 10. Série histórica do consumo energético de querosene de aviação (QAv).....	26
Figura 11. Série histórica das emissões de CO ₂	27
Figura 12. Série histórica das emissões de CH ₄	28
Figura 13. Série histórica das emissões de N ₂ O	28
Figura 14. Série histórica das emissões de GEE indiretos para aviação doméstica	29
Figura 15. Série histórica das emissões de GEE indiretos para aviação internacional	29
Figura 16. Comparação entre a ANAC e Inventários - Emissões de CO ₂ dos voos domésticos.	33

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1. Emissões de GEE diretos por combustível (Gg)</i>	9
<i>Tabela 2. Dados necessários para utilização dos protocolos.....</i>	13
<i>Tabela 3. Cálculo das emissões dos gases CO₂ e não CO₂ inventariados.....</i>	14
<i>Tabela 4. Equações para estimar o consumo de combustível e as emissões dos gases inventariados</i>	16
<i>Tabela 5. Equações para estimar as emissões dos gases inventariados no ciclo Cruzeiro</i>	17
<i>Tabela 6. Equações para estimar as emissões dos gases inventariados no ciclo APU.....</i>	18
<i>Tabela 7. Tempos e regimes de potências por fase LTO.....</i>	20
<i>Tabela 8. Tempos de operação-padrão da APU por fase e por categoria de aeronave.....</i>	21
<i>Tabela 9. Equação para estimar a distância direta entre voos.....</i>	21
<i>Tabela 10. Fatores de emissão utilizados nas estimativas da abordagem Tier 1</i>	22
<i>Tabela 11. Relação entre as fases de utilização das APUs e os regimes de potência</i>	23
<i>Tabela 12. Fatores de emissão e fluxo de combustível das APUs</i>	23
<i>Tabela 13. Fatores de emissão de GEE diretos para a abordagem Tier 3a</i>	24
<i>Tabela 14. Evolução da demanda de QAv considerada em cada Inventário (ktep)</i>	31
<i>Tabela 15. Emissões de GEE diretos e indiretos - Terceiro Inventário (Gg)</i>	32
<i>Tabela 16. Emissões de GEE diretos e indiretos - Quarto Inventário (Gg).....</i>	32

Siglas

ACRP - *Airport Cooperative Research Program*

ANAC - Agência Nacional de Aviação Civil

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

APU - *auxiliary power unit* (unidade auxiliar de potência)

ATAN - Assessoria para Assuntos de Tarifas de Navegação Aérea

BEN - Balanço Energético Nacional

BIMTRA - Banco de Informações de Movimento de Tráfego Aéreo

CH₄ - metano

CO - monóxido de carbono

CO₂ - dióxido de carbono

DECEA - Departamento do Controle do Tráfego Aéreo

EEA - *European Environment Agency*

EMEP - *European Monitoring and Evaluation Programme*

EPA - *Environmental Protection Agency*

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FAA - *Federal Aviation Administration*

FAI - *Fédération Aéronautique Internationale*

FOI - *Swedish Defence Research Agency*

GEE - gases de efeito estufa

Gg - gigagrama

HC - hidrocarbonetos

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)

LTO - *landing and take off* (pouso e decolagem)

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações

MES - *Main Engine Start* (partida dos motores)

N₂O - óxido nitroso

NM VOC - *non-methane volatile organic compound* (compostos orgânicos voláteis não metânicos)

NO_x - óxidos de nitrogênio

OACI - Organização da Aviação Civil Internacional

Qav - querosene de aviação

Tep - tonelada equivalente de petróleo

TJ - terajoule

Sumário Executivo

Neste relatório são apresentadas as estimativas de emissões de gases de efeito estufa referentes à aviação civil no Brasil. A Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) realizou os cálculos detalhados para os anos de 2005 a 2016. A partir disso, foi revista a série histórica para o período 1990-2004.

De acordo com o IPCC 2006, apenas as emissões provenientes de voos domésticos devem ser contabilizadas no inventário nacional. As emissões decorrentes de queima de combustíveis em atividade aérea internacional (*bunker*) devem ser informadas separadamente.

A Tabela 1 mostra os resultados das emissões para cada fonte energética e tipo de voo. Do mesmo modo, as Figuras 1, 2 e 3 ilustram o comportamento das emissões de GEE diretos ao longo da série histórica e as Figuras 4 e 5 o comportamento das emissões de GEE indiretos.

Tabela 1. Emissões de GEE diretos por combustível (Gg)

Ano	Gasolina de Aviação			QAv - Doméstico						QAv - Bunker					
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x	NMVOC	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x	NMVOC
1990	142	0,001	0,004	5.009	0,002	0,1	3,6	4,6	0,7	1.475	0,0002	0	0,3	0,4	0
1995	142	0,001	0,004	6.234	0,003	0,2	4,5	5,7	0,9	2.074	0,0002	0,1	0,4	0,6	0,1
2000	170	0,001	0,005	8.157	0,004	0,2	5,8	7,5	1,1	2.063	0,0002	0,1	0,4	0,6	0,1
2005	124	0,001	0,004	5.764	0,003	0,2	4	5,2	0,8	4.323	0,0005	0,1	0,7	1,2	0,1
2010	156	0,001	0,004	9.002	0,004	0,2	4,7	8,1	0,5	5.585	0,0006	0,2	0,9	1,6	0,1
2015	143	0,001	0,004	10.265	0,004	0,3	5,5	9,2	0,6	7.518	0,0008	0,2	1,2	2,1	0,2
2016	128	0,001	0,004	9.605	0,004	0,3	5,1	8,4	0,6	6.727	0,0007	0,2	1,1	2	0,2

