



Centro Clima

CENTRO DE ESTUDOS INTEGRADOS SOBRE
MEIO AMBIENTE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

TERCEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA

RELATÓRIOS DE REFERÊNCIA

SETOR DE ENERGIA

Emissões de Gases de Efeito Estufa no Transporte Aéreo



Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

2015



TERCEIRO INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES E REMOÇÕES ANTRÓPICAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA

RELATÓRIOS DE REFERÊNCIA

SETOR ENERGIA

EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO TRANSPORTE AÉREO

Elaborado por:

Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas - Centro Clima/COPPE/UFRJ

*Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC
Superintendência de Relações Internacionais - SRI
Gerência Técnica de Análise Ambiental - GTAA/SRI*

Autores (Centro Clima):

Emilio Lèbre La Rovere (Prof. PPE/COPPE e Coord. Geral do Inv. Setor de Energia)
Carolina Burle Schmidt Dubeux (Pesquisadora do Centro Clima e Coord. Técnica do Inv. Setor de Energia)

Autores (ANAC):

Alexandre Rodrigues Filizola (Gerente Técnico de Análise Ambiental)
Bruno Arantes Caldeira da Silva (Especialista em Regulação)
Cristiano Viana Serra Villa (Especialista em Regulação)
Talita Armorst (Especialista em Regulação)

Colaboração (Centro Clima):

Raymundo Muniz Aragão
Carolina Carvalho
Isabella da Fonseca Zicarelli (estagiária)

Apoio (Centro Clima):

Carmen Brandão Reis (Secretária)
Elza M. S. Ramos (Design)

Índice

	Página
Sumário Executivo.....	2
1. Introdução.....	4
2. Metodologia	4
2.1 Método Tier 1	5
2.1.1 Emissões de CO ₂	6
2.1.2 Emissões dos gases não-CO ₂	6
2.2 Método Tier 3a	7
2.2.1 Emissões no Ciclo LTO	7
2.2.2 Emissões em Cruzeiro.....	9
2.2.3 Emissões por Unidade Auxiliar de Potência (APU).....	9
2.2.4 Sistematização dos procedimentos para estimar emissões	10
2.2.5 Dados de atividade (regimes e tempos de operação)	11
2.2.5.1 Ciclo LTO.....	11
2.2.5.2 Cruzeiro (estimativa de distâncias de voos).....	14
2.2.5.2.1 Algoritmo de cálculo de distância direta.....	14
2.2.5.2.2 Estimativa da distância efetiva de voo	15
2.2.5.3 Unidade Auxiliar de Potência (APU)	17
3. Fatores de emissão e propriedades de combustíveis	19
3.1 Metodologia Tier 1	20
3.2 Metodologia Tier 3a.....	21
3.2.1 Ciclo LTO	21
3.2.2 Cruzeiro	22
3.2.3 Unidade Auxiliar de Potência (APU).....	23
3.2.4 Fatores de emissão dependentes das propriedades do combustível.....	25
3.2.5 Estimativas das emissões de compostos orgânicos voláteis não-metano (COV)	26
4. Reconciliação dos Valores Calculados por Tier 3a com os Totais de QAV distribuídos no Brasil (2005 a 2013)	26
5. Estabelecimento de uma série temporal consistente (revisão 1990-2004)	27
6. Dados sobre Consumo de Combustível	28
7. Resultados.....	33
7.1 Tier 1	33

7.2	Tier 3a	34
7.3	Compatibilização das estimativas obtidas com métodos Tier 1 e Tier 3a	35
7.4	Resultados consolidados.....	42
8.	Análise de incertezas	47
8.1.	Nas fontes de dados	47
8.2.	Nas premissas adotadas	47
8.3.	Na reconciliação do consumo de combustível calculado e emissões com os totais de QAV distribuídos no Brasil	48
9.	Disposições Finais	50
	Referências Bibliográficas.....	51

Lista de Figuras

	Página
Figura I: Consumo de gasolina de aviação	2
Figura II: Consumo de querosene de aviação.....	3
Figura 1: Ciclos de voo padrão.	8
Figura 2: Procedimentos adotados e fontes de informação para estimar as emissões da metodologia Tier 3a	11
Figura 3: Comparação entre os tempos de taxi da OACI de aeródromos nacionais.....	14
Figura 4: Porcentagem de penalização sobre distância voada e distância direta em km. 16	
Figura 5: Regressão logarítmica do acréscimo sobre a distância direta.....	16
Figura 6: Curvas de penalização sobre a distância direta.....	17
Figura 7: Evolução do consumo de gasolina de aviação (1990-2013)	29
Figura 8: Evolução do consumo de querosene de aviação (BEN x ANP).	30
Figura 9: Evolução do Consumo de Querosene de Aviação (1990-2013).....	32
Figura 10: Comparação dos resultados Tier 1 e Tier 3a para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de CO ₂	35
Figura 11: Comparação dos resultados Tier 1 e Tier 3a para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de CO ₂	36
Figura 12: Comparação dos resultados Tier 1 e Tier 3a para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de CH ₄	36
Figura 13: Comparação dos resultados Tier 1 e Tier 3a para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de CH ₄	37
Figura 14: Comparação dos resultados Tier 1 e Tier 3a para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de N ₂ O	37
Figura 15: Comparação dos resultados Tier 1 e Tier 3a para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de N ₂ O	38
Figura 16: Comparação dos resultados Tier 1 e Tier 3a para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de NO _x	38
Figura 17: Comparação dos resultados Tier 1 e Tier 3a para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de NO _x	39

Figura 18: Comparação dos resultados <i>Tier 1</i> e <i>Tier 3a</i> para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de CO	39
Figura 19: Comparação dos resultados <i>Tier 1</i> e <i>Tier 3a</i> para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de CO	40
Figura 20: Comparação dos resultados <i>Tier 1</i> e <i>Tier 3a</i> para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de NMVOC.....	40
Figura 21: Comparação dos resultados <i>Tier 1</i> e <i>Tier 3a</i> para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de NMVOC	41
Figura 22: Emissões anuais de CO ₂	44
Figura 23: Emissões anuais de CH ₄	44
Figura 24: Emissões anuais de N ₂ O	45
Figura 25: Emissões anuais de NO _x	45
Figura 26: Emissões anuais de CO	46
Figura 27: Emissões anuais de NMVOC.....	46

Lista de Tabelas

	Página
Tabela 1: Comparação entre <i>Tiers</i> disponibilizados pelo IPCC (2006)	5
Tabela 2: Tempos e regimes de potências por fase LTO	12
Tabela 3: Tempo médio de taxi por aeródromo.....	12
Tabela 4: Tipos de aeronaves e unidades de potência auxiliar agrupados por categoria de aeronave.....	18
Tabela 5: Tempos de operação padrão da APU por fase de utilização e por categoria de aeronave.....	19
Tabela 6: Propriedades físicas e fatores de emissão dos combustíveis de aviação	20
Tabela 7: Bancos de dados de fatores de emissão	21
Tabela 8: Exemplo de fatores de emissão de motores - base OACI	21
Tabela 9: Totais de emissão e consumo por distâncias de voo.....	22
Tabela 10: Ajustes de potência de APU com base na combinação de modos de funcionamento e condições ambientais.....	23
Tabela 11: Fluxo de combustível e fatores de emissão para diferentes modos de funcionamento de APUs	24
Tabela 12: Propriedades do querosene de aviação utilizadas nas estimativas da metodologia <i>Tier 3a</i>	25
Tabela 13: Dados de Venda de QAV Distribuidoras	27
Tabela 14: Venda anual de gasolina de aviação, com base em vendas a empresas domésticas e estrangeiras (1990-2013)	28
Tabela 15: Venda anual de querosene de aviação a empresas domésticas e estrangeiras (1990-2007)	30
Tabela 16: Consumo de QAV ajustado pela modelagem.....	31
Tabela 17: Emissões em voos domésticos utilizando a metodologia <i>Tier 1</i>	33
Tabela 18: Emissões em voos internacionais utilizando a metodologia <i>Tier 1</i>	34
Tabela 19: Emissões de voos domésticos utilizando a metodologia <i>Tier 3a</i>	34
Tabela 20: Emissões em voos internacionais utilizando a metodologia <i>Tier 3a</i>	35
Tabela 21: Fator de Ajuste entre <i>Tier 3a</i> e <i>Tier 1</i>	41

Tabela 22:	Emissões em voos domésticos.....	42
Tabela 23:	Emissões em voos internacionais.....	43
Tabela 24:	Registros incorretos BIMTRA	47
Tabela 25:	Comparativo combustível consumido (ANP) x (BEN) x combustível estimado (MIATA).....	49

Apresentação

O Inventário Nacional de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal (Inventário) é parte integrante da Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (Convenção de Mudança do Clima). A Comunicação Nacional, por sua vez, é um dos principais compromissos de todos os países signatários da Convenção de Mudança do Clima.

A responsabilidade pela elaboração da Comunicação Nacional é do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, por ser este Ministério o responsável pela coordenação da implementação da Convenção de Mudança do Clima no Brasil, conforme divisão de trabalho no âmbito do Governo Federal estabelecida em 1992. A Terceira Comunicação Nacional Brasileira foi elaborada de acordo com as Diretrizes para Elaboração das Comunicações Nacionais dos Países não Listados no Anexo I da Convenção (países em desenvolvimento) (Decisão 17/CP.8 da Convenção) e as diretrizes metodológicas do Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC).

Em atenção a essas Diretrizes, o presente Inventário é apresentado para os anos de 2006 a 2010. Em relação aos anos de 1990 a 2005, o presente Inventário atualiza as informações apresentadas no Segundo Inventário.

Como diretriz técnica básica foram utilizados os documentos elaborados pelo IPCC: “*Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*” publicado em 1997, o documento “*Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*”, publicado em 2000, e o documento “*Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry*”, publicado em 2003. Algumas das estimativas já levam em conta o documento “*2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*”, publicado em 2006.

De acordo com as diretrizes, o Inventário deve ser completo, acurado, transparente, comparável, consistente e ser submetido a processo de controle de qualidade.

A elaboração do Inventário contou com a participação ampla de entidades governamentais e não-governamentais, incluindo ministérios, institutos, universidades, centros de pesquisa e entidades setoriais da indústria. Os estudos elaborados resultaram em um conjunto de Relatórios de Referência, do qual este relatório faz parte, contendo as informações utilizadas, descrição da metodologia empregada e critérios adotados.

Todos os Relatórios de Referência foram submetidos a uma consulta pública, com amplo envolvimento de especialistas que não participaram diretamente na elaboração do Inventário, como parte do processo de controle e garantia de qualidade. Esse processo foi essencial para assegurar a qualidade e a correção da informação que constitui a informação oficial do Governo Brasileiro submetida à Convenção de Mudança do Clima.

Sumário Executivo

Este relatório foi elaborado pelo Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e Mudança do Clima do PPE/COPPE/UFRJ em conjunto com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) por solicitação do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, e apresenta as estimativas de emissões de gases de efeito estufa referentes ao transporte aéreo no Brasil. A ANAC realizou os cálculos detalhados para os anos de 2005 a 2013. A COPPE, com base nestes valores, revisou a série histórica para o período 1990-2004 e consolidou os valores para o período 1990-2013.

Foram estimadas as emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis exceto metano (abreviados pela sigla em inglês, NMVOC) provenientes da queima de combustível de aviação.

De acordo com as diretrizes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e do Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC, sigla em inglês), apenas as emissões provenientes de voos domésticos devem ser contabilizadas no inventário nacional. As emissões decorrentes de queima de combustíveis em atividade aérea internacional (*bunker fuels*) devem ser informadas separadamente.

A Figura I e a Figura II apresentam o consumo de gasolina de aviação (AVGAS) e querosene de aviação (QAV), respectivamente, para os anos de 1990, 1995, 2000 e 2005, com base em dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e ANAC.

