



METODOLOGIA DE CÁLCULO INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

1ª EDIÇÃO | AGOSTO DE 2019

SUMÁRIO

1 Introdução.....	3
2 Escopo do inventário.....	3
2.1 Gases e poluentes inventariados	4
2.2 Abrangência espacial e temporal.....	5
3 Metodologia	6
3.1 Método <i>Tier 1</i>	6
3.1.1 Emissões de CO ₂	6
3.1.2 Emissões de CH ₄ e N ₂ O.....	7
3.2 Método <i>Tier 3</i>	7
3.2.1 Cálculo de emissões no Ciclo LTO	7
3.2.2 Cálculo de emissões em Cruzeiro	8
3.2.3 Cálculo de emissões por Unidade Auxiliar de Potência (APU)	9
3.2.4 Sistematização dos procedimentos para estimar emissões	10
4 Dados de atividade	11
4.1 Movimentos das aeronaves	11
4.2 Regimes e Tempos de Operação.....	11
4.2.1 Ciclo LTO	11
4.2.2 Unidade Auxiliar de Potência (APU).....	14
4.3 Estimativa de distâncias de voos.....	16
4.3.1 Algoritmo de cálculo de distância direta	16
4.3.2 Estimativa da distância efetiva de voo	16
4.4 Consumo de combustível	18
5 Fatores de Emissão.....	19
5.1 Metodologia <i>Tier 1</i>	19
5.2 Metodologia <i>Tier 3A</i>	20
5.2.1 Ciclo LTO	20
5.2.2 Cruzeiro	23
5.2.3 Unidade Auxiliar de Potência (APU).....	24
5.2.4 Fatores de emissão dependentes das propriedades do combustível	25
5.2.5 Estimativas das emissões de compostos orgânicos voláteis (COV)	27

1 Introdução

Neste documento é apresentada a metodologia de cálculo do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil. Os dados resultantes destes cálculos subsidiam a elaboração do documento consolidado e são disponibilizados também para consulta interativa.

A consulta interativa aos dados do inventário de emissões, disponível no sítio eletrônico da ANAC, é uma ferramenta que pretende trazer de forma mais dinâmica e adaptável os dados constantes no documento consolidado. Por meio dessa forma de apresentação, o usuário tem acesso aos dados de emissões e combustível com a possibilidade de customizar a forma de apresentação.

A finalidade deste documento é refletir a versão mais atual da metodologia empregada nos cálculos do inventário. Além disso, também pretende-se descrever e justificar as eventuais mudanças metodológicas ocorridas, seja devido à disponibilidade de dados mais atuais ou a melhorias nas formas de cálculo.

2 Escopo do inventário

A Tabela 1 apresenta o quadro resumo do escopo do Inventário.

Tabela 1: Escopo do Inventário

O que é abordado pelo inventário:	Emissões das aeronaves da aviação civil comercial e privada, tanto em voos regulares (domésticos e internacionais com origem no Brasil) quanto voos da aviação geral ocorridos no território nacional. <ul style="list-style-type: none"> • Emissões originadas por uso de equipamentos de rampa e outras atividades de solo; • Emissões de helicópteros; • Aviação militar; • Emissões de aeronaves movidas por etanol; • Emissões de aeronaves movidas por gasolina de aviação (estimativa realizada apenas na metodologia Tier 1 – <i>top-down</i>).
O que não é abordado pelo inventário:	
Qual a metodologia utilizada:	A metodologia de cálculo utilizada é aquela descrita pelo IPCC ^[1] no documento 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories ^[2] . <p>Nesta metodologia, cada etapa de voo deve ser classificada como doméstica ou internacional de acordo com as suas informações de origem-destino, não importando o local de embarque ou desembarque de passageiros ou carga, nem a nacionalidade da empresa aérea (seja esta nacional ou estrangeira). Assim, as movimentações com origem e destino situados em um mesmo país são classificadas como voos domésticos, enquanto que as movimentações com origem em um país e destino em outro país são consideradas como voos internacionais.</p> <p>O grau de refinamento da metodologia <i>bottom-up</i> permite a apresentação de emissões individuais para cada aeródromo, modelo de aeronaves, fase de voo, pelo uso de APU^[3] e por tipo de movimentação, doméstica ou internacional.</p>

¹ IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas).

² IPCC, 2006. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2 Energy. Chapter 3 Mobile Combustion. 78p.

³ APU – Auxiliary Power Unit (Unidade Auxiliar de Potência).

As emissões resultantes das operações de helicópteros não são contabilizadas neste inventário devido à indisponibilidade dos fatores de emissão para os motores a turbina turbo-eixo (*turboshaft*), tipicamente utilizados nesse tipo de aeronave.

Analogamente, não há modelagem do espectro de emissões de motores a etanol, tipicamente utilizados em aeronaves de aplicações agrícolas, para que se possam inferir os fatores de emissão desse combustível. Mesmo em uma abordagem *top-down*, a modelagem do espectro de emissões de motores a etanol é impossibilitada visto que o consumo de etanol no transporte aéreo não é reportado pelo Balanço Energético Nacional (BEN)⁽⁴⁾.

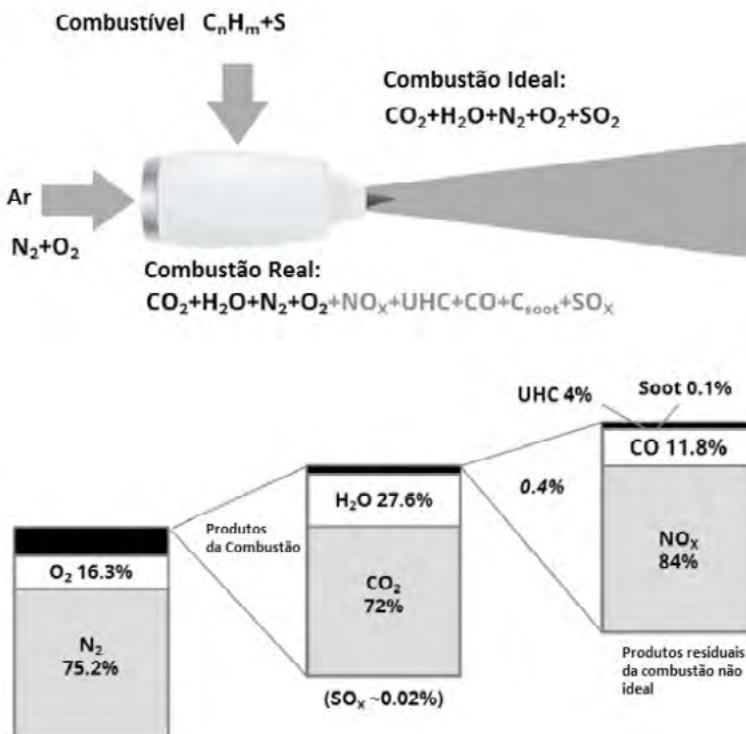
Em situação similar, também se encontram as aeronaves movidas a AvGas (i.e., gasolina de aviação). Pela sua pequena contribuição no consumo de combustível na aviação nacional (inferior a 1%) e pela indisponibilidade dos fatores de emissão para os motores a pistão, optou-se pelo uso de uma abordagem *top-down* para a estimativa de emissões geradas pelo consumo desse combustível.

2.1 Gases e poluentes inventariados

A Organização Internacional da Aviação Civil (OACI) recomenda que alguns resíduos da combustão emitidos pelo transporte aéreo devem ter suas emissões controladas e são exatamente essas emissões que fazem parte do escopo do inventário. Na Figura 1, o processo de combustão interna nos motores aeronáuticos é ilustrado, além da caracterização das emissões.

Figura 1: Desenho esquemático da combustão ideal e combustão real.

Fonte: Adaptado de IPCC (1999).



Na Tabela 2 estão resumidos os gases e poluentes inventariados.

Tabela 2: Gases e poluentes inventariados.