Figura 1. Emissões de CO₂ para a aviação doméstica e internacional

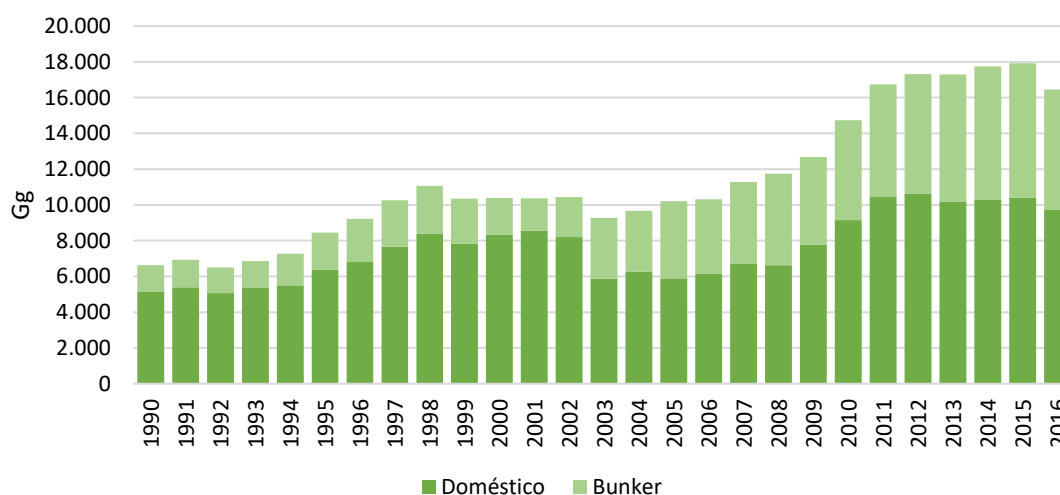


Figura 2. Série histórica das emissões de CH₄

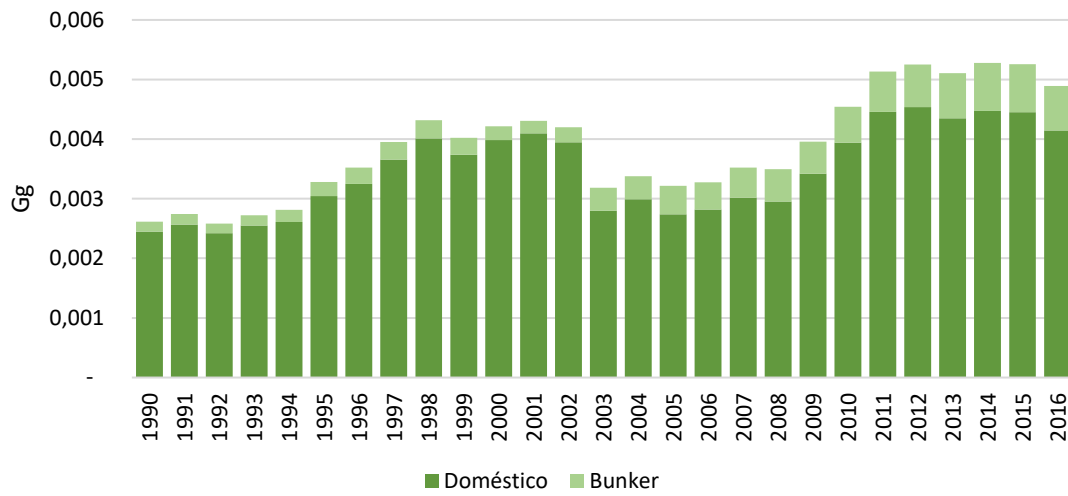


Figura 3. Série histórica das emissões de N₂O

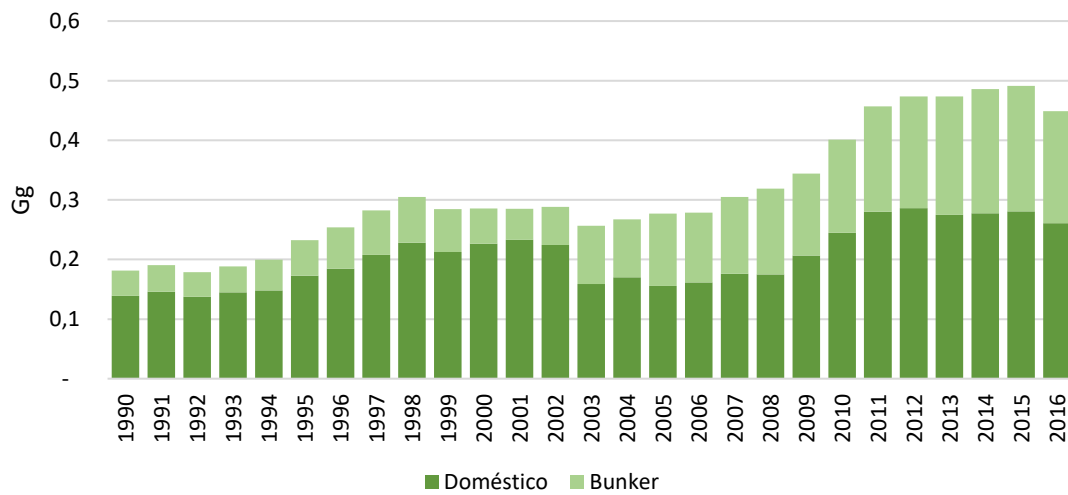


Figura 4. Série histórica das emissões de GEE indiretos para aviação doméstica

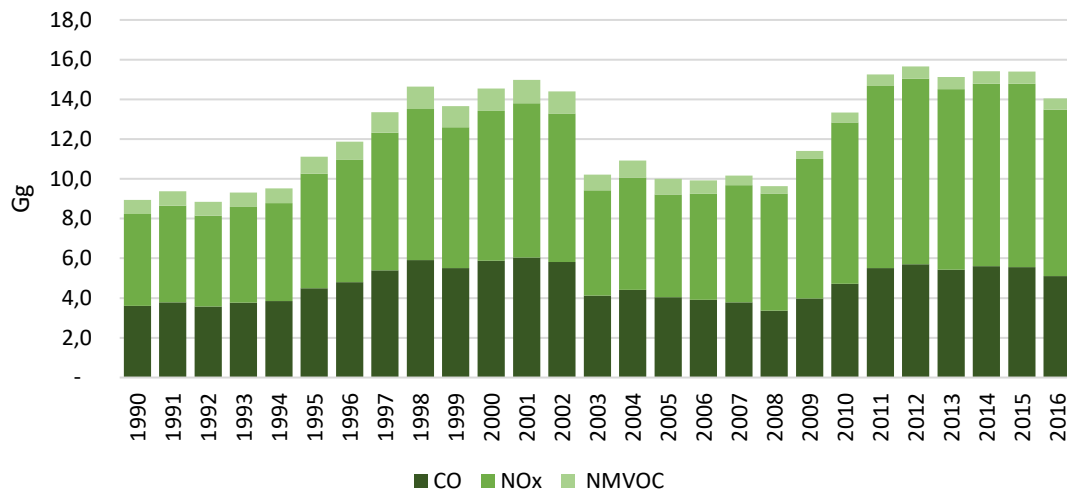
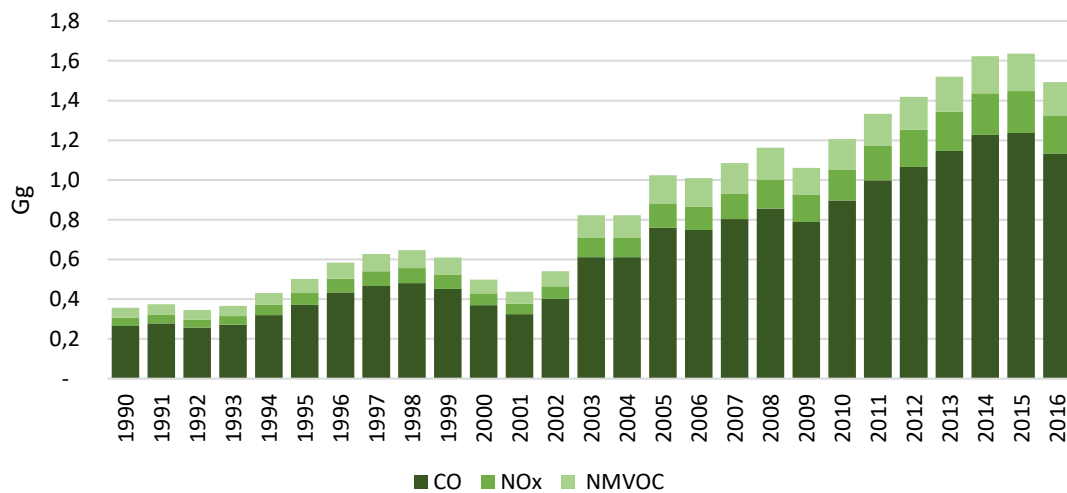


Figura 5. Série histórica das emissões de GEE indiretos para aviação internacional



1 Introdução

Este relatório apresenta os resultados do Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (GEE), CO₂ e não CO₂ (CH₄, N₂O, NO_x, CO e NMVOC), provenientes da queima de combustível abastecido em território brasileiro e aviação internacional, durante as fases de voo e das Unidades Auxiliares de Potência (APU) das aeronaves.

O modelo utilizado para estimar as emissões de GEE oriundas do transporte aéreo é adaptado dos procedimentos utilizados no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil (ANAC, 2018), do Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (BRASIL, 2016) e do estudo Gonçalves & D'Agosto (2017).

A partir do inventário da ANAC, foram conduzidos ajustes na série histórica e no cálculo das emissões da abordagem desagregada. Optou-se por estimar o histórico de emissões do transporte aéreo a partir da demanda anual de energia de querosene de aviação (QAV) e de gasolina de aviação, exposta nas séries históricas do Balanço Energético Nacional (BEN), para voos domésticos e internacionais (indicados como *Bunker*), adequando os resultados, por meio do método *overlap*, para a série histórica entre 1990 e 2004.

Isso posto, adota-se uma abordagem *Tier 1* para a série histórica entre 1990 e 2004, utilizando os fatores de emissão implícitos obtidos das saídas do modelo *bottom-up* para 2005. Além disso, considera-se a abordagem *bottom-up Tier 3a* conduzida no estudo da ANAC (2018) para os anos entre 2005 e 2016.

Salienta-se que a abordagem desagregada considera as fases de voo e tecnologia, ou seja, valores de certificação dos motores, discriminados por aeronave ou categoria de aeronave, e o regime de operação do motor (Ciclo LTO e Uso da APU).

Destaca-se que as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O foram calculadas considerando todas as fases do voo, enquanto para NO_x, CO e NMVOC foram estimadas apenas para o ciclo LTO.

2 Metodologia

Como diretrizes técnicas básicas foram utilizados o guia IPCC 2006, o guia *Air pollutant emissions inventory guidebook* da EMEP/EEA (2017) e o *Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APUs and Alternative Systems* (ACRP, 2012).

De acordo com o IPCC 2006, para estimar as emissões, as metodologias podem variar em função do nível (*Tier*) de complexidade e detalhamento. Existem três níveis principais de protocolos para estimar o consumo energético e emissão de GEE e poluentes atmosféricos do setor de transportes:

- *Tier 1*: aplica uma relação linear simples entre dados de atividade e fatores de emissão, obtidos de forma agregada (*top-down*).
- *Tier 2*: utiliza dados de atividade semelhantes aos protocolos *Tier 1*, mas aplicam fatores de emissão específicos do país, ou seja, em uma abordagem desagregada (*bottom-up*).
- *Tier 3*: também segue abordagem *bottom-up*, necessita-se de fatores de emissão específicos por tecnologia. É o mais exigente em quantidade e consistência dos dados.

Os níveis 2 e 3 são conhecidos como métodos de nível superior.

A Tabela 2 descreve os dados necessários para aferir as emissões de GEE e poluentes atmosféricos para cada nível metodológico.

Tabela 2. Dados necessários para utilização dos protocolos

Dados necessários (domésticos e internacionais)	<i>Tier 1</i>	<i>Tier 2</i>	<i>Tier 3a</i>	<i>Tier 3b</i>
Consumo de gasolina e querosene de aviação (QAV)	X	X	X	X
LTO por tipo de aeronave		X	X	X
Origem e destino por tipo de aeronave			X	X
Movimentos de voo completo com dados das aeronaves e dos motores				X

Fonte: Climate Policy Watcher (2017)

Note-se que no setor de transporte aéreo há diferença entre os valores de consumo de combustíveis apresentados no BEN e na modelagem *bottom-up* (ANAC). Essa diferença ocorre em função do conceito de *bunker* do BEN, que considera os combustíveis consumidos pelas empresas estrangeiras, enquanto a modelagem *bottom-up* considera os combustíveis consumidos em voos internacionais, independentemente da bandeira da aeronave. A repartição entre emissões domésticas e *bunker* obedeceu ao critério da modelagem *bottom-up*. Além disso, a diferença entre o total (doméstico e *bunker*) do BEN e da modelagem foi atribuído à categoria 1A5bi (não especificado, móvel, componente aviação), assumindo-se que a modelagem *bottom-up* não computa valores de helicópteros, pequenas aeronaves e aeronaves militares.

Destaca-se que a gasolina de aviação utilizada na aviação civil não é adicionada aos consumos anuais de querosene, mas relatada separadamente. Conforme o IPCC 2006, as emissões

provenientes do consumo de gasolina de aviação são calculadas usando fator de emissão e valores caloríficos adaptados para o combustível utilizado nesse modo de transporte, seguindo uma abordagem *Tier 1*. Dessa forma, a divisão em voos domésticos e internacionais não é necessária na comunicação da gasolina de aviação, visto que esse combustível é convencionalmente utilizado em aeronaves pequenas que operam em rotas domésticas.

Para o consumo de querosene de aviação (QAV), a separação do tráfego aéreo doméstico e internacional é essencial para o inventário, sendo realizada com base no consumo setorial do combustível (*top-down*) e nos pontos origem-destino (OD) da malha aérea (*bottom-up*). Se um ponto OD se situa em território nacional, classifica-se como um voo doméstico. Nesse tocante, não depende da nacionalidade da empresa aérea ou ponto de embarque e desembarque.

Neste inventário, são apresentadas as emissões desagregadas (*Tier 3a*) para o intervalo entre 2005 e 2016 (ANAC, 2018). Concomitantemente, são realizadas estimativas *Tier 1* para a série histórica entre 1990 e 2004 do setor aéreo, utilizando os fatores de emissão implícitos obtidos na abordagem *bottom-up*. Assim, as próximas subseções descrevem os *Tiers* utilizados para estimar o consumo de energia e a emissão de GEE e poluentes atmosféricos.

Tier 1 - Abordagem *top-down*

O método *Tier 1*, baseado em uma abordagem *top-down*, considera apenas o consumo de combustível agregado da aviação civil, sem uma discriminação das emissões por fases de voo. Dessa forma, este método é utilizado nos casos em que não há informações disponíveis sobre as operações aéreas individuais, mas apenas em dados consolidados de consumo de combustível.

As equações 1 e 2, expostas na Tabela 3, são utilizadas para o cálculo das emissões dos gases CO₂ e não CO₂.

Tabela 3. Cálculo das emissões dos gases CO₂ e não CO₂ inventariados

Equações	Descrição	Tier	Abordagem	Equação
Equação 1	Cálculo da emissão de CO ₂	Tier 1	<i>top-down</i>	$E_{CO_2} = Cons \times \rho_{energia} \times F_{ec} \times \%Oxi \times \frac{44}{12}$
Equação 2	Cálculo da emissão de CH ₄ e N ₂ O (não-CO ₂)	Tier 1	<i>top-down</i>	$E_i = Cons \times \rho_{energia} \times F_{e_i}$

Em que:

E_{CO_2} = Emissão anual de CO₂ (tCO₂/ano);

Cons = Consumo doméstico ou internacional de combustível (m³/ano);

$\rho_{Energia}$ = Densidade energética do combustível (tep/m³);

F_{ec} = Fator de emissão de carbono elementar por unidade de energia contida no combustível (tC/TJ);

$\% \text{ Oxi}$ = Fração do carbono elementar oxidado na combustão;

$44/12$ = Razão entre as massas molares do CO_2 e do carbono elementar (gCO_2/gC);

E_i = Emissão anual do gás i (t gás/ano);

F_{ei} = Fator de emissão do gás i por unidade de energia contida no combustível (t gás/TJ).

Para o histórico referente aos anos entre 1990 e 2004, utiliza-se o método *overlap*¹ para reajuste dos valores do BEN. Os anos de referência para estimativa do fator de ajuste foram os contemplados na abordagem *Tier 3a* (2005-2016).