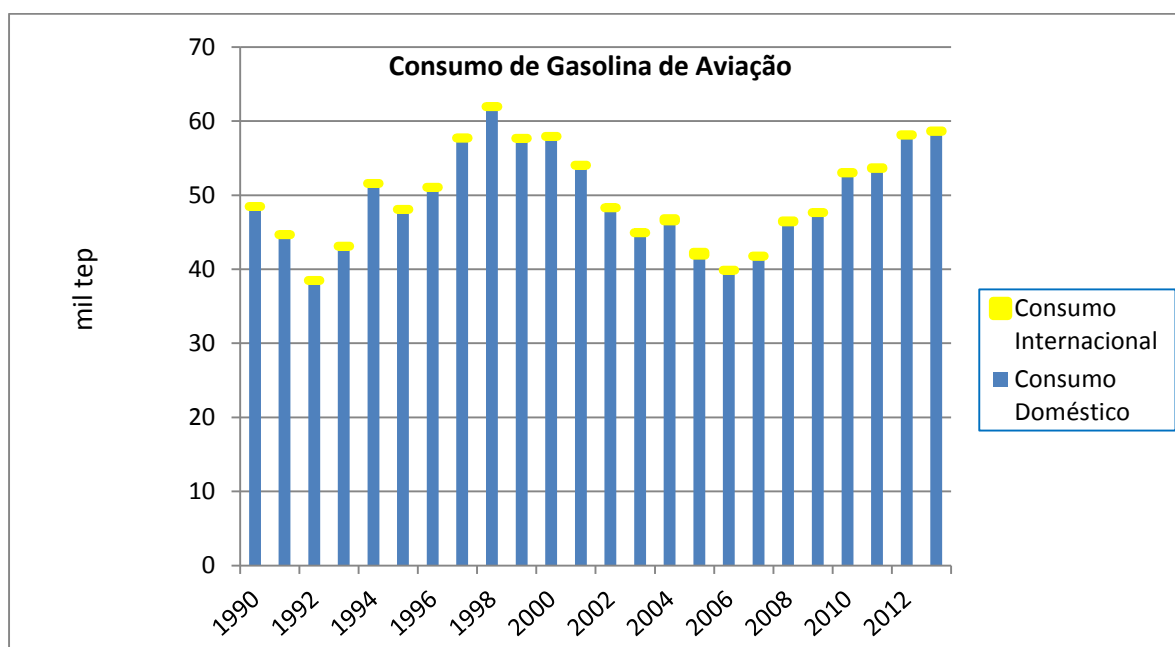


Figura I: Consumo de gasolina de aviação

Observa-se um aumento do consumo de gasolina de aviação de 21,1 % entre 1990 e 2013.

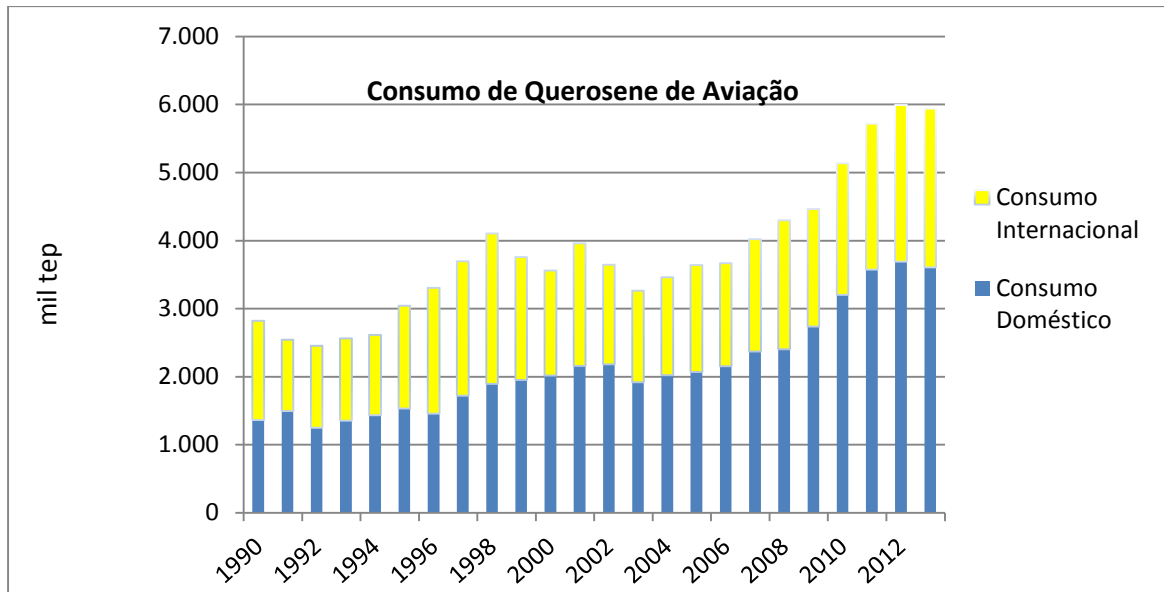


Figura II: Consumo de querosene de aviação

Observa-se um aumento de 164,3% no consumo de querosene de aviação para transporte doméstico e 59,7% no consumo de querosene de aviação no transporte internacional no período de 1990 a 2013.

A Figura III, a seguir, apresenta as estimativas de emissão de CO₂ do setor aéreo (QAV + GAV) para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2013.

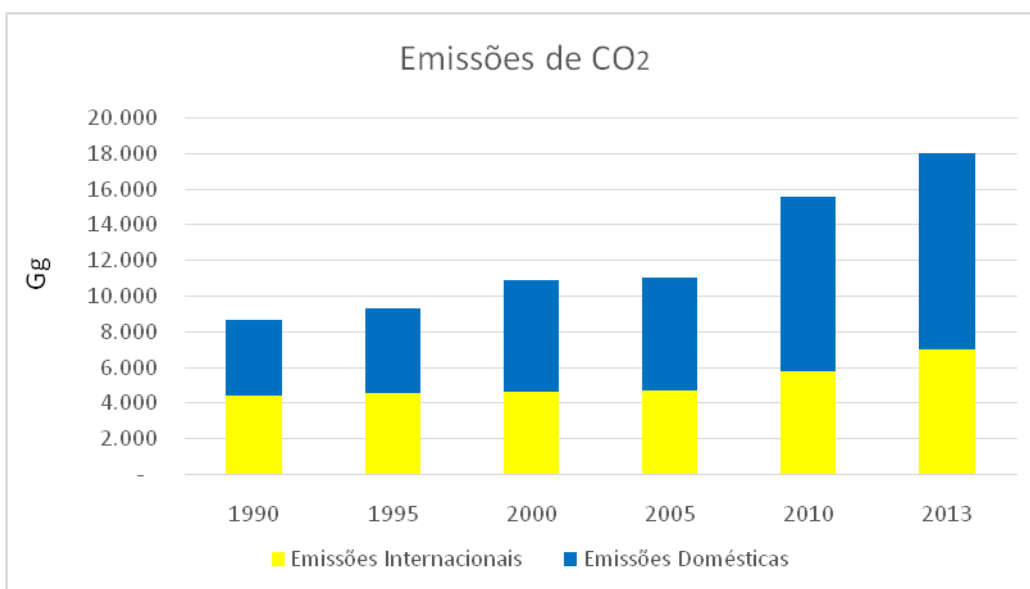


Figura III: Emissões de CO₂

As emissões de CO₂ de voos domésticos cresceram 159,4 % no período de 1990 a 2013, enquanto as emissões de CO₂ de voos internacionais cresceram 59,7% no mesmo período.

1. Introdução

Na estrutura do Terceiro Inventário de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (Inventário) o transporte aéreo é um subsetor do setor Energia. Como tal, suas emissões são incluídas nos Relatórios de Referência gerais do setor (*Top-Down* e *Bottom-Up*).

Este relatório complementa aqueles relatórios, apresentando as emissões de gases de efeito estufa (GEE) da aviação civil de forma detalhada e, quando possível, utilizando metodologias de maior complexidade.

Foram estimadas as emissões de gases de efeito estufa diretos como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) e indiretos como óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis exceto metano (NMVOC) provenientes da queima de combustível de aviação (querosene de aviação e gasolina de aviação), para o período de 1990 a 2013.

No que tange à gasolina de aviação, as estimativas foram feitas pela COPPE e são simplificadas para todo o período 1990-2013 por se tratar de um consumo muito pequeno. Já para querosene de aviação, combustível utilizado por jatos e turbo-hélices, para o período de 2005 a 2013, a ANAC realizou cálculos detalhados a partir de metodologia recentemente aprimorada por uma cooperação técnica estabelecida com o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), tendo resultado no recém-publicado Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil (ANAC, 2014). A COPPE fez a revisão do período 1990-2004, com base nos valores encontrados pela ANAC para o período 2005-2007¹, utilizando a metodologia *overlap* (IPCC, 2006).

2. Metodologia

As diretrizes metodológicas do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) apresentam as metodologias para a elaboração de inventários de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa diretos e, em harmonia com tais diretrizes, o EMEP/EEA (*Environmental European Agency*) oferece as metodologias para estimativas de gases de efeito estufa indiretos. Os setores inventariados por tais diretrizes metodológicas são energia, processos industriais e uso de produtos, agricultura, florestas e outros usos do solo, resíduos e outros.

O IPCC e o EMEP/EEA utilizam três *Tiers* (níveis de complexidade metodológica). “*Tier 1* é o método básico, *Tier 2* o intermediário e *Tier 3* o mais exigente em termos de complexidade e requisitos de dados. *Tiers 2* e *3* são muitas vezes tidos como métodos de nível superior, e são geralmente considerados mais exatos” (IPCC, 2006).

¹ Optou-se por utilizar apenas os anos de 2005 a 2007 na obtenção do fator de ajuste pelo método *overlap* tendo em vista que os valores de 2008 a 2013 estão muito distantes no tempo e podem distorcer os valores da série histórica.

Nas diretrizes do IPCC mais recentes (IPCC, 2006), a *Tier 3* se divide em *Tier 3a* e *Tier 3b* no que se refere à aviação civil, em função dos dados utilizados. A Tabela 1 a seguir apresenta os métodos oferecidos pelo IPCC para estimativa de emissões da aviação:

Tabela 1: Comparação entre *Tiers* disponibilizados pelo IPCC (2006)

	TIER 1	TIER 2	TIER 3a	TIER 3b
Dados utilizados	Fatores de emissão + Combustível consumido	<i>Tier 1</i> + Numero de voos por aeronave	<i>Tier 2</i> + Distância entre aeroportos de origem e destino de cada voo	<i>Tier 3a</i> + Perfil operacional de cada voo
Poluentes Calculados	CO ₂ CH ₄ N ₂ O NO _x (NO + NO ₂)	<i>Tier 1</i> + CO NMVOC SO ₂ (LTO somente)	<i>Tier 1</i> + CO NMVOC SO ₂ (Todo o voo)	<i>Tier 1</i> + CO NMVOC SO ₂ (Todo o voo)
Melhorias ao <i>Tier</i> inferior	-	Separações por: <ul style="list-style-type: none"> • tipo de aeronave • fase de voo (cruzeiro/LTO) • tipo de voo (doméstico/internacional) 	Separações por: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Tier 2</i> + • companhia aérea • aeroporto • fase de LTO (taxi, <i>takeoff</i>, <i>approach</i>) 	Separações por: <ul style="list-style-type: none"> • <i>Tier 3a</i> + • procedimento de voo (altitude de cruzeiro, rotas)

Fonte: IPCC (2006)

Os níveis de detalhamento utilizados neste inventário são *Tier 1* e *Tier 3a* explicitados a seguir.

2.1 Método *Tier 1*

O método *Tier 1* baseia-se apenas no consumo de combustível agregado da aviação civil, sem discriminação das emissões por fases de voo. Dessa forma, este método é utilizado nos casos onde não há informações disponíveis sobre as operações aeroviárias em si, mas apenas dados consolidados de consumo de combustível, cuja base de dados são as estatísticas nacionais de venda e consumo de combustíveis.

No presente Inventário, foram realizadas estimativas de emissões por consumo de gasolina de aviação e querosene de aviação conforme o método *Tier 1* no que diz respeito às emissões dos seguintes gases de efeito estufa (GEE) diretos e indiretos: CO₂, CH₄, N₂O, NO_x, CO e NMVOC.

No caso da gasolina de aviação, as estimativas por *Tier 1* se referem a todo o período do inventário (1990-2013). Em se tratando de querosene de aviação, a *Tier 1* foi utilizado apenas para os anos de 1990 a 2007, sendo que de 2005 a 2007 se destinada à obtenção do fator de ajuste pelo método

overlap com as estimativas em *Tier 3a*, para reajuste dos anos entre 1990 e 2004 para os quais não há dados para cálculos diretamente por *Tier 3a*.

