



METODOLOGIA DO INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

2ª EDIÇÃO | JANEIRO DE 2024

SUMÁRIO

1. Introdução.....	3
2. Escopo.....	3
2.1. Gases e poluentes inventariados	4
2.2. Abrangência espacial e temporal.....	5
3. Metodologia.....	6
3.1. Movimentos das aeronaves	6
3.2. Cálculo de emissões em Cruzeiro	6
3.2.1. Estimativa de distâncias de voos	7
3.2.2. Fatores de emissão.....	10
3.3. Cálculo de emissões no Ciclo LTO.....	12
3.3.1. Regimes e Tempos de Operação	13
3.3.2. Fatores de Emissão.....	15
3.4. Cálculo de emissões por Unidade Auxiliar de Potência (APU).....	18
3.4.1. Regimes e Tempos de Operação	19
3.4.2. Fatores de Emissão.....	20

1 Introdução

O Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil, disponível na página da ANAC na internet, é a ferramenta pela qual são disponibilizadas ao público as estimativas das emissões da aviação brasileira. Esta metodologia descreve as etapas e considerações definidas para a execução das estimativas, bem como suas limitações e formas de funcionamento, de acordo com a atualização mais recente do inventário.

2 Escopo

<p>O que é abordado por este inventário:</p>	<p>Emissões das aeronaves da aviação civil comercial e privada, em voos regulares e não regulares (domésticos e internacionais com origem no Brasil, de empresas nacionais ou estrangeiras), além de voos da aviação geral ocorridos no território nacional.</p>
<p>O que não é abordado por este inventário:</p>	<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 que não são movidas a querosene de aviação.
<p>Qual a metodologia utilizada:</p>	<p>A metodologia de cálculo utilizada é aquela descrita pelo IPCC⁽¹⁾ no documento 2006 IPCC <i>Guidelines for National Greenhouse Inventories</i>⁽²⁾, de acordo com o Tier 3A</p> <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 bottom-up 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).

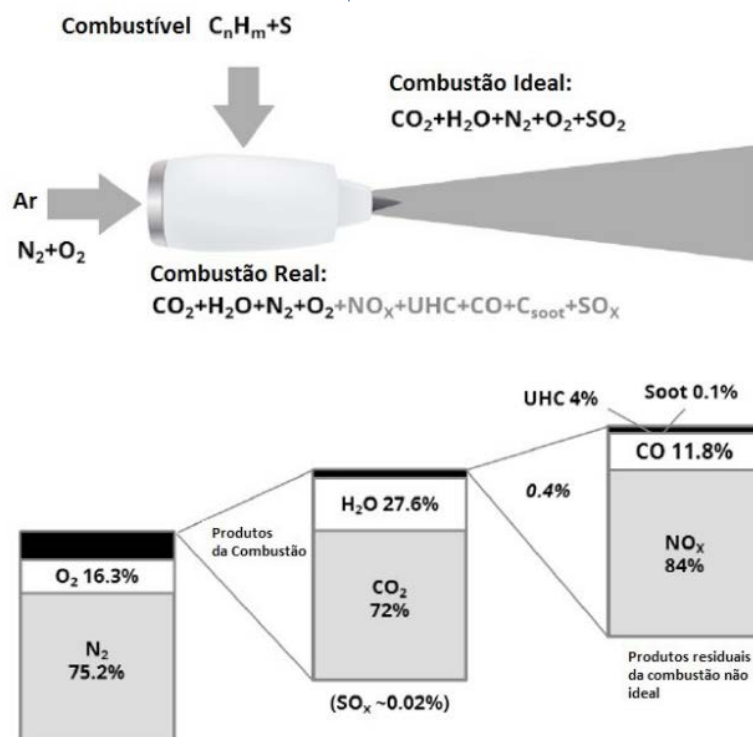
As emissões resultantes das operações de helicópteros não são contabilizadas neste inventário devido à indisponibilidade dos fatores de emissão para os motores a turbina turbo-eixo (*turboshaft*), tipicamente utilizados nesse tipo de aeronave.