Monóxido de Carbono (CO):	Resulta da combustão incompleta do carbono (C) contida no combustível.
Dióxido de Enxofre (SO_2):	Resultado da combustão do enxofre (S) presente no combustível utilizado.
Óxidos de Nitrogênio (NO_x):	Grupo de gases altamente reativos, compostos por nitrogênio (N) e oxigênio em quantidades variadas. São formados pela reação de oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2) presentes no ar sob condições de alta temperatura e elevada pressão. Juntamente com os compostos orgânicos voláteis (COV), são precursores da formação de ozônio (O_3) no nível troposférico.
Material Particulado (MP):	São partículas de material sólido ou líquido que podem conter uma variedade de componentes químicos. São classificados de acordo com seu tamanho, sendo que, segundo o <i>Emission Inventory Guidebook</i> (EMEP/EEA, 2016) ^[5] , grande parte do MP emitido pelas aeronaves tem diâmetro menor do que 2,5 μm , sendo referido como MP _{2,5} .
Óxido Nitroso (N_2O):	Outro produto da reação entre o oxigênio (O_2) e o nitrogênio (N_2) presentes no ar, apesar de ser um óxido de nitrogênio, não faz parte do grupo denominado NO _x , devido a sua composição química. Em conjunto com o dióxido de carbono e o metano, o óxido nitroso é mais um expressivo gás de efeito estufa.
Metano (CH_4):	O processo de combustão pode levar também à geração de CH ₄ , o mais simples dos hidrocarbonetos. É também considerado um expressivo gás de efeito estufa.
Compostos Orgânicos Voláteis (COV):	A queima incompleta do combustível no motor também gera emissões de COV. São substâncias precursoras da formação de ozônio (O_3) no nível troposférico.
Dióxido de Carbono (CO_2):	Produto da oxidação completa do carbono (C) presente no combustível durante sua queima. Considerado um gás de efeito estufa expressivo.

2.2 Abrangência espacial e temporal

No inventário são estimadas as emissões anuais sob duas abordagens: uma com vistas à gestão da qualidade local do ar e outra com vistas à contabilização de emissões de gases causadores do efeito estufa:

- Gases e partículas com possível impacto na qualidade local do ar (i.e., poluentes locais) - CO, COV, NO_x, SO₂ e MP:** contabilizados nos poucos e decolagens ocorridos nos aeródromos de todo o território nacional e para as fases de voo efetuadas sob territórios com altura inferior a 3.000 pés (i.e., 914,4 metros), incluindo tanto as movimentações domésticas quanto aquelas internacionais. Para essas emissões, as estimativas foram realizadas utilizando-se a metodologia Tier 3A recomendada pelo IPCC;
- Gases de efeito estufa direto - CO₂, CH₄, N₂O:** contabilizadas as emissões de todos os voos cujo aeródromo de origem se encontram em território nacional, sejam estes de movimentação doméstica ou internacional, considerando todas as fases de voo. Além das estimativas realizadas a partir da metodologia Tier 3A, foram estimadas também as emissões de gases de efeito estufa direto com o uso da metodologia Tier 1. Para associar essas emissões a uma metodologia capaz de contemplar os impactos desses três gases no balanço energético do planeta, optou-se pela métrica GWP-100 para sintetizar as emissões em uma medida denominada CO₂ equivalente (CO₂e). A conversão dos GEEs em CO₂e é feita conforme os valores apresentados na Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das

⁵ EMEP/EEA 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016, disponível em <https://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>

Nações Unidas sobre Mudança do Clima – CQNUMC. Os fatores GWP são 1 para o CO₂, 28 para o CH₄ e 265 para o N₂O. O inventário também apresenta as estimativas de gases de efeito estufa indireto – CO, COV e NO_x.

3 Metodologia

O IPCC, por meio de diretrizes (*Guidelines*), recomenda metodologias de cálculo para a elaboração de inventários de emissões, especificados por seguintes temas: energia, processos industriais, consumo de produtos, agricultura, florestas e outros usos do solo, resíduos e outros.

Tais diretrizes definem *Tiers*, que são níveis de refinamento do mapeamento de emissões: quanto maior o *Tier*, mais refinada é a metodologia e uma maior precisão de resultados é assegurada. Consequentemente, maiores também serão a complexidade dos cálculos e a quantidade e nível de detalhamento das informações de entrada requeridas. Os *Tiers* definidos para a aviação civil na última diretriz do IPCC (2006) e utilizados nesse inventário são explicados a seguir.

3.1 Método *Tier 1*

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 onde não há informações disponíveis sobre as operações aéreas individuais, mas apenas em dados consolidados de consumo de combustível.

No inventário, foram realizadas estimativas conforme o método *Tier 1* no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa (GEE) diretos: CO₂, CH₄ e N₂O.

3.1.1 Emissões de CO₂

No método *Tier 1*, as emissões de CO₂ são calculadas a partir da seguinte equação:

$$E_{CO_2} = Cons \times \rho_{energia} \times Fe_c \times \%Oxi \times \frac{44}{12}, \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo:

E_{CO₂}	Emissão anual de CO ₂ (tCO ₂ /ano),
Cons	Consumo doméstico ou internacional de combustível (m ³ /ano),
ρ_{energia}	Densidade energética do combustível (tep/m ³),
Fe_c	Fator de emissão de carbono elementar por unidade de energia contida no combustível (tC/TJ) ⁽⁶⁾ ,
%Oxi	Fração do carbono elementar oxidado na combustão e
$\frac{44}{12}$	Razão entre as massas molares do CO ₂ e do carbono elementar (gCO ₂ /gC).

⁶ Uma vez que a densidade energética é dada em tep/m³ e o fator de emissão em tC/TJ é preciso utilizar a equivalência 1 tep = 0,041868 TJ para adequar as unidades utilizadas.

3.1.2 Emissões de CH₄ e N₂O

As emissões dos outros gases de efeito estufa foram estimadas a partir dos fatores de emissão por unidade de energia contida no combustível, tanto para o metano quanto para o óxido nitroso, a equação utilizada foi:

$$E_i = Cons \times \rho_{energia} \times Fe_i$$

(Equação 2)

Sendo:

E_i	Emissão anual do gás <i>i</i> [t gás/ano]
Cons	Consumo doméstico ou internacional de combustível [m ³ /ano]
ρ_{energia}	Densidade energética do combustível [tep/m ³]
Fe_i	Fator de emissão do gás <i>i</i> por unidade de energia contida no combustível [t gás/TJ]

3.2 Método Tier 3

O método *Tier 3* é baseado em informações mais detalhadas de cada voo, como os aeródromos de origem e destino e o modelo da aeronave. As emissões são calculadas separadamente para cada uma das fases de voo, como apresentado a seguir.

3.2.1 Cálculo de emissões no Ciclo LTO

O ciclo LTO (i.e., *Landing and Take-off*) contempla todas as etapas de voo próximas ao aeródromo realizadas pelas aeronaves em altitudes inferiores a 914,4 metros (3000 pés). Como demonstrado na Figura 2, o ciclo LTO é composto por 6 fases de voo:

1. Partida

- a. Taxi de partida (*Taxi-out*)
- b. Decolagem (*Take-off*)
- c. Início da subida para cruzeiro (*Climb-out*)

2. Chegada

- a. Aproximação final (*Final approach*)
- b. Toque e corrida de desaceleração (*Landing*)
- c. Taxi de chegada (*Taxi-in*).

As emissões por fase de voo do ciclo LTO são calculadas a partir do combustível consumido em cada uma delas. Por sua vez, o consumo de combustível em cada fase é função do modelo e do número de motores da aeronave. O fluxo de combustível, calculado em função do regime de potência dos motores nas fases de voo, também são dados de entrada. Por fim, contabiliza-se no cálculo o tempo de duração de cada fase de voo, resultando nas Equações 3 e 4 descritas abaixo:

$$C_{a,f,p} = nM_a \times Fc_{a,f} \times t_{a,f,p},$$

(Equação 3)

$$E_{g,a,f,p} = Fe_{g,a,f} \times C_{a,f,p},$$

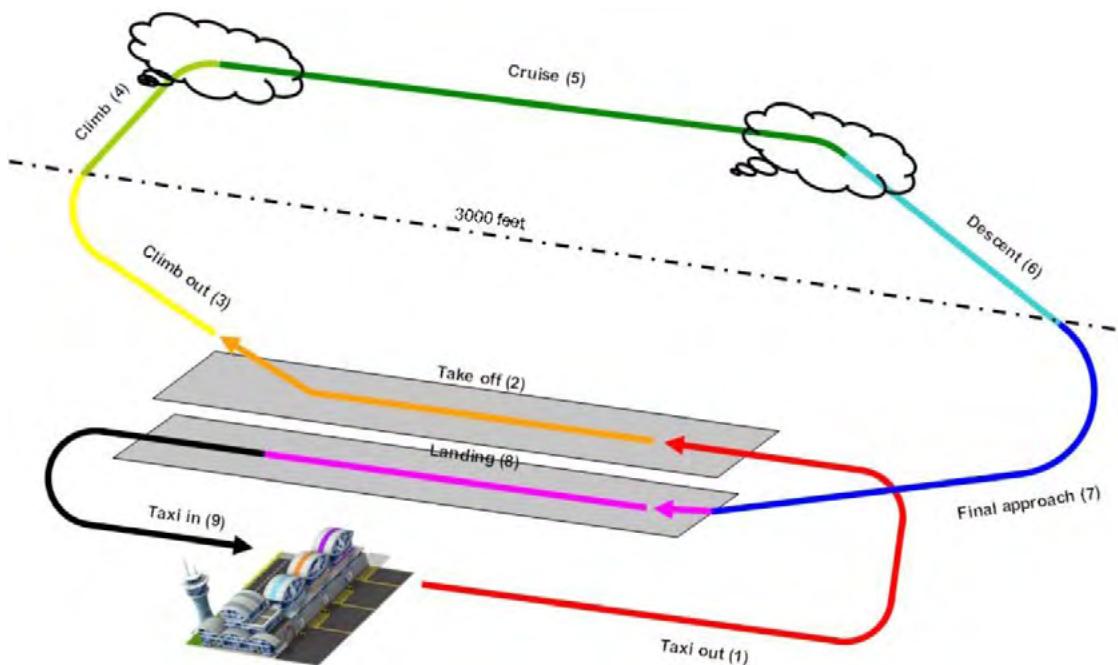
(Equação 4)

Sendo:

C	Consumo de combustível da aeronave a , expresso em kg, para cada fase de voo f no aeródromo p ,
nM	Número de motores da aeronave a ,
Fc	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 e
Fe	Fator de emissão do gás g , em $\text{kg}_{\text{gás}}/\text{kg}_{\text{combustível}}$, da aeronave a na fase f .