2.1.1 Emissões de CO₂

As emissões de CO₂ no método *Tier 1* do IPCC foram estimadas a partir da equação a seguir:

$$\text{CO}_2\text{ano} = \text{CC} \times \text{DC} \times \text{FC} \times \text{FE} \times 44/12 \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

CO₂ ano: toneladas de dióxido de carbono emitidas anualmente

CC: consumo anual de combustível, expresso em volume (m³)

DC: densidade energética do combustível, expressa em tep/m³ (obtida junto à ANP²)

FC: fator de conversão de tep para TJ (1 tep = 0,041868 TJ)

FE: fator de emissão de carbono

44/12: razão entre as massas molares de CO₂ e carbono

2.1.2 Emissões dos gases não-CO₂

As emissões de cada um dos gases não-CO₂ foram estimadas a partir da equação a seguir:

$$\text{n-CO}_2\text{ano} = \text{CC} \times \text{DC} \times \text{FC} \times \text{FE} \times 44/12 \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

n-CO₂ ano: toneladas do gás não-CO₂ emitidas anualmente

CC: consumo anual de combustível, expresso em volume (m³)

DC: densidade energética do combustível, expressa em tep/m³

FC: fator de conversão de tep para TJ

FE: fator de emissão do gás não-CO₂

² A ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) apresenta a densidade dos combustíveis utilizados neste inventário (querosene e gasolina de aviação)

2.2 Método Tier 3a

A abordagem Tier 3a “leva em conta as emissões de cruzeiro para diferentes distâncias aéreas. Daí detalhes sobre aeroportos de origem (partida) e de destino (chegada) e tipo de aeronave são necessários para essa abordagem, tanto para voos domésticos, quanto internacionais. Na Tier 3A, os inventários são modelados utilizando dados de consumo médio de combustível e de emissões em fase de LTO (*landing and take off*) e várias distâncias em fase de cruzeiro, para uma série de categorias de aeronaves representativas” (EMEP/EEA, 2013).

Para os cálculos é utilizado o Módulo de Emissões do sistema MIATA - (Mapeamento do Impacto Ambiental do Transporte Aéreo). Este sistema visa uma avaliação global dos impactos ambientais oriundos da aviação civil nacional compreendendo, desta forma, aspectos de emissões e ruído aeronáutico. O Módulo de Emissões estima o consumo de combustível e as emissões de cada voo individualmente, para cada tipo de aeronave que operou nos aeroportos brasileiros.

As bases de dados utilizadas foram (i) o BIMTRA (Banco de Informações dos Movimentos de Tráfego Aéreo), compilado e empregado pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) que descreve individualmente cada operação de pouso, decolagem ou sobrevoo, totalizando milhões de registros a cada ano, (ii) o Anuário Estatístico da ANP para reconciliação e ajuste dos dados de consumo.

2.2.1 Emissões no Ciclo LTO

O Ciclo LTO (*Landing and Take off*) contempla todas as etapas de voo próximas ao aeródromo realizadas pelas aeronaves em altitudes inferiores a 914 metros (ou 3000 pés), conforme EMEP/EEA (2013). A figura 1 apresenta o ciclo LTO, composto por 6 fases, como explicitadas em ANAC (2014):

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*).

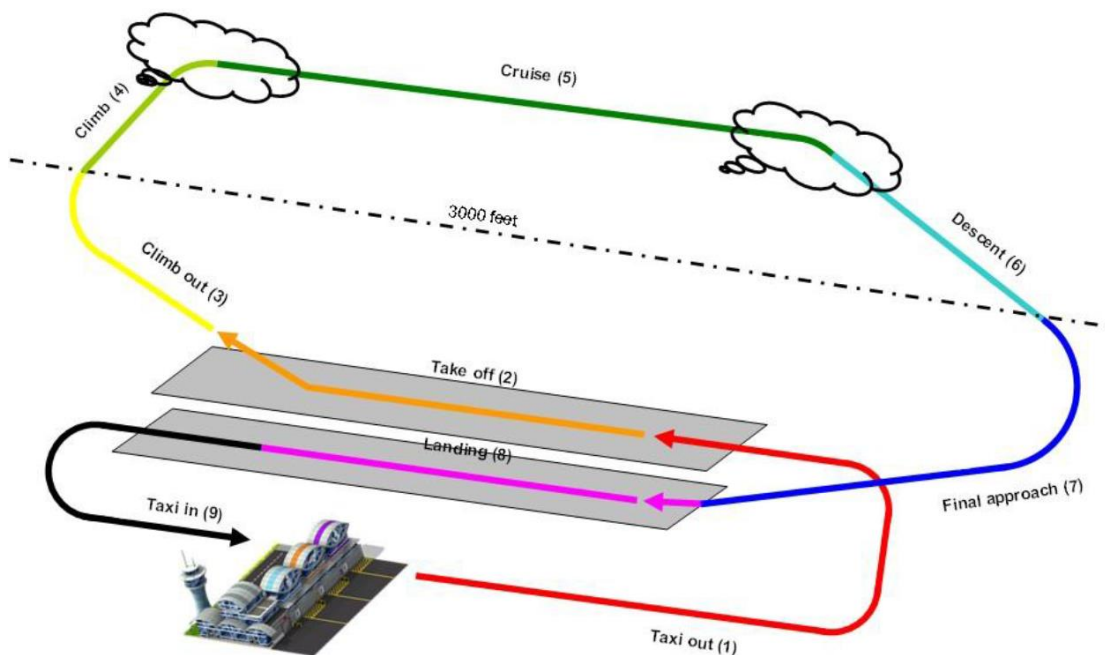


Figura 1: Ciclos de voo padrão.

Fonte: EMEP/EEA 2013

Também como explicitado em ANAC (2014), “as emissões por fase 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, função do regime de potência dos motores nas fases, também é um dado de entrada. Por fim entra no cálculo o tempo de duração de cada fase”. As equações 3 e 4 abaixo são utilizadas nos cálculos, conforme ANAC (2014):

$$C_{a,f,p} = nM_a \times Fc_{a,f} \times t_{a,f,p} \dots \quad (\text{Equação 3})$$

$$E_{g,a,f,p} = Fe_{g,a,f} \times C_{a,f,p} \dots \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

- $C_{a,f,p}$ é o consumo de combustível da aeronave a , expresso em kg, para cada fase f no aeródromo p ;
- nM_a é o número de motores da aeronave a ;
- $Fc_{a,f}$ é o fluxo de combustível, em kg/s, de cada motor da aeronave a na fase f ;
- $t_{a,f,p}$ é o tempo, em segundos, que a aeronave a permanece na fase f no aeródromo p ;
- $E_{g,a,f,p}$ é a emissão, expressa em kg, do gás g pela aeronave a na fase f no aeródromo p ;

- $Fe_{g,a,f}$ é o fator de emissão do gás g , em massa de gás por massa de combustível, da aeronave a na fase f .

2.2.2 Emissões em Cruzeiro

De acordo com a EMEP/EEA (2013), a fase *Cruise* ou Cruzeiro se constitui na etapa de voo em que as aeronaves estão em altitudes superiores aos 914 metros (3.000 pés).

O presente Inventário, tal qual em ANAC (2014), utiliza a metodologia *Tier 3a*, apresentada detalhadamente em EMEP/EEA (2013), que oferece, “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 interfere nos tempos de cada fase (*Climb*, *Cruise* e *Descent*)” (ANAC, 2014). A partir da distância do voo, a massa de combustível consumido ou de gases emitidos é calculada por interpolação linear na tabela de acordo com a equação 5, obtida em ANAC (2014):

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

Onde:

- d é a distância de voo em km calculada entre os aeródromos de origem e destino;
- $M_{a,d,g}$ é a massa expressa em kg do combustível consumido ou do gás emitido g no voo de distância d percorrida pela aeronave a ;
- X_1 é a distância tabelada imediatamente inferior à distância d ;
- X_2 é a distância tabelada imediatamente superior à distância d ;
- Y_1 é a massa de combustível consumida ou do gás g emitida tabelada para a aeronave a para a distância X_1 ;
- Y_2 é a massa de combustível consumida ou do gás g emitida tabelada para a aeronave a para a distância X_2 .

2.2.3 Emissões por Unidade Auxiliar de Potência (APU)

As aeronaves geralmente possuem na cauda, uma Unidade Auxiliar de Potência (APU) que se constitui em um equipamento que acopla uma turbina a gás a um gerador elétrico, com a finalidade de suprir energia elétrica e pneumática durante as operações em solo. O combustível utilizado na geração é o da própria aeronave, resultando também em emissões de gases.

De acordo com EMEP/EEA (2014), o uso de APUs está sendo severamente restringido em alguns aeroportos em razão da poluição atmosférica resultante de seu uso e, portanto, esta fonte de consumo de combustível e respectivas emissões podem estar em declínio. Comparativamente ao total do setor aéreo, o consumo de combustível e as emissões desta fonte são considerados muito pequenos.

A metodologia de cálculo apresentada no *Handbook for Evaluating Emissions and Costs of APUs and Alternative Systems* (ACRP, 2012) foi utilizada em ANAC (2014) como base para a elaboração das estimativas apresentadas de consumo de combustível e de emissões das APUs e encontra-se aqui transcrita. O consumo de combustível é estimado em função do tempo de uso da APU e do fluxo de combustível. As emissões são, então, estimadas para o combustível consumido a partir de fatores de emissão específicos para cada gás ou poluente.

As equações 6 e 7, obtidas em ANAC (2014) representam a maneira como essas estimativas são feitas:

$$C_{a,f} = Fc_{a,f} \times t_{a,f} \dots \quad (\text{Equação 6})$$

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

Onde:

- $C_{a,f}$ é o consumo de combustível da APU na aeronave a , na fase de uso f ;
- $Fc_{a,f}$ é o fluxo de combustível, em kg/s, de cada APU na aeronave a , na fase de uso f ;
- $t_{a,f}$ é o tempo, em segundos, que a unidade APU é usada na aeronave a , na fase de uso f ;
- $E_{g,a,f}$ é a emissão, expressa em kg, do gás g pela aeronave a na fase de uso f ;
- $Fe_{g,a,f}$ é o fator de emissão do gás g , em massa de gás por massa de combustível, da aeronave a na fase de uso f .

2.2.4 Sistematização dos procedimentos para estimar emissões

A sistematização das informações no presente inventário seguiu aquela concebida para o “Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil 2014 ano base 2013”, publicado pela ANAC (ANAC, 2014). A Figura 2 apresenta a sequência lógica de procedimentos realizados para se estimarem as emissões conforme o método *Tier 3a com as respectivas fontes de informação utilizadas*.