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. 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, as emissões decorrentes do uso do combustível não foi contabilizada neste inventário.

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. Essas emissões são a base para o escopo deste 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 (2009).



Na Tabela 1 estão resumidas as principais características dos gases e poluentes inventariados:

Tabela 1: Gases e poluentes inventariados.

Monóxido de Carbono (CO):	Resulta da combustão incompleta do carbono (C) contida no combustível.
Dióxido de Enxofre (SO₂):	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) ⁴⁴ , grande parte do MP emitido pelas aeronaves tem diâmetro menor do que 2,5 µm, sendo referido como MP _{2,5} .
Óxido Nitroso (N₂O):	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 (CH₄):	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 (CO₂):	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 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, ambas utilizando a metodologia Tier 3A recomendada pelo IPCC:

- **Gases e partículas com possível impacto na qualidade local do ar (i.e., poluentes locais) - CO, COV, NO_x, SO₂ e MP:** contabilizados nos pousos 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. CO, COV e NO_x também são considerados gases do efeito estufa indiretos;
- **Gases de efeito estufa direto - CO₂, CH₄, N₂O:** contabilizadas as emissões de todos os voos cujo aeródromo de origem se encontra em território nacional, sejam estes voos de movimentação doméstica ou internacional, considerando todas as fases de voo.

⁴ 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-3-a-combustion/1-a-3-a-aviation-2016/view>

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. Conseqüentemente, maiores também serão a complexidade dos cálculos e a quantidade e nível de detalhamento das informações de entrada requeridas.

O *Tier 3A* é utilizado no Inventário de emissões, o qual é baseado nas informações 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.

3.1 Movimentos das aeronaves

Os dados de movimentação das aeronaves são obtidos do Banco de Informações de Movimento de Tráfego Aéreo (BIMTRA), do Departamento do Controle do Tráfego Aéreo (DECEA).

Com estes dados é compilada uma base de dados contendo os registros de voos segundo:

- Data de ocorrência das movimentações;
- Designador OACI da aeronave;
- Designador OACI dos aeródromos de origem e destino;

A base BIMTRA é consultada diariamente em busca de novos registros de movimentos. Os novos movimentos são calculados conforme a presente metodologia e o resultado é disponibilizado nos [painéis da página de meio ambiente da ANAC](#). Ressalta-se que a atualização dos movimentos não ocorre em ordem cronológica, de modo que registros de datas passadas podem ser incluídos mesmo que registros mais recentes já estejam calculados.

3.2 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 ou 3000 pés.

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 1.

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

Sendo:

<i>d</i>	Distância de voo em <i>km</i> calculada entre os aeródromos de origem e destino,
<i>M</i>	Massa expressa em <i>kg</i> do combustível consumido ou do gás emitido <i>g</i> no voo de distância <i>d</i> percorrida pela aeronave <i>a</i> ,
<i>X₁</i>	Distância tabelada imediatamente inferior à distância <i>d</i> ,
<i>X₂</i>	Distância tabelada imediatamente superior à distância <i>d</i> ,
<i>Y₁</i>	Massa de combustível consumida ou massa do gás <i>g</i> emitida tabelada para a aeronave <i>a</i> para a distância <i>X₁</i> e
<i>Y₂</i>	Massa de combustível consumida ou massa do gás <i>g</i> emitida tabelada para a aeronave <i>a</i> para a distância <i>X₂</i> .

3.2.1 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.

3.2.1.1 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 Terra⁵ (6.371 km). A Equação 2 apresenta a expressão utilizada no cálculo:

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

Sendo:

<i>d_{GC}</i>	Distância direta estimada;
<i>Δφ</i>	Diferença entre as latitudes dos aeródromos de origem e destino;
<i>φ₁</i>	Latitude do aeródromo de origem;
<i>φ₂</i>	Latitude do aeródromo de destino;
<i>Δλ</i>	Diferença entre as longitudes dos aeródromos de origem e destino e
<i>R_T</i>	Raio médio da Terra.