Tier 3a - Abordagem *bottom-up*

No modo aéreo, os protocolos *Tier 3* são baseados em dados reais de movimentações de voo, seja para dados de origem e destino (*Tier 3a*) ou para informações completas em nível de equipamento e trajetórias de voos (*Tier 3b*).

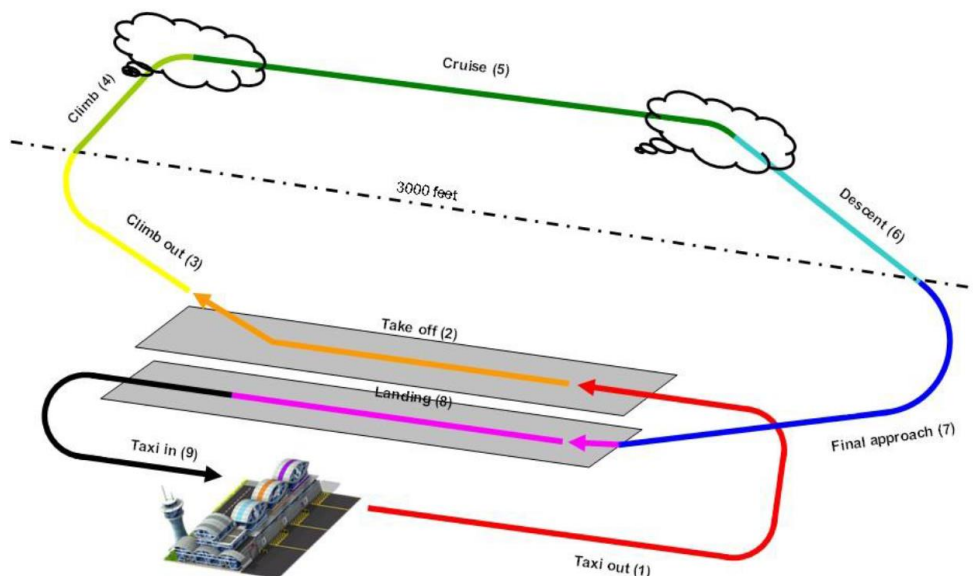
Por utilizarem dados de movimentação de voo em vez do consumo de combustível, os métodos *Tier 3* fornecem uma separação mais precisa entre emissões de voos domésticos e internacionais (EMEP/EEA, 2017).

No método *Tier 3a* as emissões são calculadas por fase de voo, que são classificadas em: Ciclo LTO (*Landing and Take-Off*), Cruzeiro (*Cruise*) e Unidade Auxiliar de Potência (*Auxiliary Power Unit - APU*). O ciclo LTO contempla todas as etapas de voo próximas ao aeródromo realizadas pelas aeronaves em altitudes inferiores a 914,4 metros. Isso posto, é composto por seis fases de voo, divididas entre a partida e a chegada.

As fases de partida do ciclo LTO são: (1) Táxi de partida (*Taxi-out*); (2) Decolagem (*Take-off*); e (3) Início da subida para cruzeiro (*Climb-out*). As fases de chegada são: (1) Aproximação final (*Final approach*); (2) Toque e corrida de desaceleração (*Landing*); e (3) Táxi de chegada (*Taxi-in*).

¹ Optou-se por utilizar o método *overlap*, que se baseia no desenvolvimento de sobreposição entre os métodos, devido a divergências no método de aferição do consumo de QAv doméstico e *bunker* entre o inventário da ANAC e os balanços da EPE. Essas diferenças são oriundas da diferença entre as classificações de aviação internacional e doméstica.

Figura 6. Ciclos de voo-padrão



Fonte: EMEP/EEA (2013)

As emissões por fase de voo do ciclo LTO são calculadas a partir da queima do combustível (somente QAv). Nesse caso, o cálculo do consumo de combustível em cada fase é conduzido em função do modelo e do número de motores da aeronave.

O fluxo de combustível, calculado em função do regime de potência dos motores nas fases de voo, também é um dado de entrada. Em paralelo, contabiliza-se no cálculo o tempo de duração de cada fase de voo.

As equações 3 e 4, expostas na Tabela 4, são utilizadas para o cálculo do consumo e emissões dos gases da fase LTO.

Tabela 4. Equações para estimar o consumo de combustível e as emissões dos gases inventariados

Equações	Descrição	Tier	Abordagem	Equação
Equação 3	Ciclo LTO - consumo de combustível	Tier 3a	bottom-up	$C_{a,f,p} = nM_a \times Fc_{a,f} \times t_{a,f,p}$
Equação 4	Ciclo LTO - emissões de GEE	Tier 3a	bottom-up	$E_{g,a,f,p} = Fe_{g,a,f} \times C_{a,f,p}$

Em que:

C = Consumo de combustível da aeronave a , em kg, para cada fase de voo f no aeródromo p ;

nM = Número de motores da aeronave a ;

F_c = Fluxo de combustível, em kg/s, de cada motor da aeronave a na fase de voo f ;

t = Tempo, em segundos, que a aeronave a permanece na fase de voo f no aeródromo p ;

E = Emissão, expressa em kg, do gás g pela aeronave a na fase de voo f no aeródromo p ;

F_e = Fator de emissão do gás g , em $kg_{gás}/kg_{combustível}$, da aeronave a na fase f .

A fase de voo *Cruise* (*Cruise*) é definida como a etapa de voo realizada pelas aeronaves em altitudes superiores aos 914,4 metros.

Dependendo do nível de refinamento das informações disponíveis sobre a fase de *cruise*, aplica-se a metodologia *Tier 3a* ou *Tier 3b*. A abordagem *Tier 3b* utiliza informações contínuas de toda a trajetória do voo e de programas avançados de modelagem, enquanto a *Tier 3a* depende apenas das informações do modelo da aeronave e dos aeródromos de origem e destino.

Isso posto, este inventário utiliza a abordagem *Tier 3a*, descrita com mais detalhes no guia da EMEP/EEA (2017). Esse guia apresenta, para cada família de aeronaves, uma tabela com o consumo de combustível e as emissões totais em voo de acordo com a distância entre os aeródromos.

Para cada distância de voo, a massa de combustível consumido ou massa de gases emitidos é calculada por meio de uma interpolação linear na tabela de acordo com a Equação 5 como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Equações para estimar as emissões dos gases inventariados no ciclo *Cruise*

Equações	Descrição	Tier	Abordagem	Equação
Equação 5	Ciclo <i>Cruise</i>	<i>Tier 3a</i>	<i>bottom-up</i>	$M_{a,d,g} = Y_{1a,g} + (Y_{2a,g} - Y_{1a,g}) \times \frac{(d - X_1)}{(X_2 - X_1)}$

Em que:

d = Distância de voo em km calculada entre os aeródromos de origem e destino;

M = Massa expressa em kg do combustível consumido ou do gás emitido g no voo de distância d percorrida pela aeronave a ;

X_1 = Distância tabelada imediatamente inferior à distância d ;

X_2 = Distância tabelada imediatamente superior à distância d ;

Y_1 = Massa de combustível consumida ou massa do gás g emitida tabelada para a aeronave a para a distância X_1 ;

Y_2 = Massa de combustível consumida ou massa do gás g emitida tabelada para a aeronave a para a distância X_2 .

As aeronaves destinadas ao transporte regular de passageiros e carga possuem um equipamento formado por uma turbina a gás conectada a um gerador elétrico, destinado a suprir energia elétrica e pneumática durante as operações ocorridas em solo, denominado APU (*Auxiliary Power Unit* - Unidade Auxiliar de Potência).

Convencionalmente, a APU é instalada no cone da cauda das aeronaves, após a caverna de pressão. A fonte de energia dessas unidades é o combustível armazenado nos tanques principais. Na APU, as emissões são provenientes da combustão do querosene de aviação em uma turbina a gás. Utilizou-se, portanto, a metodologia de cálculo apresentada no *Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APUs and Alternative Systems* (ACRP, 2012).

De forma similar às estimativas para as emissões das fases de voo do ciclo LTO, o consumo de combustível é estimado a partir do tempo de uso da APU e do fluxo de combustível. Com isso, são estimadas as emissões a partir de fatores de emissão específicos para cada gás.

As equações 6 e 7, expostas na Tabela 6, são utilizadas para o cálculo do consumo e emissões dos gases no ciclo APU.

Tabela 6. Equações para estimar as emissões dos gases inventariados no ciclo APU

Equações	Descrição	Tier	Abordagem	Equação
Equação 6	Ciclo APU	Tier 3a	bottom-up	$C_{a,f} = Fc_{a,f} \times t_{a,f,o}$
Equação 7	Ciclo APU	Tier 3a	bottom-up	$E_{g,a,f} = Fe_{g,a,f} \times C_{a,f}$

Em que:

C = Consumo de combustível da APU na aeronave a , na fase de uso f ;

Fc = Fluxo de combustível, em kg/s, de cada APU na aeronave a , na fase de uso f ;

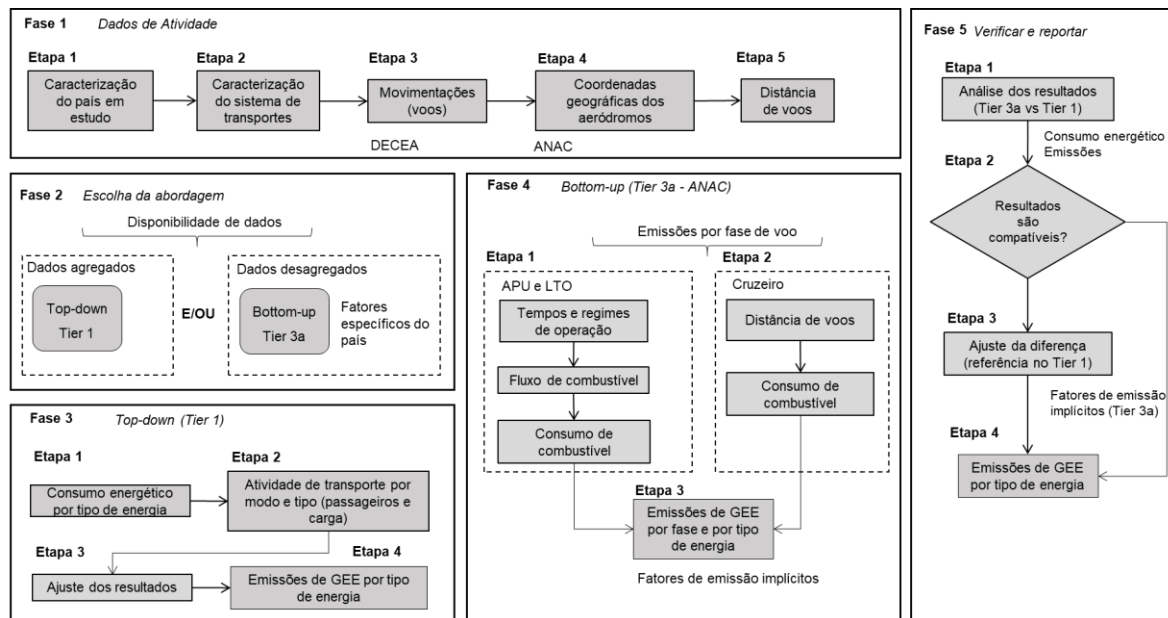
t = Tempo, em segundos, que a unidade APU é usada na aeronave a , na fase de uso f e pelo operador aéreo o ;

E = Emissão, expressa em kg, do gás g pela aeronave a na fase de uso f ;

F_e = Fator de emissão do gás g , em $kg_{gás}/kg_{combustível}$, da aeronave a na fase de uso f .