Figura 2: Divisão das fases de voo.

Fonte: EMEP/EEA (2016).



3.2.2 Cálculo de emissões em Cruzeiro

A fase de voo Cruzeiro 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 cruzeiro aplica-se a metodologia Tier 3A ou Tier 3B. A última necessita de informações contínuas de toda a trajetória do voo e de programas avançados de modelagem enquanto a primeira depende apenas das informações do modelo da aeronave e dos aeródromos de origem e destino.

O presente Inventário é baseado na metodologia Tier 3A, descrita com maiores detalhes no guia da EMEP/EEA de 2016. 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. Os resultados tabelados levam em consideração o perfil dos voos, como a altitude de cruzeiro que varia de acordo com a distância de voo e que interfere nos tempos de cada fase de voo em cruzeiro (*Climb*, *Cruise* e *Descent*). Para cada distância de voo, a massa de combustível consumido ou massa de gases emitidos é calculada por meios de uma interpolação linear na tabela de acordo com a Equação 5.

$$M_{a,d,g} = Y_{1a,g} + (Y_{2a,g} - Y_{1a,g}) \times \frac{(d-X_1)}{(X_2-X_1)}, \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo:

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,
X₁	Distância tabelada imediatamente inferior à distância d,
X₂	Distância tabelada imediatamente superior à distância d,
Y₁	Massa de combustível consumida ou massa do gás g emitida tabelada para a aeronave a para a distância X ₁ ,
Y₂	Massa de combustível consumida ou massa do gás g emitida tabelada para a aeronave a para a distância X ₂ ,

3.2.3 Cálculo de emissões por Unidade Auxiliar de Potência (APU)

De forma geral, as aeronaves destinadas ao transporte regular 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.

A APU é, em geral, 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. No APU, as emissões aqui estimadas também são provenientes da combustão do querosene de aviação em uma turbina a gás. Logo, as emissões resultantes da utilização da APU são as mesmas geradas na queima de combustível nos motores principais da aeronave.

Diferentemente dos motores principais, as APU não são certificadas e, uma vez que seus fabricantes consideram os dados de emissão como sua propriedade, esses não são divulgados amplamente.

A metodologia de cálculo apresentada no *Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APU and Alternative Systems*⁷ foi utilizada neste inventário como base para a elaboração das estimativas apresentadas de consumo de combustível e de emissões das APU.

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. Calculado esse consumo, são estimadas as emissões a partir de fatores de emissão específicos para cada gás ou poluente.

⁷ ACRP, 2012. AIRPORT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM (ACRP): Report 64 – Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APU and Alternative Systems, Transportation Research Board, Washington, D.C. 86p.

Essas estimativas são efetuadas de acordo com as Equações 6 e 7:

$$C_{a,f} = F_{ca,f} \times t_{a,f,o}, \quad (\text{Equação 6})$$

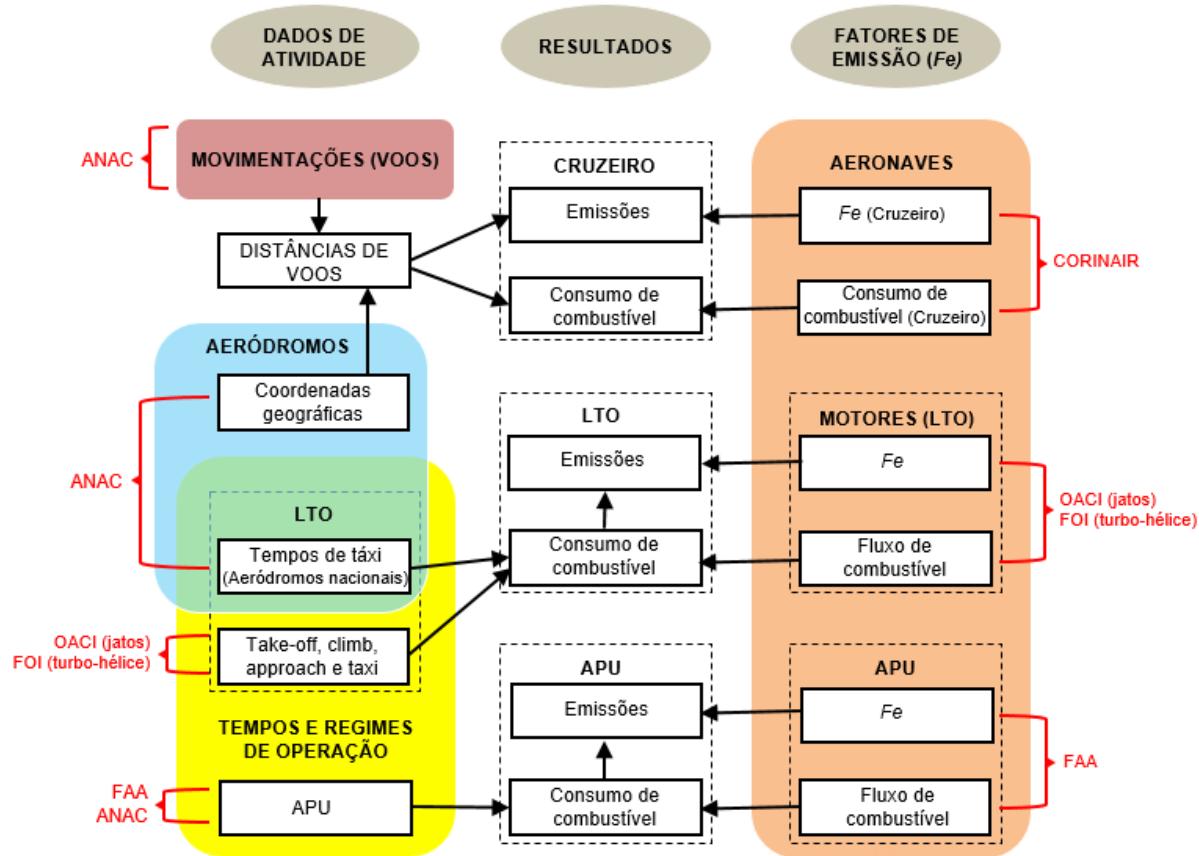
$$E_{g,a,f} = F_{eg,a,f} \times C_{a,f}, \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo:

C	Consumo de combustível da APU na aeronave <i>a</i> , na fase de uso <i>f</i> ;
F_c	Fluxo de combustível, em kg/s, de cada APU na aeronave <i>a</i> , na fase de uso <i>f</i> ;
t	Tempo, em segundos, que a unidade APU é usada na aeronave <i>a</i> , na fase de uso <i>f</i> e pelo operador aéreo <i>o</i> ;
E	Emissão, expressa em kg, do gás <i>g</i> pela aeronave <i>a</i> na fase de uso <i>f</i> e
F_e	Fator de emissão do gás <i>g</i> , em kg _{gás} /kg _{combustível} , da aeronave <i>a</i> na fase de uso <i>f</i> .

3.2.4 Sistematização dos procedimentos para estimar emissões

A Figura 2 ilustra a sequência lógica de procedimentos utilizados nas estimativas das emissões conforme o método Tier 3A. Além disso, cada dado de entrada para a realização das estimativas está acompanhado de sua fonte de informação.



4 Dados de atividade

4.1 Movimentos das aeronaves

Os dados de movimentação das aeronaves são obtidos do 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).