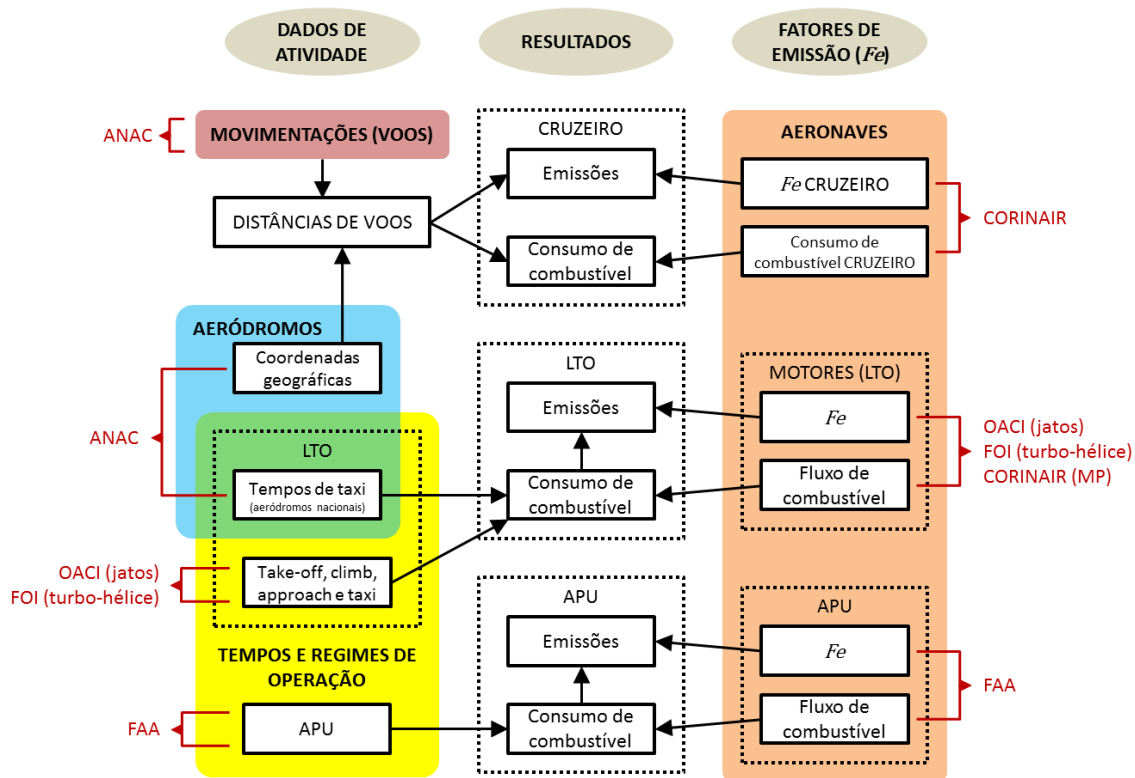


Figura 2: Procedimentos adotados e fontes de informação para estimar as emissões na metodologia Tier 3a

Fonte: ANAC (2014)

2.2.5 Dados de atividade (regimes e tempos de operação)

2.2.5.1 Ciclo LTO

A OACI (Organização da Aviação Civil Internacional) e a FOI (*Swedish Defence Research Agency*) apresentam tempos médios para cada etapa do ciclo LTO para aeronaves (jato e turbo-hélice), respectivamente. Os valores do fluxo de combustível (kg/s) e emissões (em $\text{g}/\text{kg}_{\text{combustível}}$) são medidos nos regimes de potência 7%, 30%, 85% e 100%, de acordo com a operação. Cada valor é característico de uma das fases do LTO.

A Tabela 2 a seguir resume as informações para cada fase:

Tabela 2: Tempos e regimes de potências por fase LTO

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

Fonte: ANAC (2014), a partir de OACI (2011) e FOI (2014)

Os tempos de *Taxi* são calculados em função das características dos aeroportos. Assim, conforme ANAC (2014), “nos principais aeródromos nacionais foram utilizados os tempos de taxi informados pelos operadores de aviação regular. Essas informações são oriundas do Sistema Eletrônico de Registro de Voo, desenvolvido pela GGAP - Gerência Geral de Análise e Pesquisa de Segurança Operacional - que registra os dados informados pelos operadores de aviação regular sobre os tempos de taxi em cada aeródromo. Esses dados têm a vantagem de serem auditáveis, já que são oriundos de informação constante nos Diários de Bordo das aeronaves”. Com base nessa fonte, ANAC (2014) calculou a média dos tempos de *Taxi in* e *Taxi out*, no período de 01 de Agosto a 22 de novembro de 2012 nos principais aeródromos brasileiros. “Esses tempos foram considerados como representativos do tempo real de operação em cada aeródromo e foram aplicados nos cálculos de emissões” (ANAC, 2014). A Tabela 3 apresenta os valores médios estimados por ANAC (2014):

Tabela 3: Tempo médio de taxi por aeródromo

Aeródromo (Código OACI)	<i>Taxi in</i> (min)	<i>Taxi out</i> (min)
SBGR	7,8	13,2
SBSP	4,4	12,7
SBBR	7,7	15,0
SBGL	7,5	14,9
SBMT*	1,0	3,0
SBRJ	4,4	11,1
SBSV	6,4	10,1
SBCF	4,5	12,4
SBKP	4,9	14,2
SBPA	5,1	10,6

Aeródromo (Código OACI)	Taxi in (min)	Taxi out (min)
SBCT	4,2	10,8
SBRF	3,6	10,8
SBJR*	1,0	1,0
SBME	3,1	5,8
SBGO	4,5	8,6
SBBH	3,1	7,4
SBFZ	6,2	9,0
SBVT	4,0	9,9
SBCY	3,3	9,2
SBEG	4,9	10,1
SBBE	4,8	8,7
SBFL	4,8	9,8
SBCG	4,2	10,0

*Os valores dos tempos de taxi para SBMT - Campo de Marte (São Paulo, SP) e SBJR - Aeroporto de Jacarepaguá (Rio de Janeiro, RJ), apresentados em destaque na tabela anterior, são valores calculados a partir da distância de taxi in e taxi out entre a pista e o gate mais distante, considerando-se o sentido de operações da pista predominante e uma velocidade de 15 nós. Esses aeródromos, apesar de apresentarem expressivo movimento, não possuem operação de aviação regular, com uma porcentagem significativa de seus movimentos se deve à operação de helicópteros.

Fonte: ANAC (2014)

Também, como em ANAC (2014), para os aeródromos nacionais que não constam da Tabela acima, geralmente de pequeno porte, foi considerado um tempo médio de *taxi in* de 5 minutos e de 3 minutos para *taxi out*.

Os tempos de *Take off*, *Climb* e *Approach* seguem a Tabela 2 de acordo com o tipo de aeronave, assim como os tempos de *Taxi* para os aeródromos no exterior. A Tabela 3 apresenta uma comparação entre as médias internacionais de tempos de *taxi* adotadas pela OACI e os valores levantados para os aeródromos nacionais de maior movimentação por ANAC (2014).

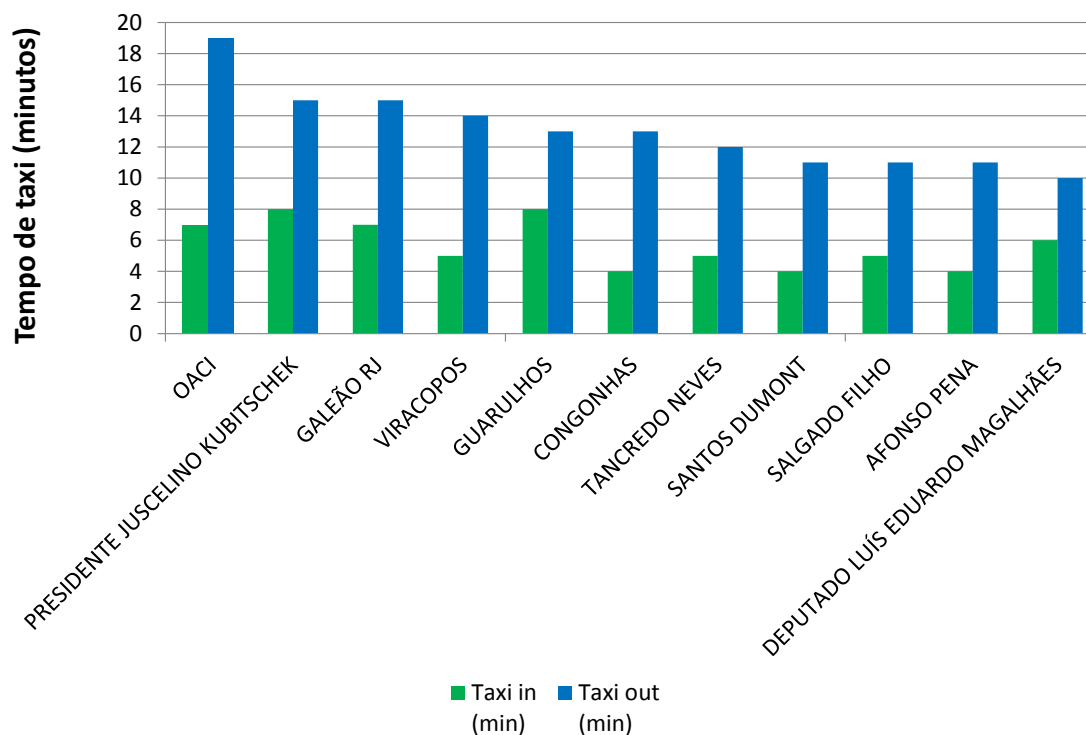


Figura 3: Comparação entre os tempos de taxi da OACI de aeródromos nacionais.

Fonte: ANAC (2014)

2.2.5.2 Cruzeiro (estimativa de distâncias de voos)

As distâncias de voos utilizadas para o cálculo das emissões em cruzeiro utilizadas no presente inventário são aquelas calculadas em ANAC (2014) e encontram-se transcritas do referido documento nos itens 2.2.5.3.1 e 2.2.5.3.2, abaixo.

2.2.5.2.1 Algoritmo de cálculo de distância direta

As emissões em cruzeiro são calculadas com base nos aeródromos de origem e destino de cada voo. Estas informações são usadas para calcular a distância direta, que é a menor distância entre dois pontos medida ao longo da superfície de uma esfera.

Essa distância foi calculada a partir das coordenadas geográficas dos aeródromos de origem e destino (convertidas para radianos) e a partir do raio médio da Terra³ (6.371 km). A equação 8 apresenta a expressão utilizada no cálculo.

³ O raio médio da Terra foi definido como 6.371 km de acordo com o padrão adotado pela FAI (*Fédération Aéronautique Internationale*).

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

Onde:

- d_{GC} : distância direta estimada;
- $\Delta\varphi$: diferença entre as latitudes dos aeródromos de origem e destino;
- φ_1 : latitude do aeródromo de origem;
- φ_2 : latitude do aeródromo de destino;
- $\Delta\lambda$: diferença entre as longitudes dos aeródromos de origem e destino;
- R_T : raio médio da Terra

2.2.5.2.2 Estimativa da distância efetiva de voo

O cálculo da equação anterior resulta na 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, item 8.2.2.3) 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.

Já o documento “*ATM flight efficiency and its impact on the environment*”, publicado pela EUROCONTROL em 2003, apresenta valores mais atuais. No documento é apresentado o levantamento da relação média entre as distâncias reais e as distâncias diretas das rotas, conforme a Figura 4, calculada pela seguinte equação:

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

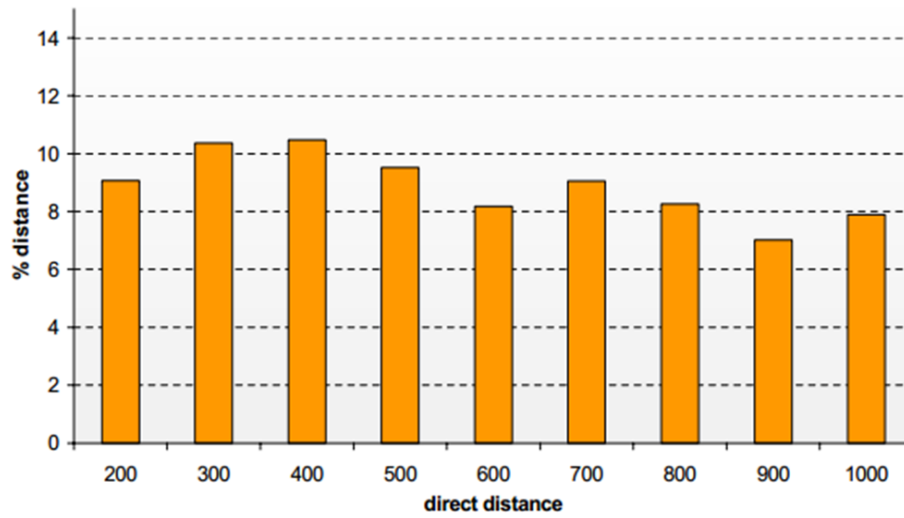


Figura 4: Porcentagem de penalização sobre distância voada e distância direta em km.
 Fonte: EUROCONTROL (2003), apud ANAC (2014)

Colocando esses valores em um gráfico de valores absolutos, foi possível encontrar uma boa correlação por meio de regressão logarítmica, como apresentado na Figura 5 abaixo:

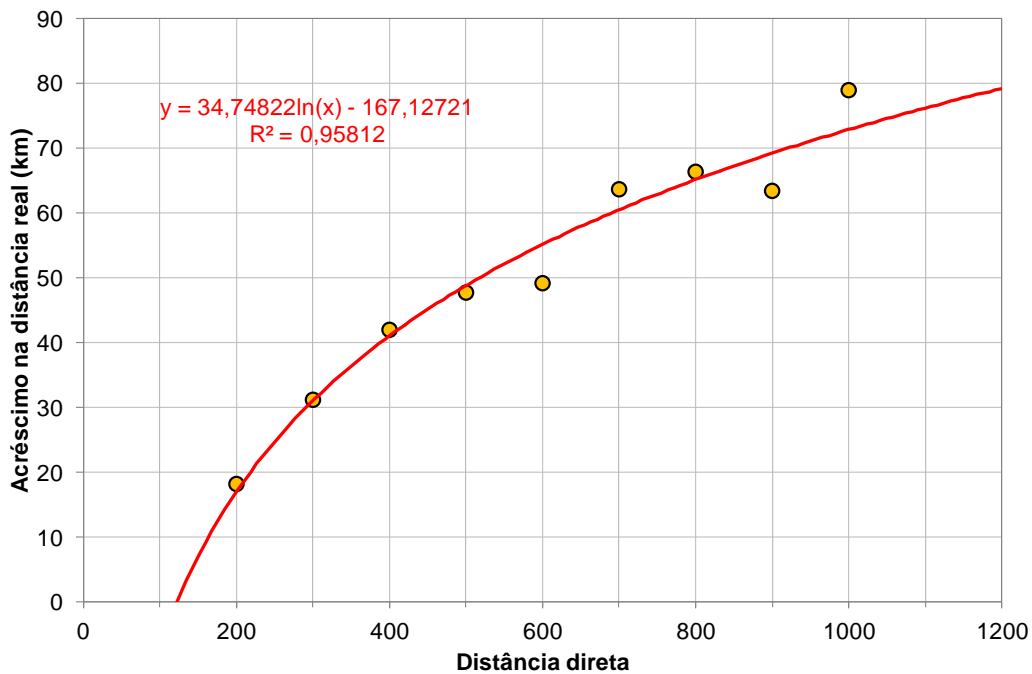


Figura 5: Regressão logarítmica do acréscimo sobre a distância direta.
 Fonte: ANAC (2014)

Com base nessa correlação, foi calculado um fator de penalização de distancia 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 na Figura 6.