⁵ O raio médio da Terra foi definido como 6.371 km de acordo com o padrão adotado pela FAI (Fédération Aéronautique Internationale).

3.2.1.2 Estimativa da distância efetiva de voo

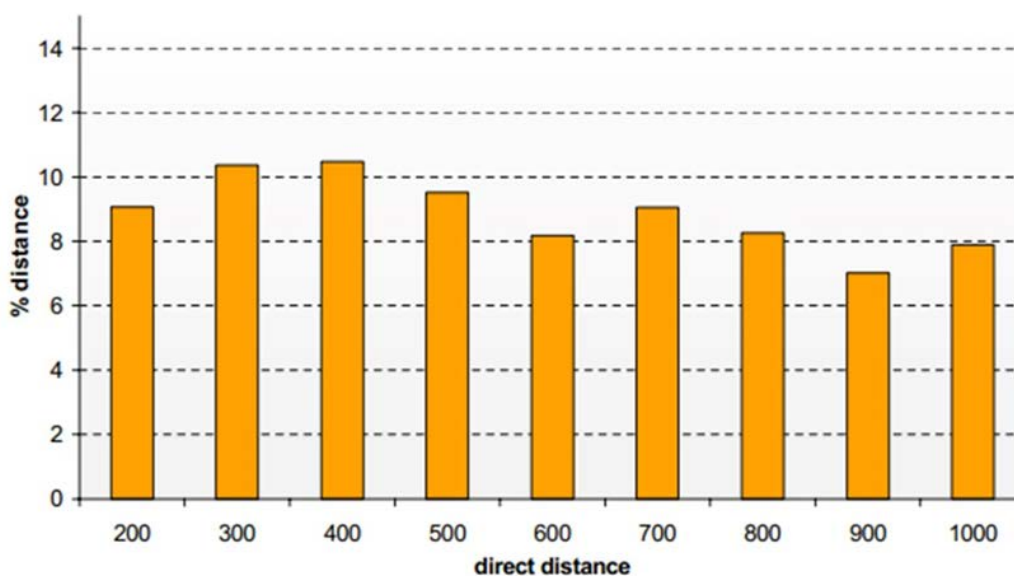
O cálculo da Equação 2 determina a distância direta entre dois aeródromos em uma aproximação da superfície terrestre por uma esfera. Entretanto, é sabido que em um voo real uma aeronave não realiza a rota de menor distância entre dois aeroportos, fato causado por fatores como posição de fixos de navegação, 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.

Já o documento ATM *flight efficiency and its impact on the environment*⁽⁶⁾ apresenta valores mais atuais. Neste documento é apresentado o levantamento da relação média entre as distâncias reais e as distâncias diretas das rotas, conforme o Gráfico 1, calculada pela Equação 3:

$$\%DistanceDifference = \frac{Actual\ Distance\ flown - Direct\ Distance}{Direct\ Distance} \quad (Equação\ 3)$$

Gráfico 1: Porcentagem de penalização sobre distância voada e distância direta em km.