A Figura 7 ilustra a sequência lógica de procedimentos para a estimativa das emissões.

Figura 7. Procedimentos para estimar emissões - Tier 1 e Tier 3a



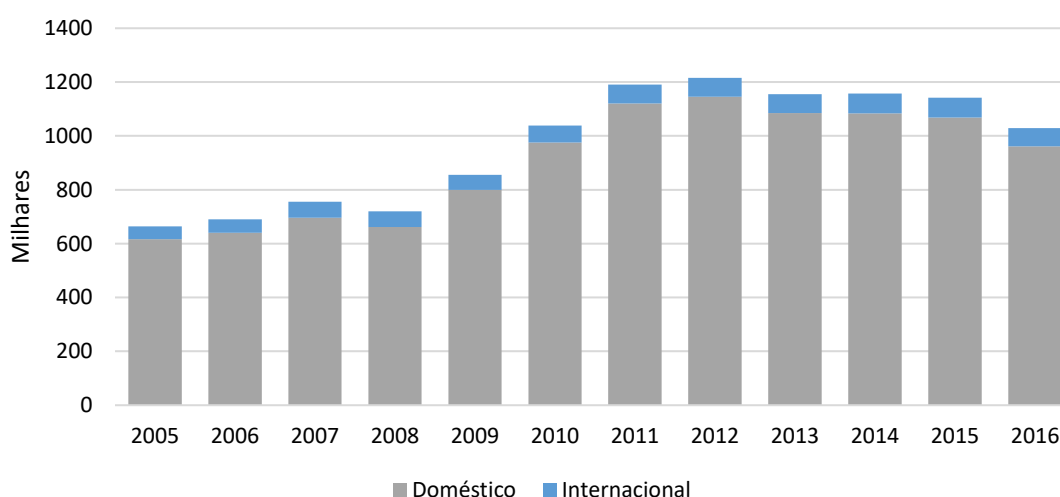
2.1 Dados de atividade

Diferentemente do transporte rodoviário, o inventário aéreo considera a atividade em função da movimentação das aeronaves, obtida no Banco de Informações de Movimento de Tráfego Aéreo (BIMTRA), que se encontra sob a responsabilidade da Assessoria para Assuntos de Tarifas de Navegação Aérea (ATAN), do Departamento do Controle do Tráfego Aéreo (DECEA).

Na ocasião da elaboração do Inventário Nacional de Emissões da Aviação Civil 2014 (ANAC, 2014), os dados do BIMTRA eram extraídos de forma manual por meio de consultas online, cujo processo está sujeito a erros por parte do usuário que realiza a transferência de dados.

Por conseguinte, a ANAC obteve junto ao DECEA uma extração completa dos dados do BIMTRA relativos ao período de 2005 a 2016 (DECEA, 2018), sendo utilizados como informações de entrada no modelo *bottom-up*. A Figura 8 ilustra a série histórica do número de movimentos em aeródromos nacionais classificados por tipo de voo, doméstico ou internacional.

Figura 8. Série histórica dos movimentos por tipo de voo



Similarmente aos resultados observados no inventário de 2014, destaca-se no gráfico uma queda no número de movimentos para o ano de 2008, cujo universo de movimentações não se apresenta em sua completude em função, principalmente, de uma sub-representação das movimentações do Aeroporto de Congonhas em São Paulo, conforme já detalhado naquele inventário.

2.1.1 Ciclo LTO

As fases do ciclo LTO implicam uso de regime de potência do motor e tempo de operação diferentes e, na falta de dados reais, pode-se utilizar dados de certificação ou uma combinação de dados reais e de certificação.

A OACI (2011) e a *Swedish Defence Research Agency* (FOI, 2013) sugerem tempos médios para cada etapa do ciclo LTO para aeronaves a jato e turboélice, respectivamente. Como resultado das campanhas de certificação de motores, os valores do fluxo de combustível (kg/s) e emissões (em g/kg combustível) são determinados em diferentes regimes de potência de motor determinados de acordo com a fase de operação. Cada um desses valores é considerado característico para cada uma das fases do LTO (Tabela 7).

Tabela 7. Tempos e regimes de potências por fase LTO

Fase	Jato			Turboélice		
	Tempo (min)	Regime de Potência	Fonte	Tempo (min)	Regime de Potência	Fonte
<i>Approach</i>	4	30%	OACI (2011)	4,5	30%	FOI (2013)
<i>Taxi-in</i>	7	7%	OACI (2011)	7	7%	OACI (2011)
<i>Taxi-out</i>	19	7%	OACI (2011)	19	7%	OACI (2011)
<i>Take off</i>	0,7	100%	OACI (2011)	0,5	100%	FOI (2013)
<i>Climb</i>	2,2	85%	OACI (2011)	2,5	85%	FOI (2013)

Não obstante, os tempos de *taxi* dependem das características dos aeroportos. Para cada aeródromo foram atribuídos tempos de *taxi-in* e *taxi-out* médios cujos valores variam de acordo com o período considerado.

2.1.2 Unidade Auxiliar de Potência (APU)

No tocante à APU, o seu uso é dividido em quatro fases, conforme sugerido pela OACI (2011), especificamente: Partida da APU; *Gate-in*; *Gate-out* e *Main Engine Start (MES)*.

O tempo efetivo que cada aeronave permanece junto ao *gate* varia consideravelmente conforme o tipo de aeronave, o aeródromo e a quantidade de combustível requerida para a próxima movimentação.

O estudo da ACRP (2012) apresenta valores-padrão para os tempos de cada fase, conforme o tipo da aeronave. As aeronaves são classificadas em cinco categorias: *narrow body* (aeronave de fuselagem estreita), *wide body* (aeronave de fuselagem larga), *jumbo-wide body* (aeronaves do tipo jumbo, de fuselagem larga), *regional jet* (jatos regionais) e *turbo-prop* (turbo-hélices).

Dessa forma, assume-se que os tempos-padrão para as fases partida, *gate-out* e *MES* são representativos das condições dos aeródromos brasileiros, sendo os tempos de *gate-in* ajustados de modo a refletir esses tempos e o tempo total estimado de uso de APU. A Tabela 8 apresenta os tempos utilizados nas estimativas do inventário.

Tabela 8. Tempos de operação-padrão da APU por fase e por categoria de aeronave

Categoria da aeronave	Partida da APU (min)	Gate-out (min)	MES - Partida dos motores (min)	Gate-in (min)
Fuselagem estreita	3	3,6	$5,8 \cdot 10^{-1}$	67,8
Fuselagem larga	3	3,6	$5,8 \cdot 10^{-1}$	67,8
Fuselagem larga (jumbo)	3	5,3	2,3	64,4
Jato regional	3	3,6	$5,8 \cdot 10^{-1}$	67,8
Turbo-hélices	3	3,6	$5,8 \cdot 10^{-1}$	67,8

2.1.3 Estimativa das distâncias de voos

A metodologia adotada, *Tier 3a*, requer apenas a localização dos aeródromos de origem e destino de cada voo para a estimativa das emissões em cruzeiro.

Dessa maneira, a distância percorrida é aproximada pela distância direta entre os aeroportos, corrigida por um fator de penalização. O cálculo da distância direta é conduzido a partir das coordenadas geográficas dos aeródromos de origem e destino (convertidas para radianos) e a partir do raio médio da Terra² (6.371 km). A Equação 8 apresenta a expressão utilizada no cálculo.

Tabela 9. Equação para estimar a distância direta entre voos

Equações	Descrição	Tier	Abordagem	Equação
Equação 8	Distância direta	<i>Tier 3a</i>	<i>bottom-up</i>	$d_{GC} = 2asen \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right) + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right) R_T$

Em que:

d_{GC} = Distância direta estimada;

$\Delta\varphi$ = Diferença entre as latitudes dos aeródromos de origem e destino;

φ_1 = Latitude do aeródromo de origem;

φ_2 = Latitude do aeródromo de destino;

$\Delta\lambda$ = Diferença entre as longitudes dos aeródromos de origem e destino;

R_T = Raio médio da Terra.

O cálculo da Equação 8 determina a distância direta entre dois aeródromos em uma aproximação da superfície terrestre por uma esfera. Entretanto, em um voo real, uma aeronave não realiza a rota de menor distância entre dois aeroportos, fato causado por fatores como posição de fixos de navegação, órbitas de espera em aeroportos congestionados e ocorrências meteorológicas.

Esse impacto é maior em voos mais curtos, em que os efeitos da navegação aérea são mais pronunciados em relação à distância total do voo. Dessa forma, utilizou-se o fator de penalização

² O raio médio da Terra foi definido como 6.371 km de acordo com o padrão adotado pela FAI (*Fédération Aéronautique Internationale*).

do estudo da ANAC (2018) de 10% para viagens de até 450 km. A partir dessa distância a penalização segue então a logarítmica exposta no estudo da ANAC (2018).

2.2 Fatores de emissão e outros parâmetros

Os fatores de emissão GEE diretos e indiretos utilizados nas estimativas das metodologias *Tier 1* e *Tier 3a* diferem quanto às fontes e ao nível de desagregação. Na abordagem *Tier 1*, são utilizados fatores de emissão agregados com base na emissão média dos combustíveis da aviação (IPCC, 2006). No caso da abordagem *Tier 3*, utilizam-se os fatores expostos no estudo ANAC (2018).

Dentre os dados necessários para a aplicação das equações 1 e 2, a densidade energética ($\rho_{energia}$) foi obtida do BEN 2018 (EPE, 2019). O fator de emissão (FeC), a fração de carbono oxidado ($\%Oxi$), e os fatores de emissão necessários para as estimativas das emissões de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) são provenientes do IPCC 2006, tanto para a gasolina quanto para o querosene de aviação.

Durante a fase cruzeiro de voo não há emissões de CH_4 . Para as fases do ciclo LTO, o fator é 5,0 $kgCH_4/TJ QAv$. Todavia, conforme assumido pelo IPCC, o querosene consumido em LTO corresponde a aproximadamente 10% do consumo total, o que faz com que nas estimativas *Tier 1* o fator utilizado seja 0,5 $kgCH_4/TJ QAv$.

Os valores utilizados na aplicação das equações são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Fatores de emissão utilizados nas estimativas da abordagem *Tier 1*

Combustível	Fator de emissão (tC/TJ)	Densidade Energética (tep)	Fração de Carbono Oxidado	Fator de Emissão (kg CH_4 /TJ)	Fator de Emissão (kg N_2O /TJ)
Gasolina de Aviação	19,1	$76,3 \cdot 10^{-2}$	100%	0,5	2
Querosene de Aviação	19,5	$82,2 \cdot 10^{-2}$	100%	0,5	2

Fonte: IPCC 2006

Na metodologia *Tier 3a*, os fatores de emissão são determinados de acordo com o GEE. Em alguns casos, esses fatores são função apenas do consumo de combustível. Em outros, eles são determinados de acordo com a fase de voo e baseiam-se nos valores de certificação dos motores, discriminados por aeronave (Cruzeiro e Ciclo LTO) ou categoria de aeronave (Uso da APU), e ainda o regime de operação do motor (Ciclo LTO e Uso da APU).