Com estes dados é confeccionada uma base de dados contendo o número de voos anuais segundo:

- Ano de ocorrência das movimentações;
- Código OACI da aeronave;
- Código OACI dos aeródromos de origem e destino;
- Classificação do voo (doméstico ou internacional);
- Companhia aérea/operador do voo e
- Origem da companhia aérea (nacional ou estrangeira).

4.2 Regimes e Tempos de Operação

4.2.1 Ciclo LTO

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

A OACI e a FOI^[8] sugerem tempos médios para cada etapa do ciclo LTO para aeronaves a jato e turboélice, respectivamente. Como um 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.

Na Tabela 3 são apresentadas as informações para cada fase de voo:

Tabela 3: Tempos e regimes de potências por fase LTO.

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

Contudo, os tempos de taxi dependem das características dos aeroportos divergindo significativamente dos valores sugeridos pela OACI. Dessa maneira, para cada aeródromo são atribuídos tempos de *taxi-in* e *taxi-out* médios cujos valores variam de acordo com o período considerado. Para os anos de 2005 a 2013, mantiveram-se os valores da edição publicada em 2014 do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil⁹. A partir de 2014, os aeródromos tiveram seus tempos determinados de acordo com a disponibilidade de dados e sua classificação, se público ou privado.

Assim, para os aeroportos com presença de operadores de aviação regular foram calculados os tempos de taxi a partir de informações presentes no Sistema de Registro de Voo que registra, entre muitas outras informações, os dados informados pelos operadores de aviação regular sobre o horário de calço, descalço, decolagem e pouso de cada movimento em cada aeroporto. Considera-se que o intervalo de tempo entre o descalço da aeronave e a decolagem equivale ao tempo de *taxi-out* e que o tempo compreendido entre o pouso e o calço é igual ao tempo de *taxi-in*. Com base nessas informações, obteve-se a média dos tempos de *taxi-in* e *taxi-out* das operações regulares para cada aeródromo, para os anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. Esses tempos foram considerados como representativos do tempo real de operação em cada aeródromo e foram aplicados nos cálculos de emissões. Devido à ausência de dados no Registro de Voo para o ano de 2014, os tempos de taxi do ano de 2015 foram considerados representativos para o ano anterior. A Tabela 4 apresenta uma amostra dos valores utilizados para vinte dos mais movimentados aeroportos nacionais:

⁹ ANAC, 2014. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil 2014. 74p.

Tabela 4: Tempo médio de taxi por aeródromo.

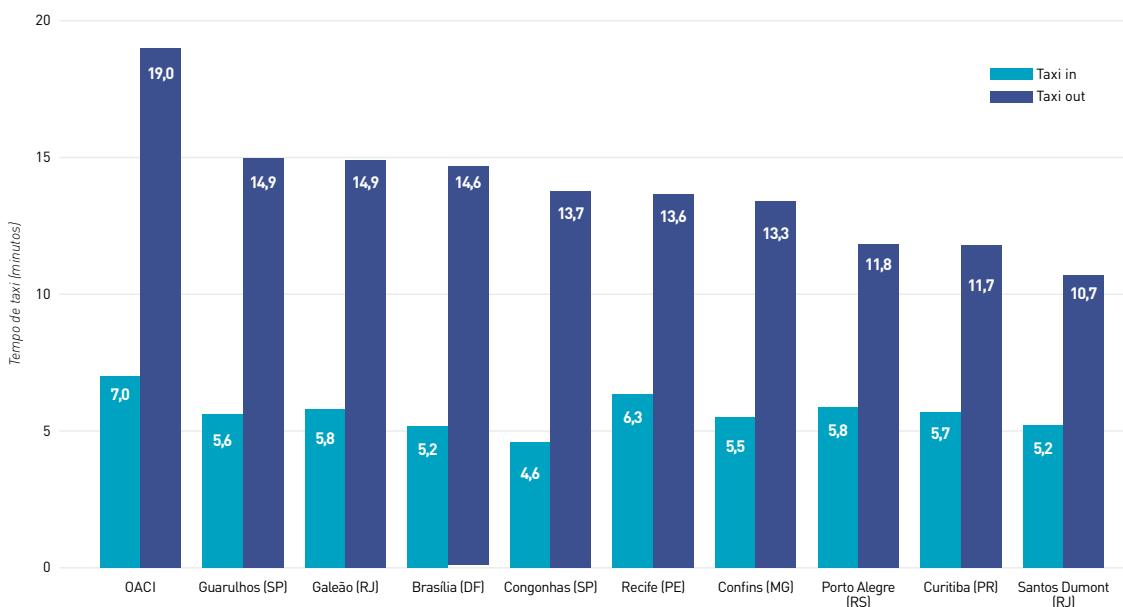
Ano Aeródromo (Código OACI)	2014 e 2015		2016		2017		2018	
	Taxi-in (min)	Taxi-out (min)	Taxi-in (min)	Taxi-out (min)	Taxi-in (min)	Taxi-out (min)	Taxi-in (min)	Taxi-out (min)
SBGR	8,1	14,1	7,8	14,1	8,1	15,1	5,6	14,9
SBSP	4,3	11,0	4,4	13,5	4,5	13,7	4,6	13,7
SBBR	6,9	15,8	6,9	15,6	6,6	14,8	5,2	14,6
SBKP	4,4	14,7	5,7	13,9	6,6	6,8	4,8	15,1
SBRJ	4,5	11,3	4,3	10,8	2,0	10,9	5,2	10,7
SBGL	7,0	13,4	8,1	15,2	7,3	15,0	5,8	14,9
SBCF	4,2	12,5	4,4	13,0	3,9	12,9	5,5	13,3
SBSV	5,7	10,2	5,7	10,5	5,8	10,8	6,2	11,0
SBPA	4,8	10,5	4,5	10,6	4,8	11,1	5,8	11,8
SBCT	4,1	11,0	4,2	11,3	4,1	12,0	5,7	11,7
SBRF	3,5	11,1	3,5	12,1	4,0	14,2	6,3	13,6
SBFZ	5,5	8,7	5,8	8,9	6,0	9,7	6,4	9,8
SBBE	5,3	9,5	5,4	9,9	5,8	10,3	5,5	11,3
SBGO	4,2	8,6	4,6	9,5	4,7	10,1	5,5	10,3
SBEG	4,7	11,0	4,8	10,9	5,0	11,4	6,0	11,0
SBCY	3,5	10,1	3,9	9,7	4,2	10,9	5,7	11,3
SBFL	4,5	9,7	4,5	9,7	4,5	10,7	6,4	10,3
SBVT	3,5	8,8	3,6	8,9	2,4	9,5	5,6	10,0
SBRP	3,5	7,4	3,6	6,9	4,0	8,8	5,6	7,7
SBBH	3,0	8,3	3,3	7,1	3,2	6,6	4,1	7,0

Para os demais aeródromos públicos onde voos regulares não são operados e, portanto, não possuem dados no Registro de Voo, foram atribuídos, para cada um dos anos, a média dos tempos de *taxi-in* e *taxi-out* dos aeroportos cuja movimentação anual foi inferior a mil voos regulares. Essa aproximação baseia-se no pressuposto de que esses aeroportos possuem características físicas e operacionais suficientemente próximas dos demais aeródromos públicos nos quais operadores regulares não estão presentes.

Para os aeródromos privados, foram atribuídos tempos de *taxi-in* e *taxi-out* de 1 e 2 minutos, respectivamente. Devido a suas dimensões - geralmente tratam-se de aeródromos pequenos, e ao baixo número de operações que ocorrem nestes aeródromos, os tempos de taxi são reduzidos.

Os tempos de *take off*, *climb* e *approach* seguem a Tabela 3 de acordo com o tipo de aeronave. No Gráfico 1, é apresentada uma comparação, para o ano de 2018, entre as médias internacionais de tempos de taxi adotadas pela OACI e os valores levantados para os aeródromos nacionais com maior movimentação de aeronaves.

Gráfico 1: Comparação entre os tempos de taxi.



4.2.2 Unidade Auxiliar de Potência (APU)

O uso da Unidade Auxiliar de Potência (APU) é dividido em quatro fases distintas, conforme sugerido pela OACI no DOC 9889 – *Airport Air Quality Manual*^[10]. Essas fases correspondem ao uso da APU a cada ciclo LTO realizado pela aeronave. Os quatro modos de operação (fases) são descritos a seguir:

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

O tempo efetivo que cada aeronave permanece junto ao *gate* (i.e., portão de embarque de passageiros) varia consideravelmente, conforme o tipo de aeronave, o aeródromo e a quantidade de combustível requerido para a próxima movimentação. O *Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APU and Alternative Systems* (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* (turboélice).