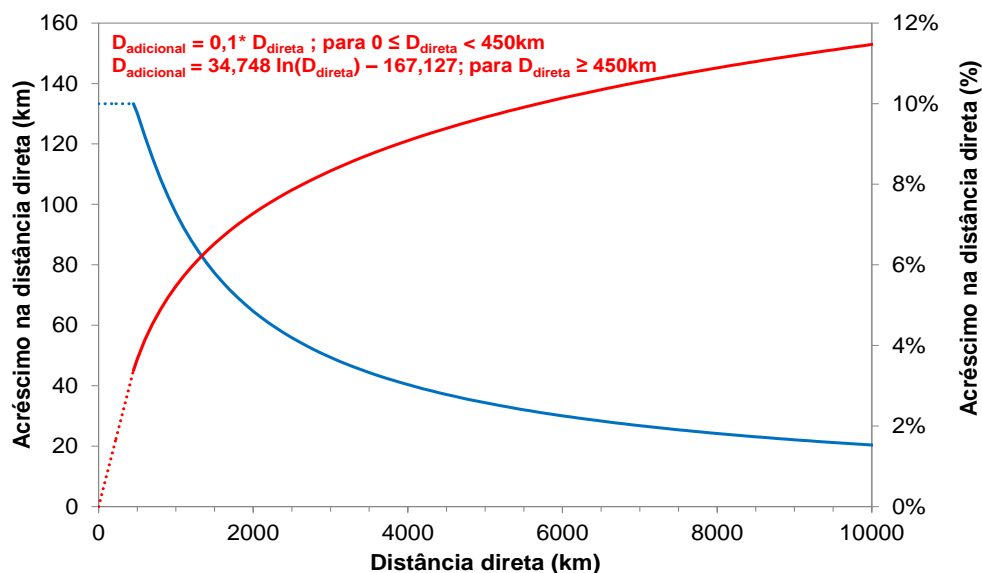


Figura 6: Curvas de penalização sobre a distância direta.

Fonte: ANAC (2014)

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

2.2.5.3 Unidade Auxiliar de Potência (APU)

A operação da APU, para as aeronaves equipadas com este equipamento, é normalmente restrita a períodos em que a aeronave está taxiando ou parada no terminal e os tempos variam, principalmente, em função das aeronaves e dos aeroportos. A APU é normalmente desligada logo após o acionamento das turbinas principais, e acionada após a aterrissagem quando a aeronave está se aproximando da área de estacionamento. De acordo com ANAC (2014), são quatro as fases em que ocorre o uso da unidade auxiliar de potência (APU), sugeridas pela OACI (OACI, 2011). Essas fases se referem ao uso da APU a cada ciclo LTO realizado pela aeronave e são as seguintes:

- *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;
- *Gate-in*: funcionamento normal da APU para desembarque de passageiros.

De acordo com a ACRP (2012), as aeronaves podem ser classificadas em cinco categorias: *narrow body* (aeronave de fuselagem estreita), *wide body* (aeronave de fuselagem larga), *jumbo-wide body* (aeronaves do tipo jumbo, de fuselagem larga), *regional jet* (jatos regionais) e *turbo-prop* (turbo-hélices), conforme tabela 4, que apresenta as categorias e respectivas aeronaves e APUs representativas.

Tabela 4: Tipos de aeronaves e unidades de potência auxiliar agrupados por categoria de aeronave.

Categoria da aeronave	Exemplos de aeronaves	APUs representativas
Fuselagem estreita	Boeing 737-700 Series, Boeing MD-80 Series, Airbus A320 Series, Boeing 757-200 Series, Airbus A319-100 Series, Boeing 737-800 Series, Boeing 737-300 Series, Boeing 717- 200 Series, Embraer ERJ170, Embraer ERJ175.	GTCP 36-300 (80 HP), GTCP 85 (200 HP), GTCP85-98 (200 HP), GTCP85-129 (200 HP), GTCP-129H, GTCP 331-9B, GTCP 331-200, GTCP 85-98, GTCP 36-150, GTCP 36-4A.
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.	TSCP700-4B, GTCP331-200ER, GTCP331-500, APS 5000.
Fuselagem larga (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.	GTCP 331-350, PW-980, GTCP 660, APU PW901A.
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.	GTCP 36-100, GTCP 36-150, GTCP 85.
Turbo-hélices	DeHavilland DHC-8-400, DeHavilland DHC-8- 100, Embraer EMB120 Brasília, 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.	T-62T-40C7, APS 1000 T-62T-46C12, GTCP 36-150, GTCP 30-54.

Fonte: ACRP (2012)

No Brasil, o tempo médio total de uso é de 75 minutos, apresentando diferença significativa em relação ao tempo total padrão apresentado pela OACI (até 26 minutos). Fazendo uso das estimativas desenvolvidas em ANAC (2014) a partir de valores de partida da APU, *gate-out* e *mês* (do inglês, *main engine start*) e dados nacionais referentes a *gate-in*, o presente inventário, assumiu o seguinte tempo total de uso da APU:

Tabela 5: Tempos de operação padrão da APU por fase 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)**	Tempo total de uso (min)
Fuselagem estreita	3,00	3,60	0,58	67,82	75,00
Fuselagem larga	3,00	3,60	0,58	67,82	75,00
Fuselagem larga (jumbo)	3,00	5,30	2,33	64,37	75,00
Jato regional	3,00	3,60	0,58	67,82	75,00
Turbo-hélices	3,00	3,60	0,58	67,82	75,00

Fonte: ANAC (2014)

3. Fatores de emissão e propriedades de combustíveis

Conforme já mencionado, os combustíveis empregados na aviação brasileira são: gasolina de aviação e querosene de aviação.

O fator de emissão do CO₂ é função apenas da concentração de carbono do combustível e independe do regime de operação do motor, diferentemente dos demais gases inventariados. Para o cálculo das emissões de CO₂, foram adotados os valores padrão de IPCC (2006) de fatores de emissão e poder calorífico para cada combustível. Para a densidade média de cada combustível, foram adotados os valores do Balanço Energético Nacional (BEN) 2013 (MME, 2013). O fator de oxidação corresponde à unidade, em conformidade com IPCC (2006). Para os demais poluentes, os fatores de emissão variam conforme o *tier*.

3.1 Metodologia Tier 1

Para o cálculo das emissões pelo *Tier 1*, foram adotados os valores padrão do *Guidelines* (IPCC, 2006) de fatores de emissão e poder calorífico para cada combustível (Tabela 6). Para a densidade média de cada combustível e fator de conversão para tep, adotaram-se os dados divulgados através do BEN (2013), de modo a manter consistência com os cálculos realizados para os demais subsetores do setor Energia, estimados de acordo com a abordagem *Bottom-up*⁴.

Os valores de poder calorífico foram empregados para converter os fatores de emissão, originalmente expressos em massa de gás emitida por energia empregada, em unidades de conversão de massa de combustível em massa de gás emitido:

$$\text{Fator de Emissão de Massa} = \text{Poder Calorífico} \times \text{Fator de Emissão Energia}$$

Tabela 6: Propriedades físicas e fatores de emissão dos combustíveis de aviação

Propriedade	Querosene de Aviação	Gasolina de Aviação	Unidade	Fonte
Conteúdo de carbono	19,5	19,1	Kg/GJ	IPCC, 2006
Fator de emissão de CO ₂	71500	70000	kg/TJ	IPCC, 2006
Fator de emissão CH ₄ ⁵	0,5	0,5	kg/TJ	IPCC, 2006
Fator de emissão N ₂ O	2	2	kg/TJ	IPCC, 2006
Fator de emissão NO _x	300	250	kg/TJ	IPCC, 1996
Fator de emissão de CO	100	15000	Kg/TJ	IPCC, 1996
Fator de emissão de NMVOC	50	300	Kg/TJ	IPCC, 1996
Poder calorífico inferior	44,1	44,3	TJ/Gg	IPCC 2006
Fator de emissão (massa) de CO ₂	3,15	3,10	kg/kg	Calculado
Fator de emissão (massa) de CH ₄	0,0000221	3,101	kg/kg	Calculado
Fator de emissão (massa) de N ₂ O	0,0000882	0,00002215	kg/kg	Calculado
Fator de emissão (massa) de NO _x	0,0132	0,00008860	kg/kg	Calculado
Fator de emissão (massa) de CO	0,00441	0,01329000	kg/kg	Calculado
Fator de emissão (massa) de NMVOC	0,002205	0,66450000	kg/kg	Calculado
Densidade média	0,799	0,726	kg/m ³	EPE 2013

⁴ Para maiores detalhes, vide Relatório de Referência de Emissões de Gases de Efeito Estufa por Queima de Combustíveis: abordagem *Bottom-up*.

⁵ Em modo cruzeiro as emissões de CH₄ são assumidas como sendo insignificantes. Apenas nos ciclos LTO o fator de emissão é de 5 kg/TJ (10% do total dos fatores VOC). Uma vez que, globalmente, cerca de 10 % do total de combustível é consumido em ciclos LTO, o resultado médio da frota é de 0,5 kg/TJ (IPCC, 2006).

3.2 Metodologia Tier 3a

3.2.1 Ciclo LTO

Os fatores de emissão (FE) são extraídos de dois conjuntos de dados, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Bancos de dados de fatores de emissão

Banco de dados	Descrição	Fatores
<i>Emissions Databank (OACI)</i>	Fatores de emissão de motores de aeronaves a jato em relação ao regime de potência do motor	HC, CO, NO _x e fluxo de combustível
<i>Turboprop Engine Emissions Database (Luftfartsverket-Swedish Civil Aviation Administration)</i>	Fatores de emissão de motores de aeronaves turbo-hélice em relação ao regime de potência do motor	HC, CO, NO _x e fluxo de combustível

Os FE utilizados para motores a jato e para as aeronaves com motores turbo-hélice são aqueles também utilizados em ANAC (2014). Os primeiros são provenientes da *Emissions Databank*, da OACI, disponibilizados 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. Os últimos são provenientes da *Turboprop Engine Emissions Database*, base de dados compilada pelos fabricantes através da ICCAIA (*International Coordinating Council of Aerospace Industries Associations*), sob a custódia da FOI (*Luftfartsverket-Swedish Civil Aviation Administration*).

A correlação entre as emissões dos motores constantes do banco de dados e as aeronaves da frota brasileira é aquela obtida em ANAC (2014), apresentada em uma tabela de conversão do tipo de aeronave para o tipo de motor e que, no caso de inexistência do motor da aeronave nos bancos de dados, o motor foi substituído pelo motor com tração nominal em kN (quilonewtons) mais próximo do motor real, conforme o exemplo da Tabela 8.