A fase de voo em cruzeiro abrange as operações das aeronaves realizadas acima de 3.000 pés (914,4 m). As emissões contabilizadas são, portanto, divididas nas etapas *climb*, *cruise* e *descent*.

Além da distância do voo, o consumo de combustível e as emissões atmosféricas de uma aeronave são condicionados por diversos outros fatores que caracterizam o voo, tais como a trajetória altimétrica, as variações de velocidade, a carga transportada, as condições climáticas, etc.

A base EMEP/EEA apresenta uma tabela com valores de emissão e consumo resultantes de modelagem na qual, para cada combinação de modelo de aeronave e fator de emissão/consumo de combustível, são tabelados os totais (em kg) para 17 pontos. Cada ponto designa uma distância de voo, compreendida entre 231,5 e 12.964 quilômetros (ANAC, 2018).

Para cada aeronave, a tabela EMEP/EEA apresenta os dados para distâncias de voo até certo limite de operação usual. Como na base de movimentações existem voos cujas distâncias percorridas superam esses limites, fatores de emissão por extrapolação linear são calculados para essas situações a partir dos dois últimos valores informados pela tabela para cada aeronave.

Os fatores de emissão e o consumo de combustível das APUs são dependentes tanto do tipo de aeronave quanto do regime de potência no qual ela está operando. Cada uma das fases de utilização da unidade apresenta um regime de potência típico, o qual varia conforme as condições de temperatura ambiente.

Levando em conta a temperatura média dos aeródromos brasileiros, as fases de utilização foram associadas aos regimes de potência utilizados na condição de “altas temperaturas” (acima de 10°C), dessa forma, as fases se relacionam com os regimes de potência, conforme a Tabela 11.

Tabela 11. Relação entre as fases de utilização das APUs e os regimes de potência

Fase de utilização	Regime de potência (acima de 10 °C)
Partida da APU	Sem carga
Gate-out	ECS*
MES	Carga Máxima
Gate-in	ECS

* ECS (*Environmental Control System*): condição normal de operação usada no embarque e desembarque de passageiros.

A Tabela 12 apresenta o fluxo de combustível e os fatores de emissão para cada fase de utilização. Esses valores são utilizados nas equações 6 e 7 para estimar as emissões do ciclo APU.

Tabela 12. Fatores de emissão e fluxo de combustível das APUs

Fase de utilização	Categoria da aeronave	Fluxo de combustível	gCO/kg QAv	gHC/kg QAv	gNO _x /kg QAv
		(kg QAv/s)			
Partida da APU	Fuselagem estreita	0,021	31,75	6,53	5,45
	Fuselagem larga	0,035	10,26	0,87	7,55
	Fuselagem larga (jumbo)	0,033	9,38	0,88	7,41
	Jato regional	0,012	6,26	1,69	6,14
	Turbo-hélices	0,012	6,26	1,69	6,14
Gate-in e Gate-out	Fuselagem estreita	0,033	5,72	0,43	6,85
	Fuselagem larga	0,052	1,14	0,19	10,99
	Fuselagem larga (jumbo)	0,061	0,53	0,12	10,3
	Jato regional	0,019	6,47	0,49	4,93
	Turbo-hélices	0,019	6,47	0,49	4,93
MES	Fuselagem estreita	0,038	4,94	0,29	7,64
	Fuselagem larga	0,064	0,98	0,13	11,53
	Fuselagem larga (jumbo)	0,058	0,53	0,12	11,2
	Jato regional	0,02	6,48	0,42	4,91
	Turbo-hélices	0,02	6,48	0,42	4,91

De acordo com estudo do FAA & EPA (2009), é grande a incerteza quanto à emissão de CH₄ por motores tipo turbina a gás, e essa emissão provavelmente só ocorre em regimes de baixa tração. No caso da APU, a classificação por nível de tração do motor não se aplica, e dessa forma optou-se por considerar as emissões de CH₄ como desprezíveis.

No que diz respeito aos GEE diretos, utilizando a abordagem *Tier 3a*, as estimativas das emissões foram feitas a partir de valores-padrão de fator de emissão e poder calorífico para o querosene de aviação³, apresentados pelo IPCC 2006. Para a densidade média, foram adotados dados divulgados pela ANP.

Uma vez que os fatores de emissão do IPCC se apresentam em kg de gás por unidade de energia (kg/TJ), foi utilizado o poder calorífico, expresso em quantidade de energia por unidade de massa (TJ/Gg). Dessa forma, foram obtidos fatores de emissão expressos em kg de gás por kg de combustível utilizado. Os valores utilizados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Fatores de emissão de GEE diretos para a abordagem *Tier 3a*

Combustível	Querosene de Aviação	Unidade	Fonte
Fator de emissão de CO ₂	71500	kgCO ₂ /TJ QAv	IPCC 2006
Fator de emissão N ₂ O	2	kgN ₂ O/TJ QAv	IPCC 2006
Fator de emissão CH ₄	5	kgCH ₄ /TJ QAv	IPCC 2006
Valor calorífico	44,1	TJ/Gg	IPCC 2006
Fator de emissão (massa) de CO ₂	31,5.10 ⁻¹	kgCO ₂ /kg QAv	Calculado
Fator de emissão (massa) de N ₂ O	88,2 10 ⁻⁶	kgN ₂ O/kg QAv	Calculado
Fator de emissão (massa) de CH ₄	22,1 10 ⁻⁵	kgCH ₄ /kg QAv	Calculado
Densidade média	79,9 10 ⁻²	kg/L	EPE (2019)

³ As estimativas feitas pela metodologia *Tier 3a* correspondem apenas às emissões geradas pelo consumo de querosene de aviação.

3 Resultados

Esta seção apresenta os resultados das estimativas do consumo energético e das emissões de GEE diretos e indiretos do modo aéreo, desagregadas em voos domésticos e internacionais. Os resultados completos são expostos nos Apêndice B deste relatório.

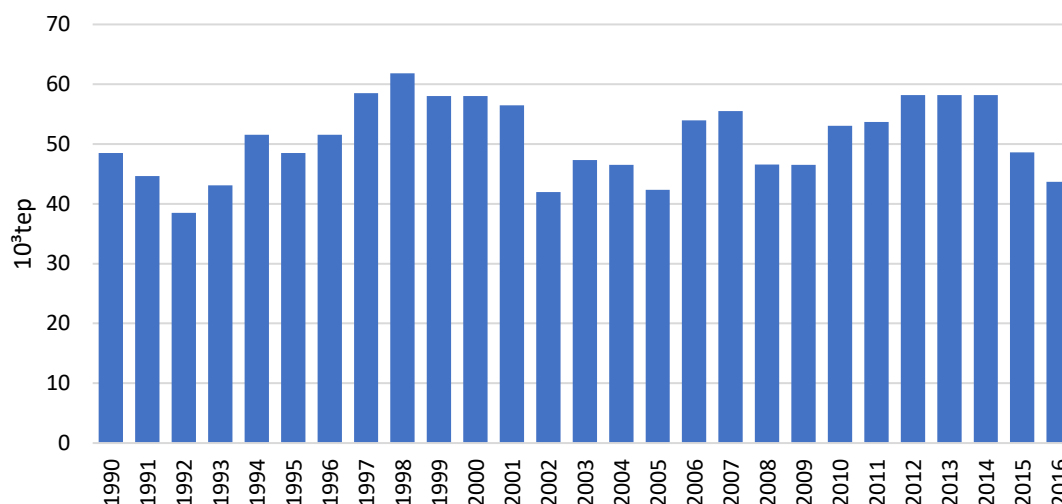
É oportuno salientar que há discrepâncias entre os valores de consumo de combustíveis apresentados no BEN e na modelagem *bottom-up* (*Tier 3a*). Conforme indicado no item 2, essas diferenças ocorrem em função do conceito de *bunker*, que para o BEN se refere aos combustíveis consumidos pelas empresas estrangeiras, enquanto a modelagem *bottom-up* considera os combustíveis consumidos em voos internacionais, independentemente da bandeira da aeronave. Para o Quarto Inventário, a repartição entre emissões domésticas e *bunker* obedeceu ao critério da modelagem *bottom-up* (*Tier 3a*). Todavia, para que todo o consumo de combustível fosse considerado, a diferença de emissões provenientes do total (doméstico e *bunker*) do BEN e da modelagem *bottom-up* foi atribuída à categoria 1A5bi (não especificado, móvel, componente aviação), relatada no Relatório de Referência (Abordagem Setorial), assumindo-se que a modelagem *bottom-up* não computa valores de pequenas aeronaves de trajetos locais (aviões ou helicópteros).

Além disso, ajustes anuais do período 1990-2004 foram realizados por meio do método *overlap*, aplicando fatores de correção no consumo energético observado (BEN). Os fatores de correção foram calculados a partir dos resultados da abordagem *Tier 3a* para o intervalo 2005-2016.

Assim, a metodologia *Tier 1* foi empregada não apenas para calcular as emissões provenientes da queima de QAv (1990-2004) como também da gasolina de aviação (1990-2016).

A Figura 9 ilustra o histórico de consumo energético de gasolina de aviação, considerando a abordagem *Tier 1*.

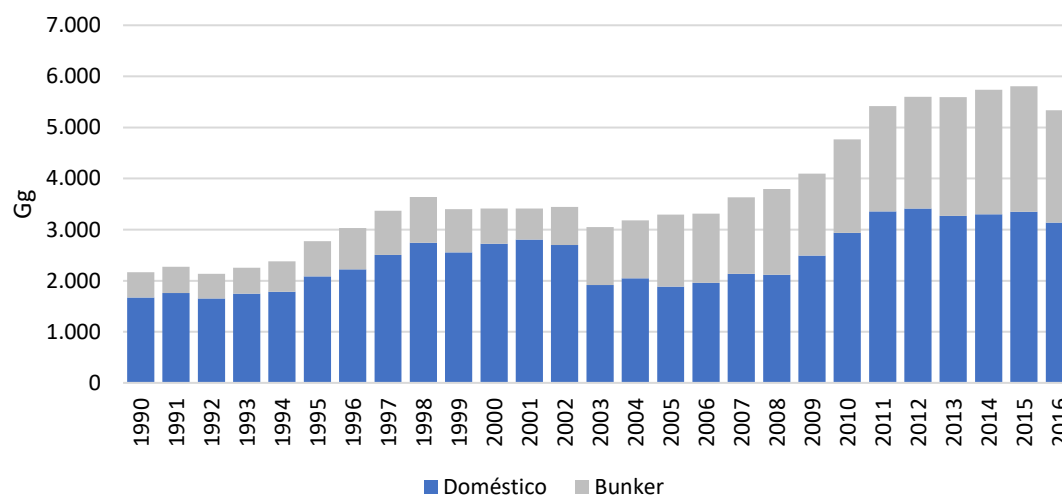
Figura 9. Série histórica do consumo energético de gasolina de aviação



Assim como explicitado na Seção 2, a divisão em voos domésticos e *bunker* não é necessária no caso da gasolina de aviação, visto que a utilização dessa fonte energética é convencionalmente empregada em aeronaves pequenas que operam em rotas domésticas dentro da faixa LTO. Nota-se que o consumo energético dessa fonte reduziu 24% entre 2014 e 2016, sobretudo em função da queda da atividade econômica nacional, impactando os voos regionais.