Para a elaboração do inventário assumiu-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. Para os anos de 2005 a 2016, foi considerado o tempo total para voos de longa distância recomendado no DOC 9889, de 75 minutos, o que apresenta diferença significativa em relação ao tempo total padrão apresentado pela OACI (entre 22 e 26 minutos). Sob essas condições, foi realizada uma consulta às maiores empresas aéreas que operam voos regulares no Brasil (i.e., Gol, Latam, Azul e Avianca) a fim de obter dados representativos do tempo de uso de APU para

¹⁰ OACI, 2011. ORGANIZAÇÃO DA AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL. Doc 9889 Airport Air Quality Manual – First Edition – 2011. 200p.

os anos de 2017 e 2018. Dessa consulta, foi possível estimar o tempo total médio de uso da APU por aeródromo, considerando as especificidades das aeronaves utilizadas por cada uma das empresas. Dessa forma, o tempo de cada empresa foi usado para estimar suas próprias emissões de APU enquanto que, para os demais operadores, foi utilizada a média dos valores coletados em cada aeródromo. No caso dos aeródromos em que não são operados voos regulares, considerou-se o tempo total de 45 minutos, conforme recomendação para voos de curta distância prevista pelo DOC 9889. A Tabela 5 a seguir apresenta os tempos utilizados nas estimativas do presente inventário.

Tabela 5: Tempos de operação padrão da APU por fase (modos de operação) de utilização e por categoria de aeronave.

Categoria da aeronave	Partida da APU (min)	Gate-out (min)	MES - Partida dos motores (min)	Gate-in [min]	
				2005 - 2016	2017-2018
Fuselagem estreita	3,0	3,6	$5,8 \cdot 10^{-1}$	67,8	
Fuselagem larga	3,0	3,6	$5,8 \cdot 10^{-1}$	67,8	
Fuselagem larga (jumbo)	3,0	5,3	2,3	64,4	Específico por aeródromo e operador aéreo
Jato regional	3,0	3,6	$5,8 \cdot 10^{-1}$	67,8	
Turboélice	3,0	3,6	$5,8 \cdot 10^{-1}$	67,8	

Alguns exemplos de aeronaves e suas classificações conforme as cinco categorias usadas no cálculo das emissões de APU são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Categoria de aeronaves usadas nas estimativas de emissões das APU.

Categoria da aeronave	Exemplos de aeronaves
Fuselagem estreita	Boeing 737-700 Series, Boeing MD-80 Series, Airbus A320 Series, Boeing 757200 Series, Airbus A319-100 Series, Boeing 737-800 Series, Boeing 737-300 Series, Boeing 717-200 Series, Embraer ERJ170, Embraer ERJ175.
Fuselagem larga	Boeing 767-300 Series, Boeing 777-200 Series, Airbus A300B/C/F-600 Series, Boeing 767-200 Series, Boeing 767-400, Airbus A310-200 Series, Boeing 777-300 Series, Airbus A300B/C/F Series, Airbus A310-300 Series, Boeing 787-300 Series.
Fuselagem larga do tipo jumbo	Boeing 747-400 Series, Airbus A330-200 Series, Airbus A340-200 Series, Boeing 747-200/300 Series, Airbus A330-300 Series, Airbus A340-600 Series, Airbus A340-300 Series, Airbus A340-500 Series, Boeing 747-100 Series, Airbus A380 Series.
Jato regional	Bombardier CRJ-200/400, Embraer ERJ145, Bombardier CRJ-700, Bombardier CRJ-900, Embraer ERJ140, Bombardier CRJ-100, Embraer ERJ135, Dornier 328 Jet, BAE 146-100, BAE 146-200.
Turboélice	DeHavilland DHC-8-400, DeHavilland DHC-8-100, Embraer EMB120 Brasilia, DeHavilland DHC-8-300, DeHavilland DHC-8-200, Shorts 360-100 Series, DeHavilland DHC-7 Dash 7, Embraer EMB110 Bandeirante, Fokker F27-100 Series, Fokker F27-200 Series.

4.3 Estimativa de 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 voada é aproximada pela distância direta entre os aeroportos corrigida por um fator de penalização.

4.3.1 Algoritmo de cálculo de distância direta

A distância direta, que é a menor distância entre dois pontos medida ao longo da superfície de uma esfera, foi calculada a partir das coordenadas geográficas dos aeródromos de origem e destino (convertidas para radianos) e a partir do raio médio da Terra^[11] (6.371 km). A Equação 8 apresenta a expressão utilizada no cálculo:

$$d_{GC} = 2 \arcsen \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\Delta\varphi}{2} \right) + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \sin^2 \left(\frac{\Delta\lambda}{2} \right)} \right) R_T, \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo:

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 e
R_T	Raio médio da Terra.

4.3.2 Estimativa da distância efetiva de voo

O cálculo da Equação 8 determina a distância direta entre dois aeródromos em uma aproximação da superfície terrestre por uma esfera. Entretanto, é sabido que 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. Este impacto é maior em voos mais curtos, onde os efeitos da navegação aérea são mais pronunciados em relação à distância total do voo.

O IPCC (1999)^[12] estima um fator de “penalização” de 9-10% sobre a distância direta calculada; já o *Carbon Calculator*, da OACI, ferramenta disponibilizada pela organização para a estimativa das emissões de CO₂ por voo, atribui uma penalização em etapas. Para voos até 550 km de distância, uma penalização de 50 km seria adequada. De 550 km a 5.500 km é sugerida uma penalização de 100 km e a partir de 5.500 km a penalização seria de 125 km.

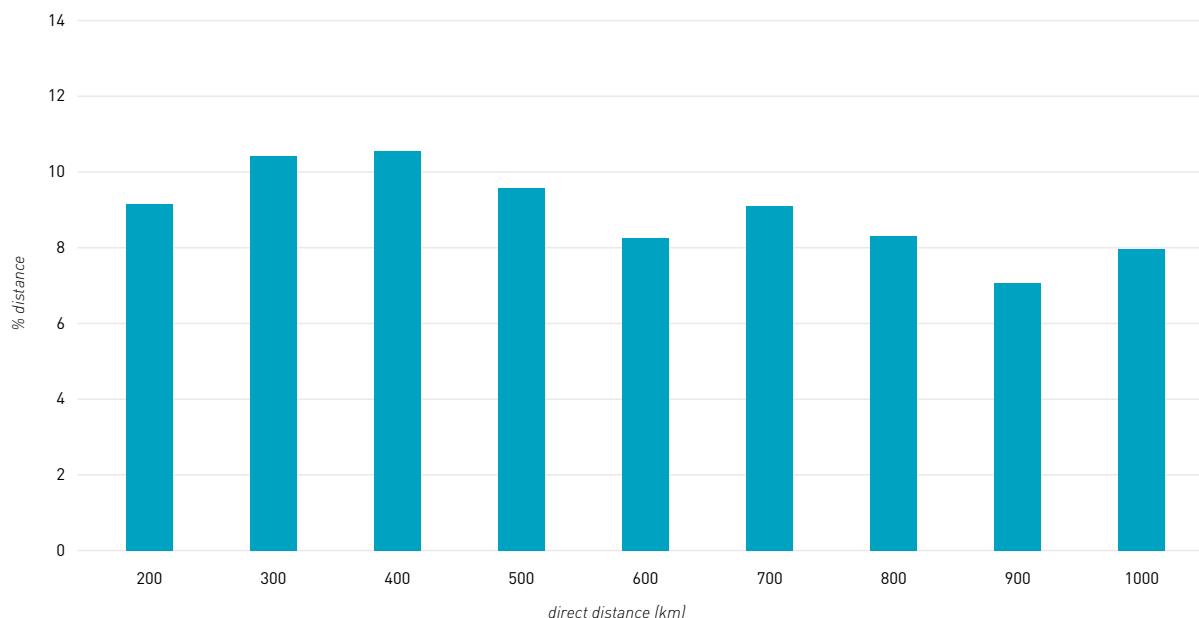
11 O raio médio da Terra foi definido como 6.371 km de acordo com o padrão adotado pela FAI (Fédération Aéronautique Internationale).