Tabela 8: Exemplo de fatores de emissão de motores - base OACI

Motor	Fabricante	Força (kN)	NO _x (g/kg)				Fluxo de combustível (kg/s)			
			em função do regime de potência				em função do regime de potência			
			100%	85%	30%	7%	100%	85%	30%	7%
BR700-710A1-10	BMW Roll-Royce	65,61	18,79	15,07	7,68	4,69	0,713	0,594	0,214	0,089
CF34-10A18	General Electric	82,1	19,47	16,72	8,26	3,58	0,826	0,684	0,232	0,086
Trent 972-84	Rolls-Royce Ltd	345,9	38,80	29,6	11,8	5	2,69	2,23	0,75	0,27

Fonte: ANAC (2014)

3.2.2 Cruzeiro

Como anteriormente mencionado, a fase de cruzeiro compreende as operações das aeronaves que ocorrem acima de 3000 pés (914 m). As emissões contabilizadas são aquelas da figura 1 para as etapas *climb*, *cruise* e *descent*.

O consumo de combustível e as emissões atmosféricas das aeronaves resultam de diversos fatores referentes a cada voo, como a distância percorrida, a altitude, as variações de velocidade, a carga transportada, as condições de climáticas, etc. A EMEP/EEA apresenta o consumo de combustível e os valores de emissão modelados pelo *Advanced Emission Model* (AEM) da EUROCONTROL (Organização Europeia para a Segurança da Navegação Aérea), um dos modelos aprovados pela OACI, onde para cada combinação de modelo de aeronave sob Regras de Voo por Instrumentos ou IFR (do inglês *Instrument Flight Rules*) e fator de emissão/consumo de combustível são tabelados os totais (em kg) para 16 diferentes distâncias de voo, compreendidas entre 231,5 a 12038,0 quilômetros (equivalentes a 125 e 6500 milhas náuticas⁶, respectivamente), como exemplificado na Tabela 9, a seguir:

Tabela 9: Totais de emissão e consumo por distâncias de voo

Aeronave (cód. EMEP/EEA)	Parâmetro (kg)	Distância							
		231,5 km	463 km	926 km	1389 km	1852 km	2778 km	3704 km	Etc.
Boeing 737-400	Consumo QAV	1075	1858	3278	4775	6247	9379	12366
	NO _x	18,1	27,6	43,8	60,5	77,0	112,4	146,1
	CO	5713	7318	10314	12665	14961	19614	24063	...

Fonte: EMEP/EEA (2013)

Observa-se na tabela acima, a título de exemplo, que as aeronaves equivalentes ao B737-400 consomem 1075 kg de QAV e emitem 18,1 kg de NO_x e 5713 kg de CO na fase de cruzeiro em um voo cujos aeroportos de origem e destino distam 231,5 km (125 milhas náuticas).

A tabela EMEP/EEA apresenta os dados para distâncias de voo até certo limite, para cada aeronave. Por exemplo, no caso do Boeing 737-700 (B737), os valores vão até 7400 km. Já para o Airbus 320

⁶ Uma milha náutica equivale a 1.852 km

até 5556 km. De acordo com ANAC (2014), como no caso de voos cujas distâncias percorridas são superiores a esses limites, são calculados fatores de emissão por extrapolação linear.

3.2.3 Unidade Auxiliar de Potência (APU)

O consumo de combustível e os fatores de emissão das APUs dependem tanto do tipo de aeronave, quanto do regime de potência sob o qual a APU opera sendo que para cada modo de funcionamento da unidade há um regime de potência o qual varia conforme as condições de temperatura ambiente (ACRP, 2012),.

O presente inventário, tal qual ANAC (2014), considerando a temperatura média brasileira, associou os modos de utilização de APU aos regimes de potência utilizados em “condição de calor” (acima de 50°F equivalentes a 10°C) obtidos em ACRP (2012), conforme a Tabela 10.

Tabela 10: Ajustes de potência de APU com base na combinação de modos de funcionamento e condições ambientais

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

* *Environmental Control Systems* (sistemas de controle ambiental)

Fonte: ACRP (2012)

Para cada categoria da aeronave em cada uma das três fases de funcionamento da APU, há um fluxo de combustível e fatores de emissão, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Fluxo de combustível e fatores de emissão para diferentes modos de funcionamento de APUs

Modo de Funcionamento	Categoria da aeronave	Fluxo de combustível (kg QAv/s)	gCO/kgQAv	gHC/kgQAv	gNO _x /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
	Turbo-hélices	0,012	6,26	1,69	6,14
Gate-in e gate-out	Fuselagem estreita	0,033	5,72	0,43	6,85
	Fuselagem larga	0,052	1,14	0,19	10,99
	Fuselagem larga (jumbo)	0,061	0,53	0,12	10,3
	Jato regional	0,019	6,47	0,49	4,93
	Turbo-hélices	0,019	6,47	0,49	4,93
MES	Fuselagem estreita	0,038	4,94	0,29	7,64
	Fuselagem larga	0,064	0,98	0,13	11,53
	Fuselagem larga (jumbo)	0,058	0,53	0,12	11,2
	Jato regional	0,02	6,48	0,42	4,91
	Turbo-hélices	0,02	6,48	0,42	4,91

Fonte: ANAC (2014), a partir de ACRP (2012)

De acordo com ANAC (2014), segundo o *Recommended Best Practice for Quantifying Speciated Organic Gas Emissions From Aircraft Equipped With Turbofan, Turbojet and Turbo-hélice Engines* (FAA & EPA, 2009), “é grande a incerteza quanto à emissão de CH₄ por motores tipo turbina a gás e esta emissão provavelmente só ocorre em regimes de baixa tração. No caso da APU a classificação por nível de tração do motor não se aplica, dessa forma optou-se por considerar as emissões de CH₄ como desprezíveis”.

3.2.4 Fatores de emissão dependentes das propriedades do combustível

Para CO₂, CH₄ e N₂O, os fatores de emissão são independentes do regime de operação do motor (se LTO ou cruzeiro) sendo suficientes os dados mas apenas referentes ao tipo de combustível utilizado e sua composição química.

As estimativas das emissões de CO₂, CH₄ e N₂O por *Tier 3* foram realizadas apenas para querosene de aviação e com a utilização de fatores de emissão e poder calorífico apresentados pelo IPCC (2006). No que se refere à densidade média, foram adotados os dados divulgados pelo BEN (EPE, 2013) e utilizados no Relatório de Referência ao Inventário Nacional de Emissões da Comunicação Nacional (MCTI, 2014).

Os fatores de emissão de cada gás do IPCC são expressos em kg/TJ. A Tabela 12 apresenta tais fatores e os demais valores utilizados para se obterem os fatores de emissão em kg de gás por kg de combustível.

Tabela 12: Propriedades do querosene de aviação utilizadas nas estimativas da metodologia *Tier 3a*

	Querosene de Aviação	Unidade	Fonte
Fator de emissão de CO ₂	71500	kg/TJ	IPCC 2006
Fator de emissão N ₂ O	2	kg/TJ	IPCC 2006
Fator de emissão CH ₄	0,5	kg/TJ	IPCC 2006
Valor calorífico	44,1	TJ/Gg	IPCC 2006
Fator de emissão (massa) de CO ₂	3,15	kgCO ₂ /kgQAv	Calculado
Fator de emissão (massa) de N ₂ O	0,0000882	kgN ₂ O/kgQAv	Calculado
Fator de emissão (massa) deCH ₄	0,00002205	kgCH ₄ /kgQAv	Calculado**
Densidade média	0,799	kg/l	EPE (2013)
Notas: 1 l = 0,001 m ³ . 1 TJ = 1.000.000.000.000 joules. Um joule corresponde aproximadamente a 0.2390 cal. 1 Gg (gigagrama) = 1.000.000 kg = 1.000 toneladas métricas. *Especificação mínima de produção da Petrobras. **Emissão de Metano em cruzeiro considerada desprezível			

Fonte: Adaptado de MCT (2010)

3.2.5 Estimativas das emissões de compostos orgânicos voláteis não-metano (COV)

Os fatores de emissão de NMVOC - *Non Methane Volatile Organic Compounds* são em princípio dependentes do tipo da aeronave e de seu motor. No entanto, no Banco de Dados da OACI são contabilizados apenas as emissões de HC - hidrocarbonetos. Nestas emissões estão inclusas as emissões de CH₄ e VOC *Volatile Organic Compounds*. Para se obter a emissões destes dois últimos poluentes separadamente, procede-se à multiplicação dos valores encontrados para HC por um fator de 1,15, conforme sugerido no *Recommended Best Practice for Quantifying Speciated Organic Gas Emissions From Aircraft Equipped With Turbofan, Turbojet and Turboprop Engines (2009)*. Este resultado dá conta do total de VOC emitido. Este valor é subtraído então do valor encontrado multiplicando-se o fator de emissão de CH₄, encontrado na tabela acima, pelo fluxo de combustível quando o motor estiver com 7% de sua tração. Para trações maiores foi verificado que as emissões de CH₄ são menores do que a concentração ambiente do poluente. O resultado da subtração é o valor de NMVOC.

4. Reconciliação dos Valores Calculados por Tier 3a com os Totais de QAV distribuídos no Brasil (2005 a 2013)

A metodologia Tier 3a permite que se calcule o consumo de combustível diretamente a partir da base de movimentos das aeronaves. Pelos motivos apresentados nos itens antecedentes e mais outros, como a possibilidade de haver estocagem de combustível, perdas por vazamento e etc., estes resultados nem sempre conferem com os totais informados de venda de QAV pela ANP através do Anuário Brasileiro do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis. No entanto, a comparação dos valores informados pela ANP com os valores calculados pode servir como uma estimativa da precisão do Sistema. Além disso, os *Guidelines* do IPCC recomendam que as emissões totais nacionais sejam computadas com base nas vendas de combustíveis declaradas. Desta forma, as emissões são ajustadas baseadas nos resultados desta comparação. O ajuste nos dados de emissão é feito ano a ano com base nas diferenças apuradas. A conversão entre m³e kg de combustível é feita com base na densidade média do QAV nacional, obtida do BEN que é de 0,799 kg/l. A seguir tabela comparativa:

Tabela 13: Dados de Venda de QAV Distribuidoras

Dados Venda de QAV Distribuidoras - ANP					
Ano	(m ³)	(kg)	Consumo calculado (Kg)	(%) Calculado x ANP	Fator de correção - ANP
2005	4.429.475	3.539.150.921	3.330.466.938	94,10%	1,063
2006	4.465.962	3.568.303.665	3.338.168.802	93,55%	1,069
2007	4.890.597	3.907.586.807	3.622.217.314	92,70%	1,079
2008	5.227.500	4.176.772.126	3.715.726.500	88,96%	1,124
2009	5.428.384	4.337.278.816	4.119.419.709	94,98%	1,053
2010	6.250.101	4.993.830.941	4.811.346.590	96,35%	1,038
2011	6.955.355	5.557.328.667	4.969.791.441	89,43%	1,118
2012	7.291.993	5.826.302.047	5.342.682.105	91,70%	1,091
2013	7.224.826	5.772.635.577	5.627.744.705	97,49%	1,026

Fonte: elaboração própria a partir de ANP (2013)

5. Estabelecimento de uma série temporal consistente (revisão 1990-2004)

Nas situações em que se aplicam *tiers* diferentes para anos diferentes (como é o caso deste relatório) o IPCC recomenda que se ajustem os resultados obtidos com *tiers* menores de forma a se obter uma série temporal consistente. Neste trabalho se emprega o método de sobreposição (*overlap*) como descrito pelo IPCC (2006) para ajustar os resultados obtidos com o *Tier 1* (1990-2004) de forma a compatibilizá-lo com os resultados obtidos com o *Tier 3a* (2005-2007). Para estabelecer o fator de ajuste, utilizam-se os anos para os quais é possível calcular as emissões utilizando ambos os *tiers*. As emissões calculadas com o *Tier 1* para qualquer ano da série, foram ajustadas utilizando a fórmula:

$$y_0 = x_0 \times \left(\frac{1}{(n - m + 1)} \times \sum_{i=m}^n \frac{y_i}{x_i} \right)$$

(Equação 10)

y_0 = emissões ajustadas (qualquer ano de 1990 a 2004)

x_0 = emissões *Tier 1*

n = ano final da série em *overlap*

m = ano inicial da série em *overlap*

y_i = valor das estimativas com a *Tier 3a*

x_i = valor das estimativas com a *Tier 1*

6. Dados sobre Consumo de Combustível

Os dados do consumo de gasolina de aviação são provenientes tanto da matriz ampliada do Balanço Energético Nacional (BEN)⁷, disponibilizada pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2014), quanto do Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis produzido pela ANP (ANP, 2013), que apresenta a evolução da venda pelas distribuidoras, o que permitiu a desagregação entre doméstico e *bunker*, para estimativa em Tier 1, conforme Tabela 14 e Figura 7.