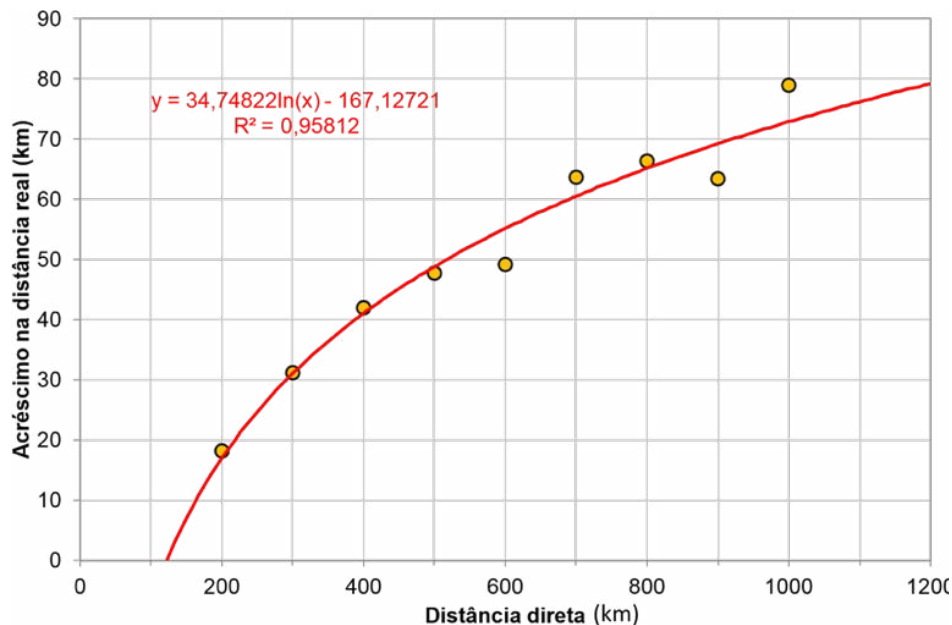
Fonte: EUROCONTROL, 2003.



6 EUROCONTROL, 2003. ATM *Flight Efficiency and its Impact on the environment* - 2002 Study, July 2003. 71p.

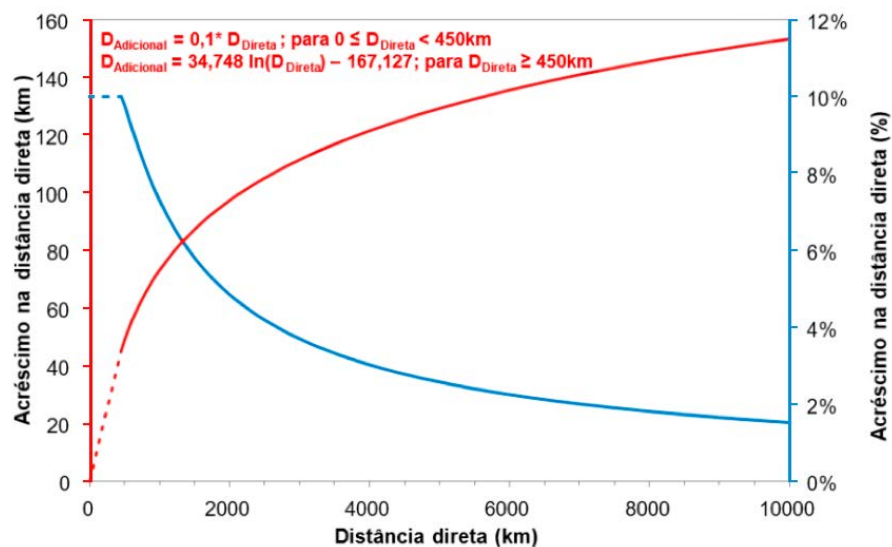
Apresentando-se esses valores em um gráfico de valores absolutos, foi possível encontrar uma correlação satisfatória por meio de regressão logarítmica, como apresentado no Gráfico 2 abaixo:

Gráfico 2: 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 3.

Gráfico 3: 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.

3.2.2 Fatores de emissão

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 ou consumo de combustível, são computados os totais (em quilogramas) para até 17 pontos. Cada ponto designa uma distância de voo, compreendidos entre 231,5 a 12.964,0 quilômetros, como exemplificado na Tabela 2.

Distância (km)	Consumo de combustível (kg)	Emissão CO (kg)	Emissão NO _x (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

Tabela 2: Exemplos de dados de emissão e consumo de combustível por distâncias de voo para a aeronave A332 (EMEP/EEA).