A Figura 10 ilustra a evolução do consumo de QAv na linha de base, considerando a abordagem *Tier 3a* para o intervalo 2005-2016, além do histórico 1990-2004 ajustado pelo método *overlap*.

Figura 10. Série histórica do consumo energético de querosene de aviação (QAv)

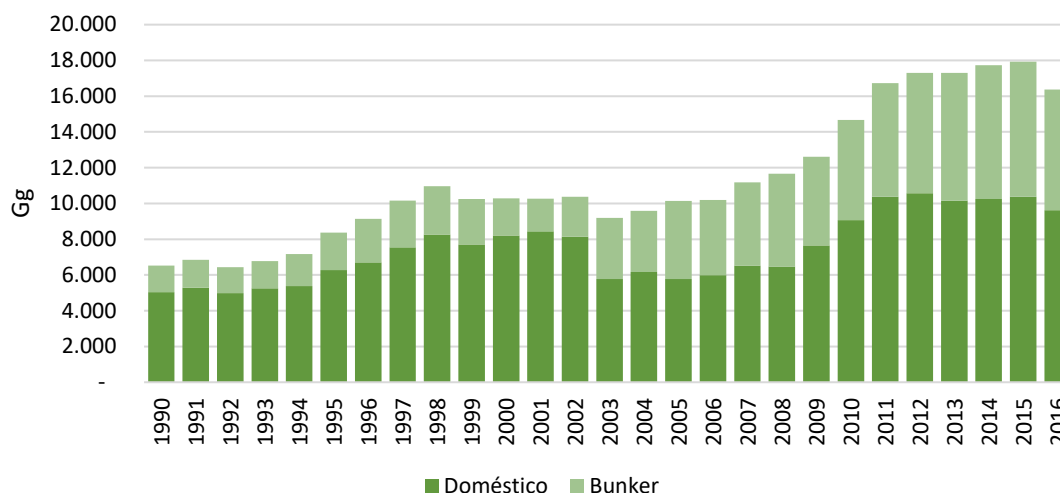


Do mesmo modo da Figura 10, observa-se redução de aproximadamente 10%, tanto no consumo de voos domésticos como no de *bunker* nos anos mais recentes. Em 2016, o consumo é de 3.137 ktep para aviação doméstica e 2.197 ktep para *bunker*.

Destaca-se que o aumento da quantidade de movimentações (voos) é compensado pelo melhoramento da eficiência energética das aeronaves, sobretudo no transporte doméstico.

Como parte dos GEE diretos, a Figura 11 ilustra a evolução das emissões de CO₂. Consideram-se as emissões provenientes da queima de QAV e gasolina de aviação com base nos critérios explicitados no início desta seção. Para as emissões da queima de QAV no intervalo 1990-2004, foram adotados os fatores de emissão implícitos obtidos no ano de 2005 (da abordagem *Tier 3a*).

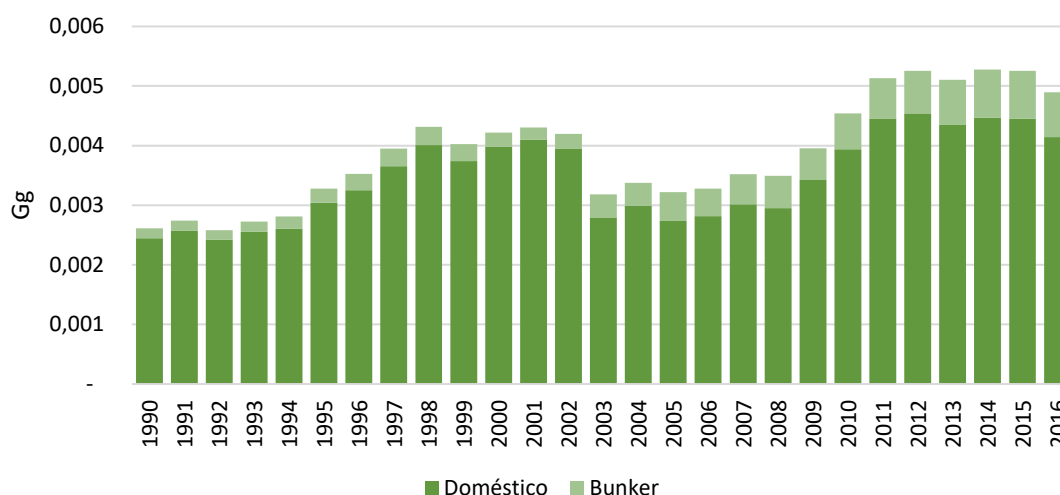
Figura 11. Série histórica das emissões de CO₂



Ao longo da série histórica, as emissões aumentaram 70%, atingindo 16.460 Gg CO₂ em 2016. Nesse ano, 41% das emissões foram oriundas da aviação internacional (6.727 Gg CO₂). No início da série histórica (1990), essa participação era de apenas 23%. Entre 2014 e 2016, o setor experimentou a redução das emissões de 7% em decorrência da queda da atividade econômica do país, impactando sobretudo o transporte de carga.

A Figura 12 mostra o montante emitido de CH₄ da aviação doméstica na linha de base.

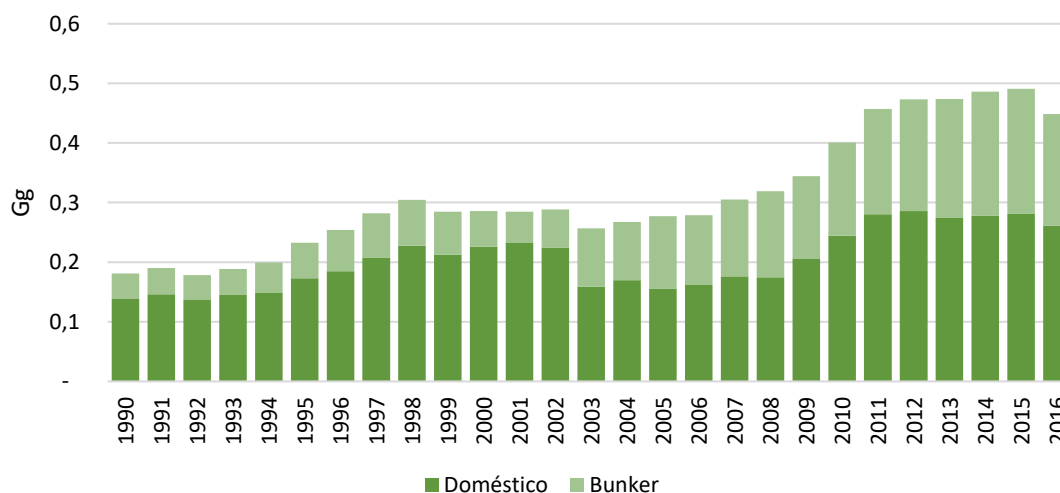
Figura 12. Série histórica das emissões de CH₄



As emissões de CH₄ seguem a tendência do consumo energético de QAv e gasolina de aviação, atingindo, em 2016, 0,01 Gg para aviação doméstica e 0,001 Gg para *bunker*. Ao longo da série a variação é de 60%.

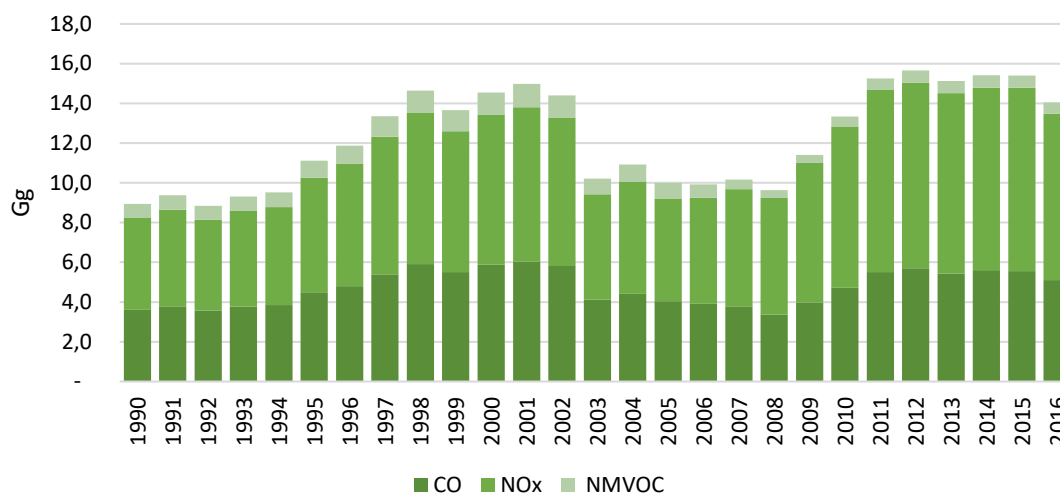
As emissões de N₂O são ilustradas na Figura 13. A aviação doméstica é responsável pela maior fração das emissões, com cerca de 0,26 Gg emitido em 2016, sendo a participação da aviação internacional estimada em 36% das emissões de N₂O.

Figura 13. Série histórica das emissões de N₂O



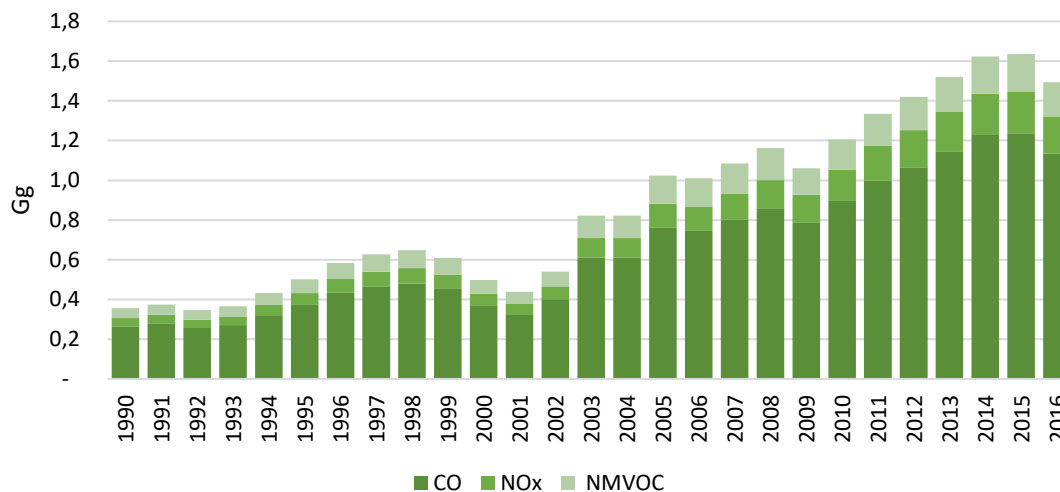
As emissões de GEE indiretos (CO, NMVOC e NO_x) para o transporte doméstico são evidenciadas na Figura 14.