12 IPCC, 1999. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Aviation and the global Atmosphere. (item 8.2.2.3).

Já o documento *ATM flight efficiency and its impact on the environment*^[13] apresenta valores mais atuais. Neste documento é apresentado o levantamento da relação média entre as distâncias reais e as distâncias diretas das rotas, conforme a Gráfico 2, calculada pela seguinte equação:

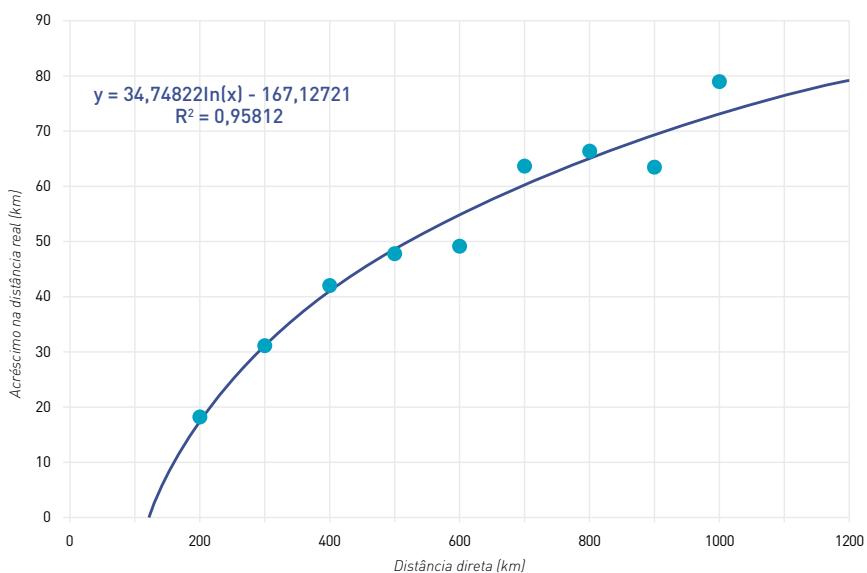
$$\%DistanceDifference = \frac{Actual\ Distance\ flown - Direct\ Distance}{Direct\ Distance} \quad (\text{Equação 9})$$

Gráfico 2: Porcentagem de penalização sobre distância voada e distância direta em km.
Fonte: EUROCONTROL, 2003.



Apresentando-se esses valores em um gráfico de valores absolutos, foi possível encontrar uma boa correlação por meio de regressão logarítmica, como apresentado no Gráfico 3 abaixo:

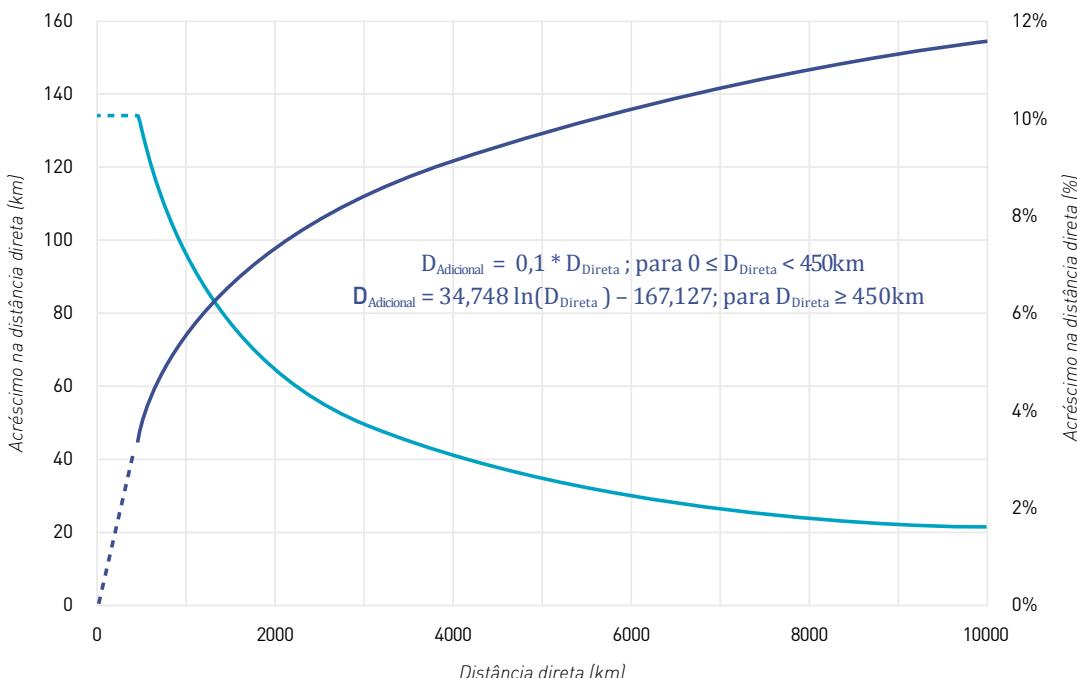
Gráfico 3: Regressão logarítmica do acréscimo sobre a distância direta.





Com base nessa correlação, foi calculado um fator de penalização de distância em função do comprimento de cada voo. Evitando valores negativos, a penalização para voos cuja distância direta calculada foi inferior a 450 km foi definida como 10%. A partir dessa distância, a penalização segue então a logarítmica anteriormente apresentada, como explícito no Gráfico 4.

Gráfico 4: Curvas de penalização sobre a distância direta.



A distância assim estimada é então utilizada para o cálculo das emissões e consumo em cruzeiro para todos os registros de movimentos.

4.4 Consumo de combustível

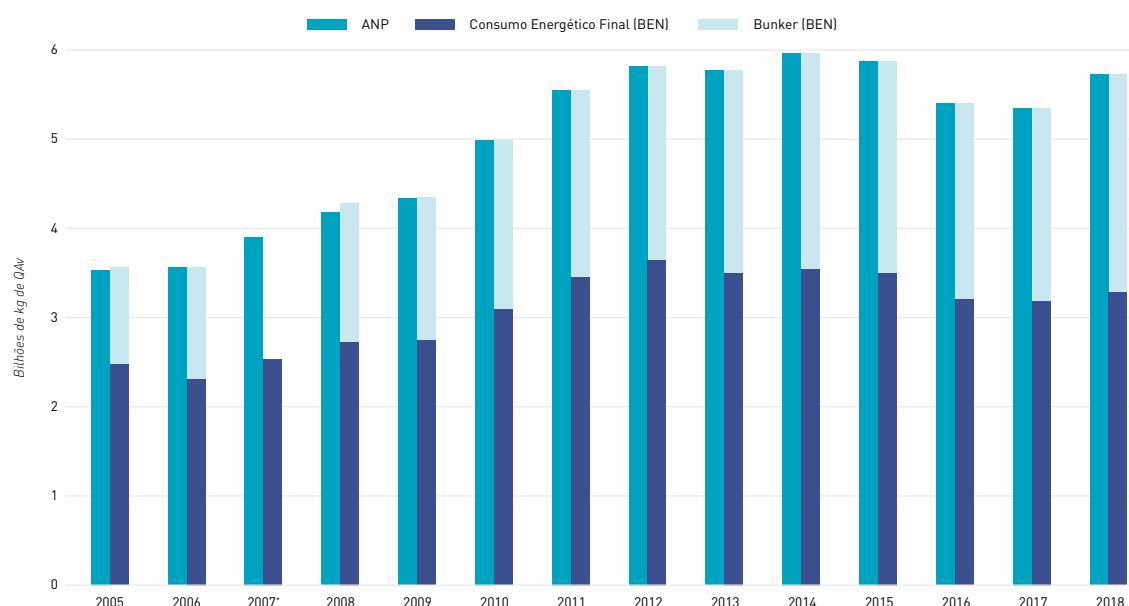
Para aplicação na metodologia Tier 1, obtiveram-se os dados de consumo de combustível divulgados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) tanto para o querosene quanto para a gasolina de aviação. A partir desses dados, foi possível realizar a desagregação entre o consumo de combustível em movimentações nacionais e internacionais e, dessa forma, desagregar as emissões estimadas da mesma maneira.

O consumo de combustível em movimentações domésticas é proveniente da Tabela 3.6.3.a do BEN obtida em Formato Excel na página da EPE^[14]. Já o consumo em movimentações internacionais foi obtido, para os dados até o ano de 2016, da matriz 49x47 disponível na página do Ministério de Minas e Energia – Tabelas Completas^[15], para os demais anos, os valores foram retirados das planilhas em formato Excel presentes na página da Empresa de Pesquisa Energética - Balanço Energético Nacional^[16], nos valores indicados como “Bunker incluído na exportação”, uma vez que o fluxo “Exportação” reportado na matriz 49x47 e nas planilhas em formato Excel corresponde às somas do consumo de combustível em movimentações internacionais e do volume de querosene e gasolina de aviação exportados para consumo em outros países.

14 <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>
 15 <http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/balanco-energetico-nacional>
 16 <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>

Uma outra fonte de informação de dados de consumo de combustível é os dados estatísticos mensais^[17], publicados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Esse documento apresenta a evolução da venda, efetuadas pelas distribuidoras, dos combustíveis utilizados na aviação ao longo de cada ano a partir de 2005. No entanto, os dados de vendas de querosene de aviação da ANP não são desagregados com referência às movimentações domésticas e internacionais. O Gráfico 5 apresenta uma comparação entre a evolução do consumo de querosene informado por cada um dos documentos. Nota-se que há coerência nos valores comparados, com pequenas diferenças, não significativas.