No exemplo da Tabela 2 pode-se observar que as aeronaves equivalentes ao Airbus A332, tipo ICAO 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, por exemplo, 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.

3.2.2.1 *Novas aeronaves*

Entretanto, no caso de aeronaves mais recentes, como os jatos Embraer E2, os Boeing da família MAX e os Airbus NEO, os dados para o cálculo do consumo e emissões de cruzeiro não estão disponíveis. A fim de representar as melhorias tecnológicas trazidas por essas novas aeronaves, o ganho de eficiência em relação à geração imediatamente anterior foi calculado e incorporado aos resultados.

Com base nos dados históricos de consumo de combustível dos dados Estatísticos do Transporte Aéreo⁷, o consumo de combustível do modelo novo é comparado com o modelo anterior⁸ para diferentes distâncias voadas. Com isso, tem-se a relação entre a distância voada e o ganho de eficiência da nova geração, o qual é aplicado aos voos calculados no inventário.

A Tabela 3 mostra as aeronaves que atualmente dependem dessa conversão bem como a aeronave da geração anterior utilizada para comparação:

Tipo de aeronave novo	Tipo de aeronave anterior
AT76	AT72
A20N	A320
B38M	B738
A21N	A321
E295	E195
AT75	AT72
A339	A332

Tabela 3: Aeronaves novas e respectivas referências

⁷ Disponível publicamente no site da ANAC: <https://www.gov.br/anac/pt-br/aceso-a-informacao/dados-abertos/areas-de-atuacao/voos-e-operacoes-aereas/dados-estatisticos-do-transporte-aereo>.

⁸ O uso dos dados estatísticos é limitado a esta análise comparativa entre aeronaves de diferentes gerações. Apesar dos dados de consumo de combustível serem fornecidos diretamente pelas companhias aéreas, eles englobam apenas operações regulares e não regulares sem taxi aéreo e não são fornecidos desagregados por fase de voo. Isso impossibilita que sejam utilizados conforme a metodologia Tier 3A.

3.3 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 3, 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 4 e 5 descritas abaixo:

$$C_{a,f,p} = nM_a \times Fc_{a,f} \times t_{a,f,p} \quad \text{(Equação 4)}$$

$$E_{g,a,f,p} = Fe_{g,a,f} \times C_{a,f,p} \quad \text{(Equação 5)}$$

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 .