Figura 14. Série histórica das emissões de GEE indiretos para aviação doméstica



As emissões de GEE indiretos seguem o comportamento do consumo energético doméstico (QAv), exposto na Figura 10. Especificamente, as emissões domésticas de CO, NOx e NMVOC atingem, em 2016, 5,1 Gg, 8,3 Gg e 0,57 Gg, respectivamente. Por conseguinte, as emissões da aviação internacional são ilustradas na Figura 15.

Figura 15. Série histórica das emissões de GEE indiretos para aviação internacional



Assim como o consumo energético, há um expressivo crescimento das emissões de GEE indiretos de *bunker*. Em 2016, as emissões de CO, NOx e NMVOC atingem 1,1 Gg, 2 Gg e 0,2 Gg respectivamente. Os resultados tabelados das emissões são expostos no Apêndice B.

4 Diferenças em relação ao Terceiro Inventário

No Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa para o modo aéreo, utilizam-se duas abordagens para estimar as emissões antrópicas de GEE: *bottom-up*, para os anos de 2005 a 2016 (dada a existência de dados); e *top-down*, para os anos de 1990 a 2004.

Salienta-se que no presente Inventário se adotou a abordagem *top-down Tier 1*, considerando os fatores de emissão implícitos obtidos a partir da abordagem *bottom-up (Tier 3a)* conduzidas no estudo inventário da ANAC (2018). Portanto, os aprimoramentos metodológicos aplicados à abordagem desagregada são refletidos na abordagem agregada. Dessa forma, esta seção conduz a análise das diferenças entre o Quarto Inventário e o Terceiro Inventário (BRASIL, 2016), por abordagem metodológica.

Na abordagem *bottom-up*, houve alterações na etapa de coleta de dados, por meio da revisão da série histórica de movimentações (principalmente entre 2011 e 2012), decorrente da nova extração de dados do BIMTRA. Além disso, a fonte de dados de fatores de emissão para o ciclo LTO para motores a jato foi modificada. Os cálculos de emissão foram realizados usando fatores revisados por tecnologia da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) - *Engine Emission Data Bank (EEDB)* (EASA, 2018), que contém informações sobre as emissões de escape dos motores de aeronaves, aferidas de acordo com os procedimentos da OACI. Tais alterações modificam os fatores de emissão implícitos do modo, bem como os resultados de emissão.

Na abordagem *top-down* do Quarto Inventário, a linha de base de uso de energia para aviação doméstica e internacional foi desenvolvida com base nas séries de relatórios do Balanço Energético Nacional (BEN) e planilhas de consumo *bunker* do Ministério de Minas e Energia (MME), ajustadas pelo método *overlap*. Consideraram-se os fatores de emissão implícitos obtidos no ano de 2005 (da abordagem *bottom-up*) para calcular as emissões de 1990 a 2004.

O método *overlap* foi considerado, pois há diferenças entre os valores de consumo de combustíveis apresentados no BEN e na modelagem *bottom-up* (ANAC). Essas diferenças, conforme mencionadas nas Seções 2 e 3, referem-se ao conceito de *bunker*. Para o Quarto Inventário a repartição entre emissões domésticas e *bunker* considerou o consumo de combustíveis em voos internacionais, independentemente da bandeira da aeronave. A diferença entre o total (doméstico e *bunker*) do BEN e da modelagem foi atribuído à categoria 1A5bi (não especificado, móvel, componente aviação).

Nessa linha, o consumo energético considerado no Terceiro Inventário foi estimado para o histórico (1990-2004), a partir dos valores do BEN e de vendas totais de querosene (ANP, 2018). Ademais, os dados históricos da proporção de aviação internacional em relação ao total consumido foram ajustados com base no estimado pela abordagem *bottom-up* para os anos de 2005 a 2007.

No Quarto Inventário, os dados históricos da proporção de aviação internacional foram estimados a partir das séries históricas ANAC (2018). A diferença entre os Inventários é baseada na variável extrapolada pelo método *overlap*. Enquanto o Quarto Inventário extrapolou o consumo energético, considerando o período de 2005 a 2016, o Terceiro Inventário considerou as emissões de CO₂ entre 2005 e 2007. É importante ressaltar que os valores do período de 2005 e 2016 são os mesmos da abordagem *Tier 3a*.

A Tabela 14 resume o consumo de QAv considerado em cada comunicação.

Tabela 14. Evolução da demanda de QAv considerada em cada Inventário (ktep)

Ano	Terceiro Inventário		Quarto Inventário	
	Voos Domésticos	Voos Internacionais	Voos Domésticos	Voos Internacionais
1990	1.366	1.458	1.684	496
1991	1.495	1.051	1.768	521
1992	1.250	1.206	1.666	482
1993	1.354	1.209	1.756	509
1994	1.435	1.182	1.796	601
1995	1.534	1.510	2.096	698
1996	1.456	1.851	2.237	813
1997	1.722	1.975	2.518	873
1998	1.896	2.212	2.761	901
1999	1.953	1.803	2.573	848
2000	2.016	1.545	2.742	694
2001	2.161	1.800	2.822	609
2002	2.183	1.464	2.715	752
2003	1.917	1.348	1.926	1.145
2004	2.023	1.437	2.059	1.145
2005	2.069	1.572	1.884	1.425
2006	2.153	1.518	1.958	1.373
2007	2.371	1.649	2.131	1.517
2008	2.401	1.896	2.116	1.692
2009	2.736	1.726	2.499	1.617
2010	3.205	1.932	2.959	1.834
2011	—	—	3.389	2.073
2012	—	—	3.454	2.198
2013	—	—	3.320	2.329
2014	—	—	3.349	2.444
2015	—	—	3.386	2.467
2016	—	—	3.145	2.201

As Tabelas 15 e 16 apresentam as emissões dos GEE diretos e indiretos estimadas em cada inventário, respectivamente. Ademais, a Figura 16 ilustra a evolução das emissões de CO₂ referente aos voos domésticos para os inventários em questão.

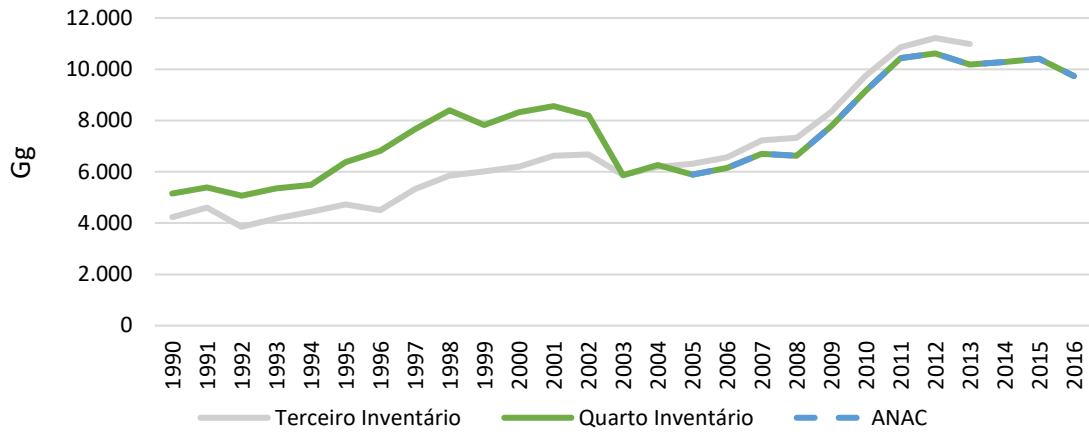
Tabela 15. Emissões de GEE diretos e indiretos - Terceiro Inventário (Gg)

Ano	Voos domésticos						Voos internacionais					
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x	NMVOG	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x	NMVOG
1990	4.232	0,003	0,11	33	4,1	1,4	4.366	0,001	0,1	0,9	1,3	0,2
1991	4.606	0,003	0,13	31	4,6	1,1	3.147	0,000	0,1	0,6	0,9	0,2
1992	3.854	0,003	0,1	26,5	3,7	1,1	3.610	0,000	0,1	0,7	1,0	0,2
1993	4.180	0,003	0,11	29,7	4,1	1,2	3.619	0,000	0,1	0,7	1,1	0,2
1994	4.446	0,003	0,12	35,2	4,4	1,3	3.539	0,000	0,1	0,7	1,0	0,2
1995	4.732	0,003	0,13	33,1	4,6	1,4	4.520	0,001	0,1	0,9	1,3	0,2
1996	4.509	0,003	0,12	34,8	4,3	1,6	5.541	0,001	0,2	1,1	1,6	0,3
1997	5.324	0,004	0,14	39,5	5,1	1,8	5.911	0,001	0,2	1,1	1,7	0,3
1998	5.857	0,004	0,15	42,5	5,6	1,9	6.621	0,001	0,2	1,3	1,9	0,3
1999	6.017	0,004	0,16	39,9	5,8	1,7	5.397	0,001	0,2	1,1	1,6	0,3
2000	6.206	0,004	0,17	40,3	6,1	1,6	4.626	0,001	0,1	0,9	1,4	0,2
2001	6.626	0,004	0,18	38,1	6,4	1,7	5.388	0,001	0,2	1,1	1,6	0,3
2002	6.677	0,004	0,18	34,6	6,5	1,4	4.381	0,001	0,1	0,9	1,3	0,2
2003	5.871	0,004	0,16	32	5,7	1,3	4.035	0,001	0,1	0,8	1,2	0,2
2004	6.193	0,004	0,17	33,2	6	1,4	4.303	0,001	0,1	1,1	1,3	0,2
2005	6.316	0,004	0,17	30,7	6	1,3	4.707	0,001	0,1	1,2	1,4	0,2
2006	6.563	0,004	0,18	29,3	6,2	1,2	4.543	0,001	0,1	1,0	1,4	0,2
2007	7.220	0,004	0,2	30,4	6,9	1	4.936	0,001	0,1	0,9	1,5	0,2
2008	7.325	0,004	0,2	32,8	7	1	5.675	0,001	0,2	1,2	1,7	0,2
2009	8.330	0,005	0,23	34,3	8,1	1	5.167	0,001	0,2	1,0	1,6	0,2
2010	9.751	0,005	0,27	38,4	9,3	1,2	5.784	0,001	0,2	1,1	1,8	0,2

Tabela 16. Emissões de GEE diretos e indiretos - Quarto Inventário (Gg)