Gráfico 5: Evolução do consumo de querosene de aviação.



*Não há informação do consumo de combustível em movimentações internacionais para o ano de 2007 na matriz 49x47.

5 Fatores de Emissão

Os fatores de emissão dos poluentes presentes neste inventário e utilizados nas estimativas das metodologias *Tier 1* e *Tier 3A*, tal como definidas na seção 3, diferem quanto as fontes e o nível de desagregação conforme discutido nas seções abaixo.

5.1 Metodologia *Tier 1*

Na metodologia *Tier 1* são utilizados fatores de emissão agregados com base na emissão média dos combustíveis da aviação. Dentre os dados necessários para a aplicação das equações 1 e 2, a densidade energética ($\rho_{energia}$) foi obtida do BEN 2018. O fator de emissão (Fe_c), 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 gasolina quanto para o querosene de aviação.

Cabe destacar que durante a fase cruzeiro de voo não há emissões de metano e que para as fases do ciclo LTO o fator de emissão é 5,0 kg CH_4 /TJQAv. Porém, conforme assumido pelo IPCC no documento supracitado, 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 kg CH_4 /TJQAv.

Os valores utilizados na aplicação das equações estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Propriedades dos combustíveis utilizadas nas estimativas da metodologia Tier 1.

Combustível	Fator de emissão (tC/TJ)	Densidade Energética (tep/m³)	Fração de Carbono Oxidado	Fator de Emissão (kgCH ₄ /TJ)	Fator de Emissão (kgN ₂ O/TJ)
Gasolina de Aviação	19,1	76,3.10 ⁻²	100%	0,5	2
Querosene de Aviação	19,5	82,2.10 ⁻²	100%	0,5	2

5.2 Metodologia Tier 3A

Na metodologia *Tier 3A*, os fatores de emissão são determinados de acordo com o GEE ou o Poluente em questão. 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 se baseiam 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).

5.2.1 Ciclo LTO

Os fatores de emissão de Hidrocarbonetos, Monóxido de Carbono, Óxido Nitroso e Material Particulado durante o ciclo LTO são extraídos de dois conjuntos de dados como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8: Bancos de dados de fatores de emissão.

Banco de dados	Descrição	Fatores
<i>Engine Emissions Databank</i> (OACI) ¹⁸	Fatores de emissão de motores de aeronaves a jato em relação ao regime de potência do motor	HC, CO, NO _x , SN (MP _{2,5}) e fluxo de combustível
<i>Turboprop Engine Emissions Database</i> (<i>Luftfartsverket- Swedish Civil Aviation Administration</i>) ¹⁹	Fatores de emissão de motores de aeronaves Turboélice em relação ao regime de potência do motor	HC, CO, NO _x e fluxo de combustível

Os fatores de emissão para motores a jato foram obtidos através do banco de dados EEDb⁽¹⁸⁾ da OACI. Este banco de dados é disponibilizado na página da EASA (*European Aviation Safety Agency*) e contém informações sobre as emissões dos motores nos regimes de operação de 7%, 30%, 85% e 100% de potência. Essas informações são fruto da medição pelos fabricantes no processo de certificação dos motores, para os poluentes que sofrem restrição de emissões dadas pelo anexo 16 da OACI.

Quanto às aeronaves com motores turboélice, os fatores de emissão são originários da *Turboprop Engine Emissions Database*⁽¹⁹⁾. Essa base de dados foi compilada pelos fabricantes por meio da ICCAIA⁽²⁰⁾ e fica sob a custódia da FOI. O acesso a essa base é restrito, podendo ou não ser autorizada por meio de solicitação.

18 EEDb – Engine Emissions Databank

19 FOI, 2013. SWEDISH DEFENSE RESEARCH AGENCY. Base de dados de emissões de motores Turboélice. Comunicação pessoal

20 ICCAIA – International Coordinating Council of Aerospace Industries Associations

Para o cálculo das emissões de Material Particulado em LTO, foi utilizada a metodologia FOA3.0^[21]. Como resultado, tem-se os índices de emissão em termos da massa emitida por quilograma de combustível para cada nível de potência utilizada do ciclo LTO. A metodologia é baseada em valores experimentais de SN (*Smoke Number*), EIHC (Fator de emissão de HC) e BPR (*Bypass Ratio*) dos motores. Esses dados são obtidos da OACI EEDb para as quatro configurações de potência do ciclo LTO. No caso dos motores turboélice, não foi possível encontrar uma fonte confiável com dados adequados para aplicação da metodologia FOA3.0. Dessa maneira, não foram feitas estimativas de emissão para o Material Particulado emitido por aeronaves equipadas com esses motores. Além disso, também são utilizados valores de teor de enxofre dos combustíveis, detalhados mais à frente na seção 5.2.4.2.

Existem alguns motores que ainda não possuem todos os valores de SN e BPR. Para esses casos, o DOC 9889 oferece algumas alternativas para preenchimento dos dados e estas foram adotadas para o prosseguimento dos cálculos. Os valores de AFR (*Air-Fuel Ratio*), necessários para os cálculos de Material Particulado Não-Volátil, foram considerados os mesmos recomendados também pelo DOC 9889 de acordo com o regime de potência conforme apresentado pela Tabela 9:

Tabela 9: Air Fuel Ratio segundo o DOC 9889.

Power setting	AFR
7% (<i>idle</i>)	106
30% (<i>approach</i>)	83
85% (<i>climb-out</i>)	51
100% (<i>take-off</i>)	45

São calculados separadamente os três componentes do material particulado: Material Particulado Não-Volátil ($EIPM_{nvol}$), Material Particulado Volátil de Sulfato devido ao conteúdo de enxofre do combustível ($EIPM_{vol-FSC}$), e Material Particulado Volátil Orgânico devido a combustão incompleta de hidrocarbonetos ($EIPM_{vol-FuelOrganics}$).

Visto que as tabelas do banco de dados apresentam as emissões por motor, foi necessário correlacionar as aeronaves da frota brasileira com um dos motores incluídos na tabela. Desta forma, foi criada uma tabela de conversão do tipo de aeronave para o tipo de motor. No caso de inexistência do motor da aeronave nos bancos de dados, este foi substituído pelo equipamento com tração nominal em kN (quilonewtons) mais próximo do motor real.

No caso da utilização da base EMEP/EEA (2016), foi necessária também uma tabela que correlacionasse os códigos OACI⁽²²⁾ das aeronaves com os códigos daquela, como exemplificado na Tabela 10:

Tabela 10: Exemplo de correlação de bases de aeronaves e motores.

Aeronave	Fabricante	Cód. Aeronave (OACI)	Aeronave correlacionada (EMEP/EEA)	Cód. Aeronave EMEP/EEA	Classe da Aeronave	Motor
737-800	BOEING	B738	737-800	B738	L2J	CFM56-7B27
A320	AIRBUS	A320	A320	A320	L2J	V2527-A5
ERJ-190	EMBRAER	E190	ERJ-190	E190	L2J	CF34-10E7A
ATR72-500	ATR	AT72	ATR 72-200	ATR72	L2T	PW124B
737-700	BOEING	B737	737-700	B737	L2J	CFM56-7B22
A319	AIRBUS	A319	A319	A319	L2J	V2524-A5
Caravan	CESSNA	C208	PA-42-720 Cheyenne 3	C208	L1T	PT6A-114
A318	AIRBUS	A318	A318	A318	L2J	PW6124A
A321	AIRBUS	A321	A321	A321	L2J	V2533-A5
Beech King Air	BEECH	BE9L	King Air 200	BE90	L2T	PT6A-20
767-300	BOEING	B763	767-300	B763	L2J	CF6-80C2B6F
Phenom 100	EMBRAER	E50P	PHENOM 100	EMB100	L2J	PW 617-F
A330-200	AIRBUS	A332	A330-200	A332	L2J	PW4168A
Fokker F-100	FOKKER	F100	Fokker F-100	F100	L2J	TAY Mk650-15

A coluna “Cód. Aeronave EMEP/EEA” apresenta o código utilizado para o cruzamento dos fatores de emissões em cruzeiro, como será explicitado na seção a seguir. Da coluna “Classe da Aeronave” retiram-se as informações do tipo de aeronave:

- A primeira letra designa o tipo de aeronave: L para *Landplanes* ou terrestres, A para Anfíbios, S para *Seaplane* ou hidroaviões, H para helicópteros, T para *Tilt wing* e G para Girocópteros;
- O dígito central carrega a informação do número de motores da aeronave;
- A letra final informa o tipo de motor: J para Jato, P para Pistão e T para turboélice.

A última coluna apresenta os motores para o cruzamento com os fatores de emissão nas bases, conforme o exemplo da Tabela 11.