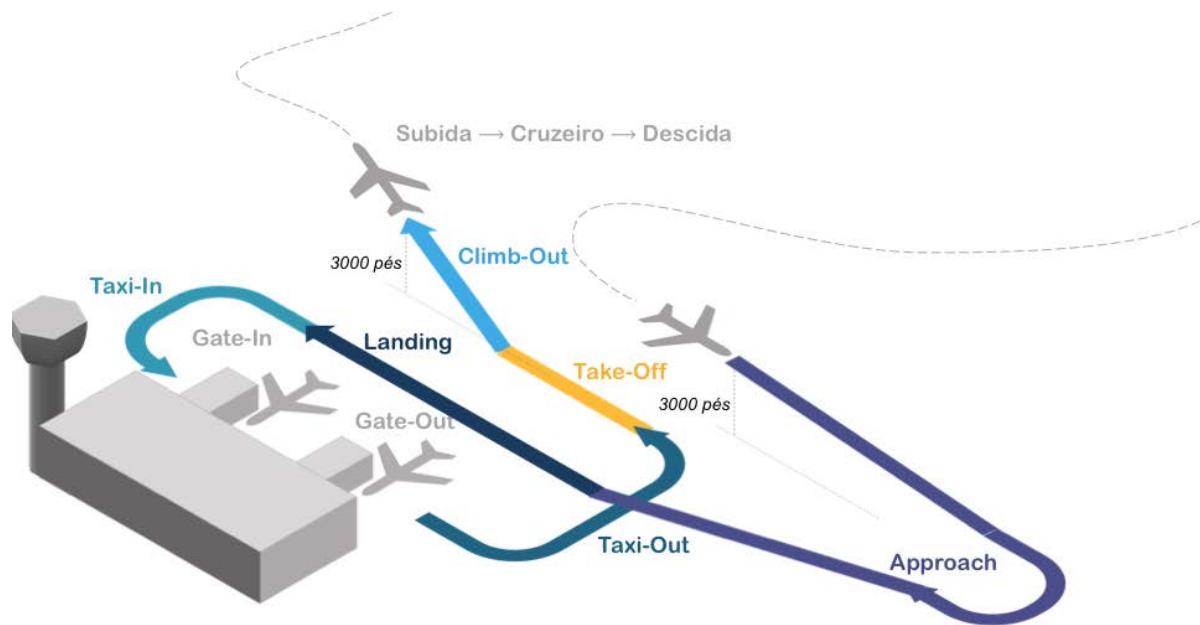


Figura 3: Divisão das fases de voo

3.3.1 Regimes e Tempos de Operação

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⁽⁹⁾ sugerem tempos médios para cada etapa do ciclo LTO para aeronaves a jato e turbo-hélice, 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 4 são apresentadas as informações para cada fase de voo:

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

Tabela 4: Tempos e regimes de potências por fase LTO.

Os tempos de take off, climb e approach seguem a Tabela 4 de acordo com o tipo de aeronave. 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.

Assim, para os aeroportos com presença de operadores de aviação regular foram calculados os tempos de taxi a partir de informações presentes no Sistema Eletrônico de Registro de Voo da ANAC 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 cada ano de operação. Esses tempos foram considerados como representativos do tempo real de operação em cada aeródromo e foram aplicados nos cálculos de emissões.

Para os demais aeródromos 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 500 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. Além disso, o valor de corte representa, com base em dados históricos, o limite da correlação entre quantidade de voos e tempos de taxiamento, ou seja, valor a partir do qual o volume de operações passa a interferir no tempo de uso da pista.

3.3.2 Fatores de Emissão

Na metodologia Tier 3A, os fatores de emissão são determinados de acordo com o GEE ou o Poluente em questão. Abaixo são apresentados os fatores de emissão no ciclo LTO, em termos de quilogramas de gás ou particulado emitido por quilograma de combustível consumido.

3.3.2.1 Fluxo de combustível, HC, CO e NO_x

Os fatores de emissão de Hidrocarbonetos (HC), Monóxido de Carbono (CO) e Óxidos de Nitrogênio (NO_x), bem como o fluxo de combustível, durante o ciclo LTO são extraídos de dois conjuntos de dados diferentes para aeronaves a jato e aeronaves turbo-hélice.

Os fatores de emissão para motores a jato foram obtidos através do banco de dados EEDb(10) 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 turbo-hélice, os fatores de emissão são originários da Turboprop Engine Emissions Database(11). Essa base de dados foi compilada pelos fabricantes através da ICCAIA(12) e fica sob a custódia da FOI.

Visto que esses bancos de dados apresentam os fatores de emissão por motor instalado na aeronave e os dados de movimentação têm apenas a informação por tipo de aeronave, foi necessário correlacionar as aeronaves que voam no Brasil com um dos motores incluídos na tabela. Desta forma, foi criada uma tabela que relaciona o tipo de aeronave e 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.

10 EEDb – *Engine Emissions Databank*

11 FOI, 2013. SWEDISH DEFENSE RESEARCH AGENCY. Base de dados de emissões de motores Turbo-hélice. Comunicação pessoal.

12 ICCAIA – *International Coordinating Council of Aerospace Industries Associations*

3.3.2.2 *Material Particulado*

Para o cálculo das emissões de Material Particulado em LTO, foi utilizada a metodologia FOA4.0⁽¹³⁾. 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 turbo-hélice, não foi possível encontrar uma fonte confiável com dados adequados para aplicação da metodologia FOA4.0. Dessa maneira, não foram feitas estimativas de emissão para o Material Particulado emitido por aeronaves equipadas com esses motores.