Ano	Voos domésticos						Voos internacionais					
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x	NMVOG	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	NO _x	NMVOG
1990	5.151	0,00	0,14	3,59	4,60	0,69	1.475	0,0002	0,04	0,26	0,40	0,05
1991	5.390	0,00	0,15	3,77	4,83	0,73	1.550	0,0002	0,04	0,27	0,42	0,05
1992	5.067	0,00	0,14	3,55	4,55	0,68	1.433	0,0002	0,04	0,25	0,39	0,05
1993	5.351	0,00	0,15	3,74	4,80	0,72	1.514	0,0002	0,04	0,27	0,41	0,05
1994	5.493	0,00	0,15	3,83	4,91	0,74	1.787	0,0002	0,05	0,32	0,49	0,06
1995	6.376	0,00	0,18	4,47	5,73	0,86	2.074	0,0002	0,06	0,37	0,57	0,07
1996	6.807	0,00	0,19	4,77	6,12	0,92	2.418	0,0003	0,07	0,43	0,66	0,08
1997	7.661	0,00	0,21	5,37	6,88	1,03	2.596	0,0003	0,07	0,46	0,71	0,09
1998	8.395	0,01	0,23	5,89	7,55	1,13	2.678	0,0003	0,08	0,47	0,73	0,09
1999	7.825	0,00	0,22	5,49	7,03	1,06	2.522	0,0003	0,07	0,44	0,69	0,08
2000	8.327	0,01	0,23	5,85	7,50	1,13	2.063	0,0002	0,06	0,36	0,56	0,07
2001	8.561	0,01	0,24	6,02	7,71	1,16	1.812	0,0002	0,05	0,32	0,50	0,06
2002	8.201	0,00	0,23	5,79	7,42	1,11	2.237	0,0003	0,06	0,39	0,61	0,07
2003	5.868	0,00	0,16	4,11	5,26	0,79	3.405	0,0004	0,10	0,60	0,93	0,11
2004	6.261	0,00	0,17	4,39	5,63	0,85	3.405	0,0004	0,10	0,60	0,93	0,11
2005	5.889	0,00	0,16	4,04	5,18	0,78	4.323	0,0005	0,12	0,75	1,16	0,14
2006	6.150	0,00	0,17	3,91	5,33	0,68	4.157	0,0004	0,12	0,73	1,11	0,14
2007	6.695	0,00	0,18	3,79	5,90	0,49	4.594	0,0005	0,13	0,78	1,21	0,15
2008	6.621	0,00	0,18	3,38	5,88	0,37	5.129	0,0005	0,14	0,84	1,37	0,16
2009	7.769	0,00	0,21	3,97	7,01	0,39	4.915	0,0005	0,14	0,77	1,39	0,13
2010	9.157	0,01	0,25	4,70	8,08	0,49	5.585	0,0006	0,16	0,88	1,59	0,15
2011	10.434	0,01	0,28	5,47	9,10	0,57	6.314	0,0007	0,18	0,98	1,80	0,16
2012	10.616	0,01	0,29	5,64	9,26	0,59	6.698	0,0007	0,19	1,05	1,94	0,16
2013	10.187	0,01	0,28	5,36	8,99	0,58	7.110	0,0008	0,20	1,14	2,07	0,17
2014	10.281	0,01	0,28	5,52	9,09	0,61	7.457	0,0008	0,21	1,22	2,16	0,19
2015	10.407	0,01	0,28	5,50	9,17	0,60	7.518	0,0008	0,21	1,22	2,15	0,19
2016	9.733	0,01	0,26	5,10	8,36	0,57	6.727	0,0007	0,19	1,13	1,96	0,17

Figura 16. Comparação entre a ANAC e Inventários - Emissões de CO₂ dos voos domésticos.



5 Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Assessoria Internacional. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil 2018**. Ano-base 2017, volume único. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Superintendência de Relações Internacionais. Gerência Técnica de Análise Ambiental. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil 2014**. Ano-base 2013. 2014. 78 p.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIODIESEL (ANP). **Dados Estatísticos Mensais**. 2018. Disponível em: www.anp.gov.br/images/DADOS_ESTADISTICOS/importacao_exportacao/Importacoes_Exportacoes_m3.xlsx. Acesso em: 12 dez. 2018.

AIRPORT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM (ACRP). **Report 64: Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APUs and Alternative Systems**, Transportation Research Board. Washington, 2012. 86 p.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Volume II. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016.

CLIMATE POLICY WATCHER. **Choice of method: Emission Factors**. Climate Policy Watcher. out. 2017. Disponível em: www.climate-policy-watcher.org/emission-factors/choice-of-method-1go.html. Acesso em: 15 dez. 2018.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). **BIMTRA - Banco Informações do Movimento de Tráfego Aéreo, 2005-2017**. acessível à ANAC por meio do Termo de Cooperação Específico nº 002/DECEA-ANAC/2008. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional**. Ano-base 2018. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2019.

EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA). **ICAO Emissions Databank**. Updated nov. 2017. 2018. Disponível em: www.easa.europa.eu/easa-and-you/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank. Acesso em: 17 dez. 2018.

EUROPEAN MONITORING AND EVALUATION PROGRAMME/EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EMEP/EEA). **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2013**. Technical guidance to prepare national emission inventories. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. Disponível em: www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013. Acesso em: 15 dez. 2018.

EUROPEAN MONITORING AND EVALUATION PROGRAMME/EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY (EMEP/EEA). **EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016**. Update jul. 2017. Disponível em: www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-2016/view. Acesso em: 15 dez. 2018.

FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION & US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (FAA & EPA). **Recommended Best Practice for Quantifying Speciated Organic Gas Emissions from Aircraft Equipped with Turbofan, Turbojet and Turboprop Engines**. 2009. 19 p.

GONÇALVES, D. N. S.; D'AGOSTO, M. A. **Future prospective scenarios for the use of energy in transportation in Brazil and GHG emissions, Business as Usual (BAU)**. Scenario - 2050, Final Report. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Transporte Sustentável (IBTS), 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Volume 2 Energy, Chapter 3 Mobile Combustion. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.

ORGANIZAÇÃO DA AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL (OACI). **Doc 9889 Airport Air Quality Manual**. 1st. ed. 2011. 200 p.

SWEDISH DEFENSE RESEARCH AGENCY (FOI). **Base de dados de emissões de motores turbo-hélice**. Comunicação Pessoal. 2013.

Apêndice A - Detalhamento metodológico

A.1. Consumo energético para aviação doméstica e *bunker*

Consumo energético de gasolina de aviação e QAV em 10³ tep

Ano	Gasolina de aviação	Querosene de Aviação Doméstica	Querosene - <i>Bunker</i>
1990	48	1.673	493
1991	45	1.757	518
1992	38	1.655	479
1993	43	1.745	506
1994	52	1.784	597
1995	48	2.082	693
1996	52	2.223	808
1997	58	2.502	867
1998	62	2.744	895
1999	58	2.557	843
2000	58	2.725	689
2001	56	2.805	605
2002	42	2.698	747
2003	47	1.914	1.137
2004	47	2.046	1.137
2005	42	1.883	1.412
2006	54	1.957	1.358
2007	56	2.133	1.500
2008	47	2.118	1.675
2009	47	2.493	1.605
2010	53	2.940	1.824
2011	54	3.356	2.062
2012	58	3.411	2.188
2013	58	3.272	2.322
2014	58	3.302	2.435
2015	49	3.352	2.455
2016	44	3.137	2.197

Apêndice B - Resultados

Emissões de GEE para aviação doméstica e *bunker* (em Gg)⁴

Ano	Gasolina de Aviação			QAv - Doméstico						QAv— <i>Bunker</i>					
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	Nox	NMVOG	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO	Nox	NMVOG
1990	142	0,001	0,004	5.009	0,002	0,1	3,6	4,6	0,7	1.475	0,0002	0,0	0,3	0,4	0,0
1991	131	0,001	0,004	5.259	0,003	0,1	3,8	4,8	0,7	1.550	0,0002	0,0	0,3	0,4	0,1
1992	113	0,001	0,003	4.955	0,002	0,1	3,6	4,6	0,7	1.433	0,0002	0,0	0,3	0,4	0,0
1993	126	0,001	0,004	5.224	0,003	0,1	3,7	4,8	0,7	1.514	0,0002	0,0	0,3	0,4	0,0
1994	151	0,001	0,004	5.342	0,003	0,1	3,8	4,9	0,7	1.787	0,0002	0,1	0,3	0,5	0,1
1995	142	0,001	0,004	6.234	0,003	0,2	4,5	5,7	0,9	2.074	0,0002	0,1	0,4	0,6	0,1
1996	151	0,001	0,004	6.656	0,003	0,2	4,8	6,1	0,9	2.418	0,0003	0,1	0,4	0,7	0,1
1997	171	0,001	0,005	7.489	0,004	0,2	5,4	6,9	1,0	2.596	0,0003	0,1	0,5	0,7	0,1
1998	181	0,001	0,005	8.214	0,004	0,2	5,9	7,5	1,1	2.678	0,0003	0,1	0,5	0,7	0,1
1999	170	0,001	0,005	7.655	0,004	0,2	5,5	7,0	1,1	2.522	0,0003	0,1	0,4	0,7	0,1
2000	170	0,001	0,005	8.157	0,004	0,2	5,8	7,5	1,1	2.063	0,0002	0,1	0,4	0,6	0,1
2001	166	0,001	0,005	8.395	0,004	0,2	6,0	7,7	1,2	1.812	0,0002	0,1	0,3	0,5	0,1
2002	123	0,001	0,004	8.078	0,004	0,2	5,8	7,4	1,1	2.237	0,0003	0,1	0,4	0,6	0,1
2003	139	0,001	0,004	5.729	0,003	0,2	4,1	5,3	0,8	3.405	0,0004	0,1	0,6	0,9	0,1
2004	136	0,001	0,004	6.124	0,003	0,2	4,4	5,6	0,8	3.405	0,0004	0,1	0,6	0,9	0,1
2005	124	0,001	0,004	5.764	0,003	0,2	4,0	5,2	0,8	4.323	0,0005	0,1	0,7	1,2	0,1
2006	158	0,001	0,005	5.992	0,003	0,2	3,9	5,3	0,7	4.157	0,0004	0,1	0,7	1,1	0,1
2007	163	0,001	0,005	6.532	0,003	0,2	3,8	5,9	0,5	4.594	0,0005	0,1	0,8	1,2	0,1
2008	136	0,001	0,004	6.484	0,003	0,2	3,4	5,9	0,4	5.129	0,0005	0,1	0,8	1,4	0,2
2009	136	0,001	0,004	7.633	0,003	0,2	4,0	7,0	0,4	4.915	0,0005	0,1	0,8	1,4	0,1
2010	156	0,001	0,004	9.002	0,004	0,2	4,7	8,1	0,5	5.585	0,0006	0,2	0,9	1,6	0,1
2011	157	0,001	0,004	10.277	0,004	0,3	5,5	9,1	0,6	6.314	0,0007	0,2	1,0	1,8	0,2
2012	171	0,001	0,005	10.445	0,005	0,3	5,6	9,3	0,6	6.698	0,0007	0,2	1,1	1,9	0,2
2013	171	0,001	0,005	10.017	0,004	0,3	5,4	9,0	0,6	7.110	0,0008	0,2	1,1	2,1	0,2
2014	170	0,001	0,005	10.111	0,004	0,3	5,5	9,1	0,6	7.457	0,0008	0,2	1,2	2,2	0,2
2015	143	0,001	0,004	10.265	0,004	0,3	5,5	9,2	0,6	7.518	0,0008	0,2	1,2	2,1	0,2
2016	128	0,001	0,004	9.605	0,004	0,3	5,1	8,4	0,6	6.727	0,0007	0,2	1,1	2,0	0,2

⁴ Para as emissões da queima de QAv no intervalo 1990-2004, foram adotados os fatores de emissão implícitos obtidos no ano de 2005 (da abordagem *Tier 3a*)