Tabela 14: Venda anual de gasolina de aviação, com base em vendas a empresas domésticas e estrangeiras (1990-2013)

Ano	Consumo de AVGAS	
	tep	
	Voos Domésticos	Voos Internacionais
1990	48.440	46
1991	44.628	10
1992	38.473	9
1993	43.088	11
1994	51.554	11
1995	48.070	33
1996	51.029	34
1997	57.689	29
1998	61.928	21
1999	57.642	51
2000	57.920	22
2001	54.031	13
2002	48.293	37
2003	44.923	15
2004	46.491	378
2005	41.865	454
2006	39.860	16
2007	41.769	1
2008	46.378	173
2009	47.609	66
2010	52.980	90
2011	53.578	122
2012	58.083	104
2013	58.588	112

Fonte: a partir de BEN (2014) e ANP (2013 e informação por ofício)

⁷Versão disponibilizada em 07/03/2014 em http://www.mme.gov.br/mme/menu/todas_publicacoes.html. Esta versão apresenta valores de 1970 a 2012, inclusive.

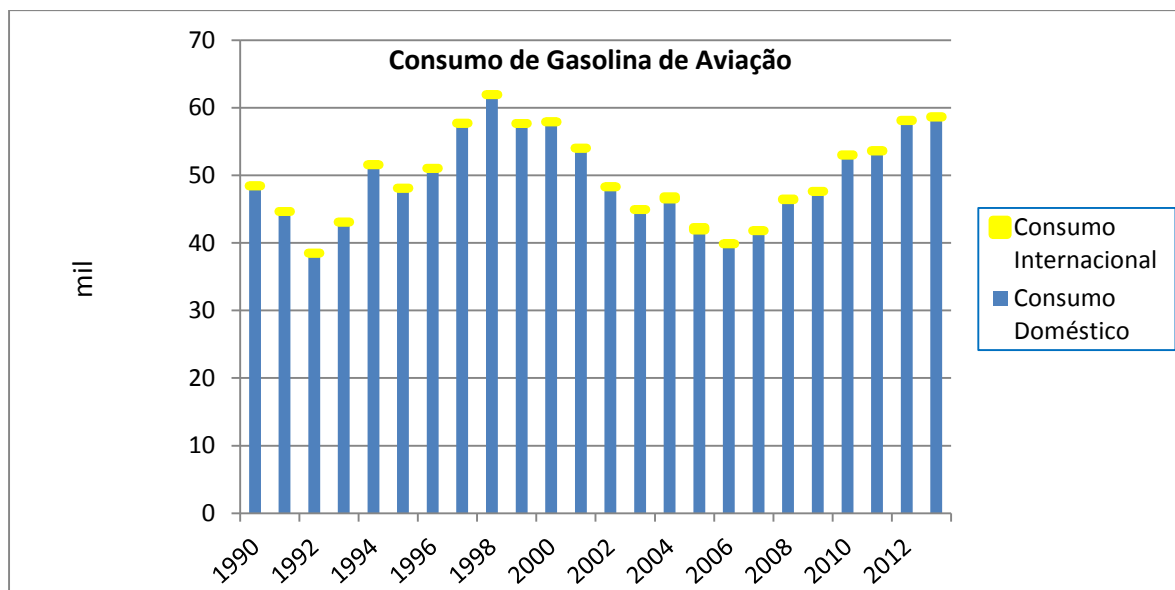


Figura 7: Evolução do consumo de gasolina de aviação (1990-2013)

Fonte: a partir de BEN (2014) e ANP (2013 e informação por ofício)

Os dados de consumo de querosene de aviação são aqueles disponibilizados pela matriz ampliada do Balanço Energético Nacional (MME, 2014).

O consumo de querosene em movimentações domésticas é proveniente da categoria "Consumo Final Energético" do transporte aéreo enquanto os valores de movimentações internacionais de "Bunker Incluído na Exportação"

A Figura 8 apresenta a 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.

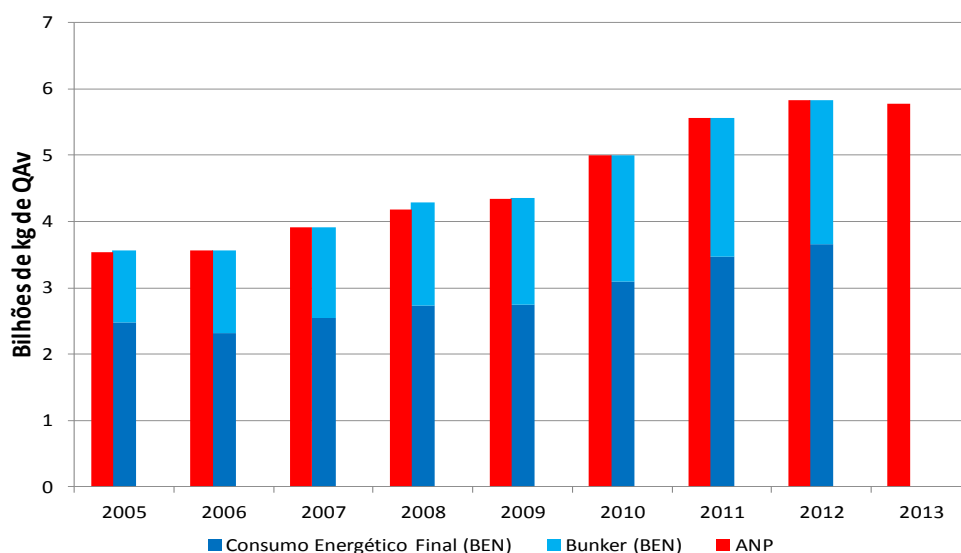


Figura 8: Evolução do consumo de querosene de aviação (BEN x ANP).

Fonte: ANAC (2014)

Os dados utilizados para as estimativas de emissões do uso de querosene de aviação por *Tier 1* estão a seguir:

Tabela 15: Venda anual de querosene de aviação a empresas domésticas e estrangeiras (1990-2007)

Ano	Venda de QAV	
	tep	
	Empresas Nacionais	Empresas estrangeiras
1990	1.117.811	1.706.682
1991	1.269.421	1.276.670
1992	1.031.626	1.424.038
1993	1.125.579	1.437.176
1994	1.201.247	1.415.605
1995	1.263.817	1.779.779
1996	1.173.805	2.133.582
1997	1.400.110	2.296.274
1998	1.539.251	2.568.342
1999	1.619.143	2.137.307
2000	1.699.098	1.862.367
2001	1.807.276	2.153.328
2002	1.861.673	1.785.026
2003	1.628.178	1.637.136
2004	1.716.510	1.743.618
2005	1.746.857	1.894.171
2006	1.840.796	1.830.224
2007	1.979.766	2.040.305

Fonte: BEN (2014)

Considerando os valores modelados, ajustados aos valores de vendas totais de combustível da ANP (2005-2013) e utilizando o método *overlap* (IPCC, 2006) para o período 2005 a 2007, procedeu-se ao reajuste nos valores de combustíveis de toda a série histórica de modo a se obter uma divisão acurada entre consumo de QAV em voos domésticos e em voos internacionais, tendo em vista que empresas domésticas também operam internacionalmente e, portanto, sua parcela referente aos voos internacionais deve ser considerada como *bunker*. Esta separação entre doméstico e internacional só pode ser feita com maior precisão quando se utiliza metodologia de tiers superiores, como o *Tier 3a*, que só foi possível utilizar a partir de 2005. Os valores reajustados estão na Tabela 16 a seguir:

Tabela 16: Consumo de QAV ajustado pela modelagem

Ano	Consumo de QAV (ajustado pela modelagem)	
	tep	
	Voos Domésticos	Voos Internacionais
1990	1.366.124	1.458.368
1991	1.494.906	1.051.186
1992	1.249.610	1.206.053
1993	1.353.990	1.208.765
1994	1.434.715	1.182.137
1995	1.533.581	1.510.015
1996	1.456.431	1.850.955
1997	1.721.883	1.974.502
1998	1.895.838	2.211.756
1999	1.953.491	1.802.958
2000	2.016.260	1.545.204
2001	2.160.647	1.799.957
2002	2.183.130	1.463.570
2003	1.917.353	1.347.962
2004	2.023.197	1.436.931
2005	2.068.936	1.572.093
2006	2.153.489	1.517.532
2007	2.371.107	1.648.963
2008	2.401.401	1.895.603
2009	2.736.088	1.726.043
2010	3.205.425	1.932.159
2011	3.576.168	2.141.133
2012	3.690.432	2.303.586
2013	3.609.990	2.328.816

Nota: de 1990 a 2004, dados do BEN (2014) ajustados pelo método *overlap*; e de 2005 a 2013 dados modelados ajustados aos dados de venda de QAV total da ANP (2013).

A Figura 9 apresenta a evolução do consumo de querosene de aviação para todo o período do inventário utilizado para as estimativas das emissões.

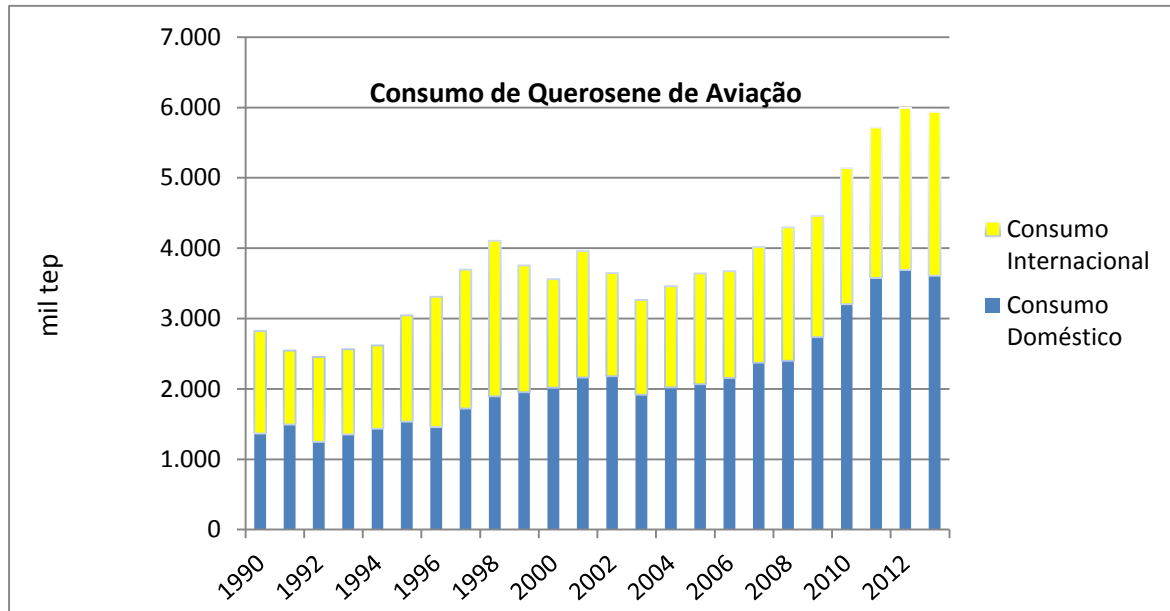


Figura 9: Evolução do Consumo de Querosene de Aviação (1990-2013)

7. Resultados

A seguir são apresentadas as emissões calculadas através do *Tier 1*, para os anos de 1990 a 2007, e do *Tier 3a*, para os anos de 2005 a 2013, bem como o resultado da consolidação das duas séries de 2005 a 2007.

7.1 Tier 1

As estimativas de emissão apresentadas nas tabelas a seguir, respectivamente para a aviação doméstica e para voos internacionais, foram obtidas através do método descrito na seção 2.1, utilizando os dados ainda sem tratamento (considerando apenas os dados de venda de querosene e de gasolina de aviação a companhias domésticas e estrangeiras).