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.

São calculados separadamente os três componentes do material particulado: Material Particulado Não-Volátil (EIPMnvol), Material Particulado Volátil de Sulfato devido ao conteúdo de enxofre do combustível (EIPMvol-FSC), e Material Particulado Volátil Orgânico devido a combustão incompleta de hidrocarbonetos (EIPMvol-FuelOrganics). Os componentes são então somados para se obter o valor total de emissão de material particulado.

3.3.2.3 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 6 representa essas estimativas:

$$E_{COV} = 1,15 \times E_{HC}, \quad \text{(Equação 6)}$$

Sendo:

E_{COV} Emissões de compostos orgânicos voláteis e

E_{HC} Emissões de hidrocarbonetos.

3.3.2.4 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. Portanto, são comuns a todas as fases de voo: LTO, APU e Cruzeiro.

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 aviação¹⁴, apresentados pelo IPCC (2006). Para a densidade média, foram adotados os dados divulgados pela ANP.

Uma vez que os fatores de emissão do IPCC apresentam-se 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.

¹⁴ As estimativas feitas através da metodologia Tier 3A correspondem apenas às emissões geradas pelo consumo de querosene de aviação.

Os valores utilizados estão apresentados na Tabela 6.

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

Tabela 6: Propriedades do querosene de aviação utilizadas nas estimativas da metodologia Tier 3A.

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

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.

3.4 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, denominada 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. Na 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 APUs não são certificadas e os dados de regime, tempo de funcionamento e fator de emissão por fase de operação não são divulgados amplamente.

A metodologia de cálculo apresentada na segunda edição do Doc 9889 – Airport Air Quality Manual(15), publicado pela OACI, foi utilizada neste inventário como base para a elaboração das estimativas apresentadas de consumo de combustível e de emissões das APUs.

De forma similar às estimativas para as emissões das fases 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.

Essas estimativas são efetuadas de acordo com as Equações 7 e 8:

$$C_{a,f} = Fc_{a,f} \times t_{a,f,o}, \quad \text{(Equação 7)}$$

$$E_{g,a,f} = Fe_{g,a,f} \times C_{a,f}, \quad \text{(Equação 8)}$$

Sendo:

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 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 e
Fe	Fator de emissão do gás g, em $\text{kg}_{\text{gás}}/\text{kg}_{\text{combustível}}$, da aeronave a na fase de uso f.

3.4.1 Regimes e Tempos de Operação

O uso da Unidade Auxiliar de Potência (APU) é dividido em quatro fases distintas, conforme sugerido pela OACI no DOC 9889. 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 (ECS⁽¹⁶⁾) 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 (ECS) para desembarque de passageiros.

15 OACI, 2011. ORGANIZAÇÃO DA AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL. Doc 9889 Airport Air Quality Manual – Second Edition – 2020.
16 ECS (Environmental Control System): condição normal de operação usada no embarque e desembarque de passageiros.

O tempo efetivo que cada aeronave permanece junto ao portão de embarque e desembarque varia consideravelmente conforme o tipo de aeronave, o aeródromo e a quantidade de combustível requerido para a próxima movimentação. O Doc 9889 apresenta valores padrão para os tempos de cada fase, conforme a quantidade de motores da aeronave. Para a elaboração do inventário, assumiu-se que esses tempos-padrão são representativos das condições dos aeródromos brasileiros, conforme a Tabela 7.

Fase APU	Tempo – aeronaves de dois motores	Tempo – aeronaves de quatro motores
Partida da APU	3 minutos	3 minutos
Gate-out	3,6 minutos	5,3 minutos
Main Engine Start (MES)	35 segundos	140 segundos
Gate-in	15 minutos	15 minutos

Tabela 7: Tempos padrão de operação da APU

3.4.2 Fatores de Emissão

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.