22 Os códigos OACI estão presentes no DOC 8643. OACI, 2019. ORGANIZAÇÃO DA AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL. Doc 8643 Aircraft Type Designators. Disponível em: <https://www.icao.int/publications/DOC8643/Pages/default.aspx>

Tabela 11: Exemplos de fatores de emissão de motores - base OACI.

Motor	Força (kN)	NOx(g/kg)				Fluxo de combustível (kg/s)			
		em função do regime de potência 100%	85%	30%	7%	em função do regime de potência 100%	85%	30%	7%
V2527-A5	111,2	26,5	22,3	8,9	4,7	1,053	0,880	0,319	0,128
CFM56-7B22	100,97	23,10	19,00	10,00	4,50	1,021	0,844	0,298	0,105
CF34-10E7	83,7	20,83	16,93	8,43	3,67	0,866	0,714	0,237	0,087

5.2.2 Cruzeiro

A fase de voo em cruzeiro abrange as operações das aeronaves realizadas acima de 3000 pés (914,4 m).

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, como a trajetória altimétrica, as variações de velocidade, a carga transportada, as condições de climáticas, etc. A base EMEP/EEA (2016) 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, compreendidos entre 231,5 e 12.964 quilômetros, como exemplificado na Tabela 12.

Tabela 12: Exemplos de dados de emissão e consumo de combustível por distâncias de voo para a aeronave A332 (EMEP/EEA).

Distância (km)	Consumo de combustível (kg)	Emissão CO (kg)	Emissão NOx (kg)
231,5	2.217,5	7,8	44,8
463,0	3.951,7	11,4	78,0
926,0	6.710,9	15,9	115,5
1.389,0	9.495,0	18,5	153,6
1.852,0	12.093,4	20,7	188,8
2.778,0	17.672,4	24,9	263,0
3.704,0	23.374,2	29,3	340,1
4.630,0	28.864,7	33,4	411,5
5.556,0	34.826,1	38,2	492,7
6.482,0	40.320,8	42,3	564,1
7.408,0	46.580,2	47,7	649,4
8.334,0	52.071,3	51,7	720,8
9.260,0	57.892,7	56,2	798,3
10.186,0	63.379,0	60,3	869,6
11.112,0	68.860,9	64,4	940,8
12.038,0	74.345,6	68,5	1.012,1
12.964,0	79.827,1	72,6	1.083,4

No exemplo da Tabela 12 podemos observar que as aeronaves equivalentes ao Airbus A332 consomem 2.217,5 kg de QAv e emitem 44,8 kg de NO_x na fase de cruzeiro de um voo cujos aeroportos de origem e destino distam 231,5 km.

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 estes limites, fatores de emissão por extrapolação linear são calculados para estas situações a partir dos dois últimos valores informados pela tabela para cada aeronave.

5.2.3 Unidade Auxiliar de Potência (APU)

Os fatores de emissão e o consumo de combustível das APU 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 13.

Tabela 13: Relação entre as fases de utilização das APU 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.

Conhecida a categoria da aeronave, a Tabela 14 apresenta o fluxo de combustível e os fatores de emissão para cada fase de utilização. Esses valores são utilizados nas Equações 6 e 7 nas estimativas das emissões apresentadas na seção 3.2.3.

Tabela 14: Fatores de emissão e fluxo de combustível das APU.

Fase de utilização	Categoria da aeronave	Fluxo de combustível (kg QAv/s)	gCO/kgQAv	gHC/kgQAv	gNOx/kgQAv
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
	Turboélice	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
	Turboélice	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
	Turboélice	0,02	6,48	0,42	4,91

De acordo com estudo do FAA & EPA (2009)^[23], 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.

A literatura consultada não apresenta fatores de emissão de material particulado (MP) e dióxido de enxofre (SO₂) para APU e, sendo assim, essas emissões não foram estimadas.

5.2.4 Fatores de emissão dependentes das propriedades do combustível

Para alguns dos gases estimados no inventário, os fatores de emissão são dependentes exclusivamente do tipo de combustível utilizado e de sua composição química, não variando conforme o regime de operação do motor.

5.2.4.1 Fatores de emissão de CO₂, CH₄ e N₂O

No que diz respeito aos gases de efeito estufa diretos (CO₂, CH₄ e N₂O), as estimativas das emissões foram feitas a partir de valores padrão de fator de emissão e poder calorífico para o querosene de aviação^[24], apresentados pelo IPCC (2006). Para a densidade média, foram adotados os dados divulgados pela ANP.

²³ FAA & EPA, 2009. FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION & US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Recommended Best Practice for Quantifying Speciated Organic Gas Emissions from Aircraft Equipped with Turbofan, Turbojet and Turboprop Engines (2009), 19p.

²⁴ As estimativas feitas através da metodologia Tier 3A correspondem apenas às emissões geradas pelo consumo de querosene de aviação.

Uma vez que os fatores de emissão do IPCC são apresentados em kg de gás por unidade de energia (kg/TJ), foi utilizado o poder calorífico, expresso em quantidade de energia por unidade de massa (TJ/Gg). Dessa forma, foram obtidos fatores de emissão expressos em kg de gás por kg de combustível utilizado.

Os valores utilizados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Propriedades do querosene de aviação utilizadas nas estimativas da metodologia Tier 3A.

Combustível	Querosene de Aviação	Unidade	Fonte
Fator de emissão de CO₂	71500,0	kgCO ₂ /TJQAv	IPCC 2006
Fator de emissão N₂O	2,0	kgN ₂ O/TJQAv	IPCC 2006
Fator de emissão CH₄	5,0	kgCH ₄ /TJQAv	IPCC 2006
Valor calorífico	44,1	TJ/Gg	IPCC 2006
Fator de emissão (massa) de CO₂	31,5.10 ⁻¹	kgCO ₂ /kgQAv	Calculado
Fator de emissão (massa) de N₂O	88,2 10 ⁻⁶	kgN ₂ O/kgQAv	Calculado
Fator de emissão (massa) de CH₄	22,1 10 ⁻⁵	kgCH ₄ /kgQAv	Calculado*
Densidade média	79,9 10 ⁻²	kg/L	BEN 2018

*As emissões de metano só foram estimadas para as fases de táxi do ciclo LTO, uma vez que não são geradas emissões desse gás nas outras fases de voo.

5.2.4.2 Fatores de emissão de SO₂

As emissões de SO₂ também são dependentes unicamente da composição química do combustível, no caso, do teor de enxofre (S) no querosene de aviação consumido pelas aeronaves. Dados de qualidade do querosene de aviação, fornecidos pela ANP, foram utilizados como fonte do teor de enxofre para os cálculos das emissões de SO₂. A partir do conteúdo mássico, da relação estequiométrica da combustão de enxofre (S) em dióxido de enxofre (SO₂) - 1 mol S: 1 mol SO₂ - e da relação entre as massas molares de enxofre elementar e dióxido de enxofre (64/32), foi calculado o fator de emissão de SO₂. Os valores médios anuais do teor de enxofre e do fator de emissão de SO₂ são mostrados na Tabela 16 para cada ano estudado.

Tabela 16: Propriedades do querosene de aviação utilizadas nas estimativas da metodologia Tier 3A.

Ano	Teor Médio de Enxofre (%massa)	Fator Emissão de SO ₂ (kgSO ₂ /kgQAv)
2006	0,028	0,0006
2006	0,028	0,0006
2007	0,025	0,0005
2008	0,031	0,0006
2009	0,029	0,0006
2010	0,039	0,0008
2011	0,037	0,0007
2012	0,039	0,0008
2013	0,037	0,0007
2014	0,033	0,0007
2015	0,036	0,0007
2016	0,045	0,0009
2017	0,048	0,0010
2018	0,044	0,0009

5.2.5 Estimativas das emissões de compostos orgânicos voláteis (COV)

Os fatores de emissão apresentados no Banco de Dados da OACI (EEDb) são referentes às emissões de hidrocarbonetos (HC), medidas a partir de detecção por ionização de chama. Porém esse grupo de gases não inclui outros compostos orgânicos, como aldeídos e cetonas, que são gases precursores do ozônio (O₃) no nível troposférico. De modo a incluir também estes compostos, seguiu-se a sugestão apresentada no estudo do FAA & EPA (2009). Assim, as emissões de HC obtidas a partir dos fatores de emissão da OACI foram multiplicadas pelo fator 1,15, obtendo-se, então, as emissões de compostos orgânicos voláteis (COV). A equação 10 representa essas estimativas:

$$E_{COV} = 1,15 \times E_{HC}, \quad (\text{Equação 10})$$

Sendo:

E_{COV} Emissões de compostos orgânicos voláteis e

E_{HC} Emissões de hidrocarbonetos.