Para o cômputo das emissões da APU de acordo com o Doc 9889, as aeronaves foram divididas em seis grupos que caracterizam seus fatores de emissão:

1. Jatos executivos e jatos regionais (menos que 100 assentos)
2. Aeronaves novas menores (entre 100 e 200 assentos, geração equivalente ou posterior a A320/B737)
3. Aeronaves antigas menores (entre 100 e 200 assentos, geração equivalente ou anterior a MD90/B734)
4. Aeronaves de médio alcance (entre 200 e 300 assentos)
5. Aeronaves novas maiores (mais de 300 assentos, geração equivalente ou posterior a B764/A330)
6. Aeronaves antigas maiores (mais de 300 assentos, geração equivalente ou anterior a A310/A300)

3.4.2.1 Fluxo de combustível, NO_x, HC, CO e MP

Nas Tabelas de 8 a 12 são mostrados os fatores de emissão para cada gás ou particulado inventariado para a fase de APU de acordo com o regime de operação.

Grupo	Condição sem carga (kg/h)	Carga normal (kg/h)	Carga alta (kg/h)
Jatos executivos e jatos regionais	68	101	110
Aeronaves novas menores	77	110	130
Aeronaves antigas menores	69	122	130
Aeronaves de médio alcance	108	164	191
Aeronaves novas maiores	146	238	262
Aeronaves antigas maiores	106	202	214

Tabela 8: Fluxo de combustível da APU

Grupo	Condição sem carga (kg/h)	Carga normal (kg/h)	Carga alta (kg/h)
Jatos executivos e jatos regionais	0,274	0,700	0,714
Aeronaves novas menores	0,384	0,702	1,128
Aeronaves antigas menores	0,329	0,733	0,826
Aeronaves de médio alcance	0,876	1,556	1,899
Aeronaves novas maiores	1,062	2,955	3,347
Aeronaves antigas maiores	0,757	1,847	2,103

Tabela 9: Fator de emissão de NO_x da APU

Grupo	Condição sem carga (kg/h)	Carga normal (kg/h)	Carga alta (kg/h)
Jatos executivos e jatos regionais	1,026	0,027	0,049
Aeronaves novas menores	0,763	0,043	0,035
Aeronaves antigas menores	0,125	0,040	0,035
Aeronaves de médio alcance	0,108	0,018	0,020
Aeronaves novas maiores	0,093	0,031	0,030
Aeronaves antigas maiores	0,113	0,048	0,042

Tabela 10: Fator de emissão de HC da APU

Grupo	Condição sem carga (kg/h)	Carga normal (kg/h)	Carga alta (kg/h)
Jatos executivos e jatos regionais	3,345	0,615	0,655
Aeronaves novas menores	2,948	0,386	0,543
Aeronaves antigas menores	1,477	0,927	0,736
Aeronaves de médio alcance	1,446	0,230	0,170
Aeronaves novas maiores	1,349	0,152	0,173
Aeronaves antigas maiores	1,476	0,331	0,257

Tabela 11: Fator de emissão de CO da APU

Grupo	Condição sem carga (kg/h)	Carga normal (kg/h)	Carga alta (kg/h)
Jatos executivos e jatos regionais	0,063	0,035	0,036
Aeronaves novas menores	0,057	0,022	0,021
Aeronaves antigas menores	0,048	0,056	0,047
Aeronaves de médio alcance	0,031	0,038	0,041
Aeronaves novas maiores	0,022	0,025	0,023
Aeronaves antigas maiores	0,070	0,117	0,127

Tabela 12: Fator de emissão de Material Particulado da APU

De acordo com estudo do FAA & EPA (2009)[17], 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.

17 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 Turbo-prop Engines (2009)*, 19p.



ANAC

AGÊNCIA NACIONAL
DE AVIAÇÃO CIVIL