Tabela 17: Emissões em voos domésticos utilizando a metodologia Tier 1

Ano	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	NMVOC
	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)
1990	3.568	0,0	0,10	15,0	35,2	4,3
1991	4.021	0,0	0,11	16,9	33,5	3,3
1992	3.275	0,0	0,09	13,7	28,6	3,5
1993	3.576	0,0	0,10	15,0	31,9	3,6
1994	3.833	0,0	0,11	16,1	37,5	3,7
1995	4.014	0,0	0,11	16,9	35,6	4,4
1996	3.747	0,0	0,10	15,7	37,1	5,2
1997	4.460	0,0	0,12	18,7	42,2	5,6
1998	4.899	0,0	0,14	20,6	45,5	6,3
1999	5.131	0,0	0,14	21,5	43,1	5,3
2000	5.377	0,0	0,15	22,6	43,7	4,7
2001	5.698	0,0	0,16	23,9	41,7	5,3
2002	5.847	0,0	0,16	24,5	38,3	4,4
2003	5.122	0,0	0,14	21,5	35,2	4,1
2004	5.397	0,0	0,15	22,7	36,6	4,3
2005	5.477	0,0	0,15	23,0	33,8	4,6
2006	5.759	0,0	0,16	24,2	32,9	4,4
2007	6.190	0,0	0,17	26,0	34,7	4,9

Tabela 18: Emissões em voos internacionais utilizando a metodologia Tier 1

Ano	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	NM VOC
	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)
1990	5.231	0,0	0,15	21,9	7,3	3,7
1991	3.913	0,0	0,11	16,4	5,5	2,7
1992	4.365	0,0	0,12	18,3	6,1	3,1
1993	4.405	0,0	0,12	18,5	6,2	3,1
1994	4.339	0,0	0,12	18,2	6,1	3,0
1995	5.455	0,0	0,15	22,9	7,6	3,8
1996	6.539	0,0	0,18	27,4	9,2	4,6
1997	7.038	0,0	0,20	29,5	9,9	4,9
1998	7.872	0,1	0,22	33,0	11,0	5,5
1999	6.551	0,0	0,18	27,5	9,2	4,6
2000	5.708	0,0	0,16	23,9	8,0	4,0
2001	6.600	0,0	0,18	27,7	9,2	4,6
2002	5.471	0,0	0,15	23,0	7,7	3,8
2003	5.018	0,0	0,14	21,1	7,0	3,5
2004	5.345	0,0	0,15	22,4	7,7	3,7
2005	5.807	0,0	0,16	24,4	8,4	4,1
2006	5.610	0,0	0,16	23,5	7,9	3,9
2007	6.253	0,0	0,17	26,2	8,7	4,4

7.2 Tier 3a

As estimativas de emissão mostradas a seguir, respectivamente para a aviação doméstica e para voos internacionais, foram obtidas através da metodologia Tier 3a, descrita na seção 2.2 e com os dados já tratados como descrito na seção 4. Referem-se apenas ao consumo de QAV tendo em vista que as emissões decorrentes do uso de GAV foram estimadas apenas por Tier 1.

Tabela 19: Emissões de voos domésticos utilizando a metodologia Tier 3a

Emissões Domésticas	Tier 3a	Tier 3a	Tier 3a
Emissões (kg)	2005	2006	2007
CO ₂	6.335.263.320	6.594.167.240	7.260.530.329
CH ₄	2.917	3.041	3.277
N ₂ O	169.010	175.895	193.683
NO _x	5.473.071	5.714.950	6.405.637
CO	4.374.112	4.269.159	4.182.700
NM VOC	793.952	692.605	496.353

Tabela 20: Emissões em voos internacionais utilizando a metodologia Tier 3a

Emissões Internacionais	Tier 3a	Tier 3a	Tier 3a
Emissões (kg)	2005	2006	2007
CO ₂	4.843.627.209	4.677.417.676	5.083.944.685
CH ₄	588	561	611
N ₂ O	134.779	130.101	141.369
NO _x	1.408.747	1.361.691	1.468.711
CO	921.708	965.483	938.675
NMVOG	183.650	186.507	190.186
Consumo QAV	1.528.105.227	1.475.070.335	1.602.824.304

7.3 Compatibilização das estimativas obtidas com métodos Tier 1 e Tier 3a

O método descrito na seção 5 foi empregado para construir uma série temporal consistente a partir dos dados obtidos com os dois *tiers* diferentes, para os gases que tiveram suas emissões estimadas com ambos os métodos. A comparação entre os valores de emissão obtidos com a aplicação dos dois métodos é ilustrada nas figuras a seguir.

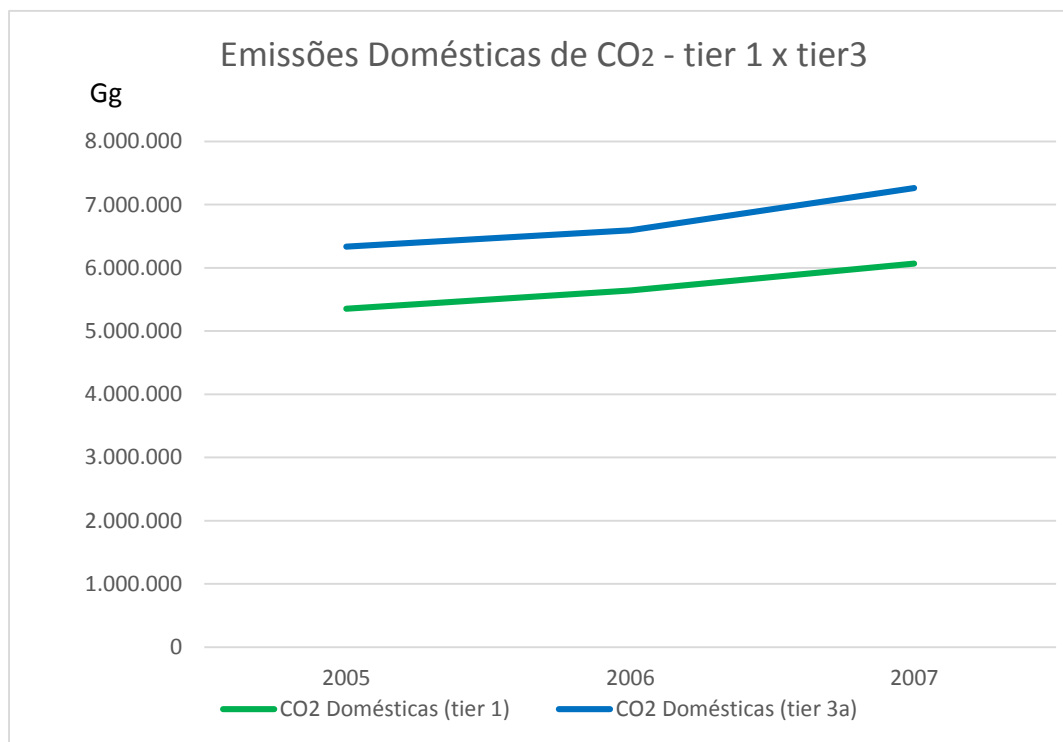


Figura 10: Comparação dos resultados Tier 1 e Tier 3a para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de CO₂

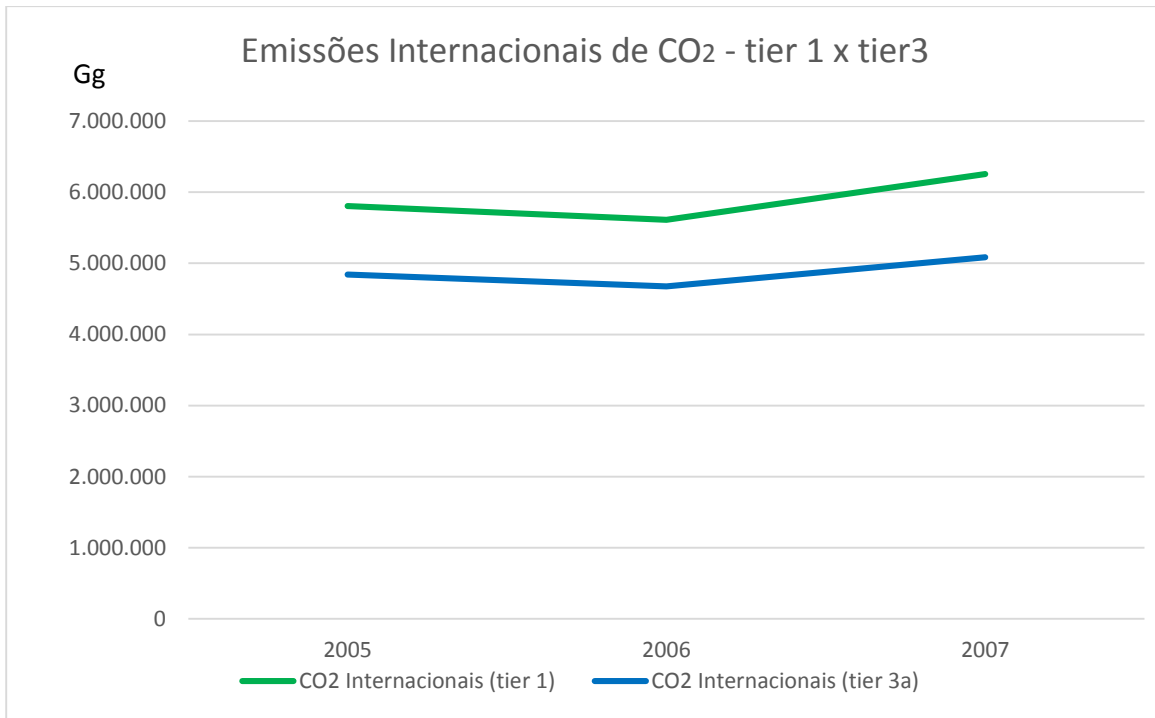


Figura 11: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de CO₂

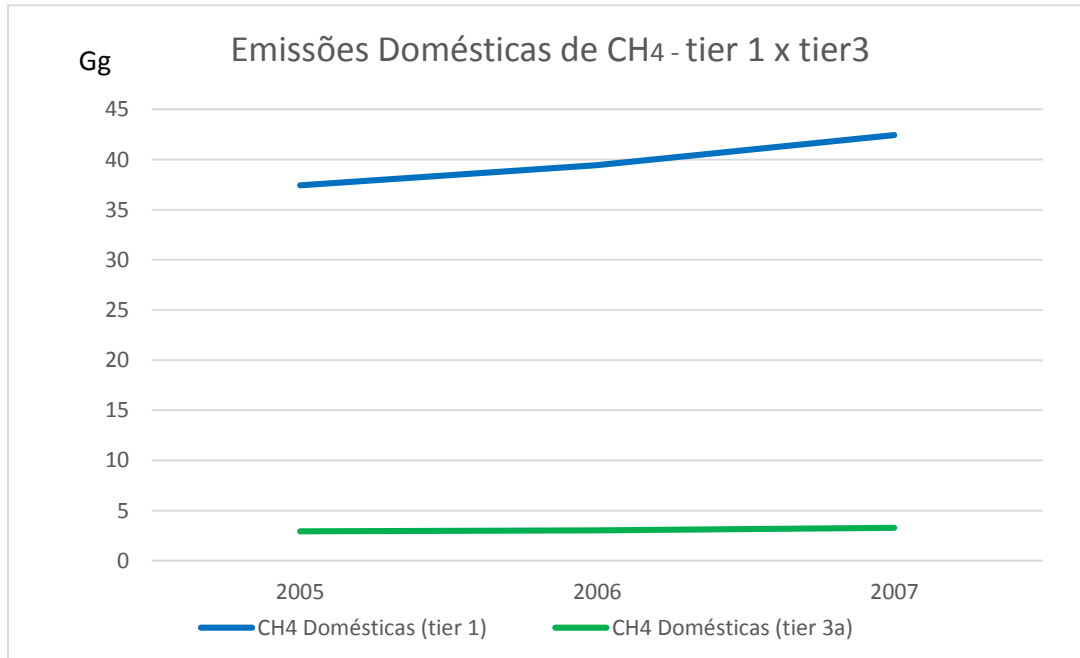


Figura 12: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de CH₄

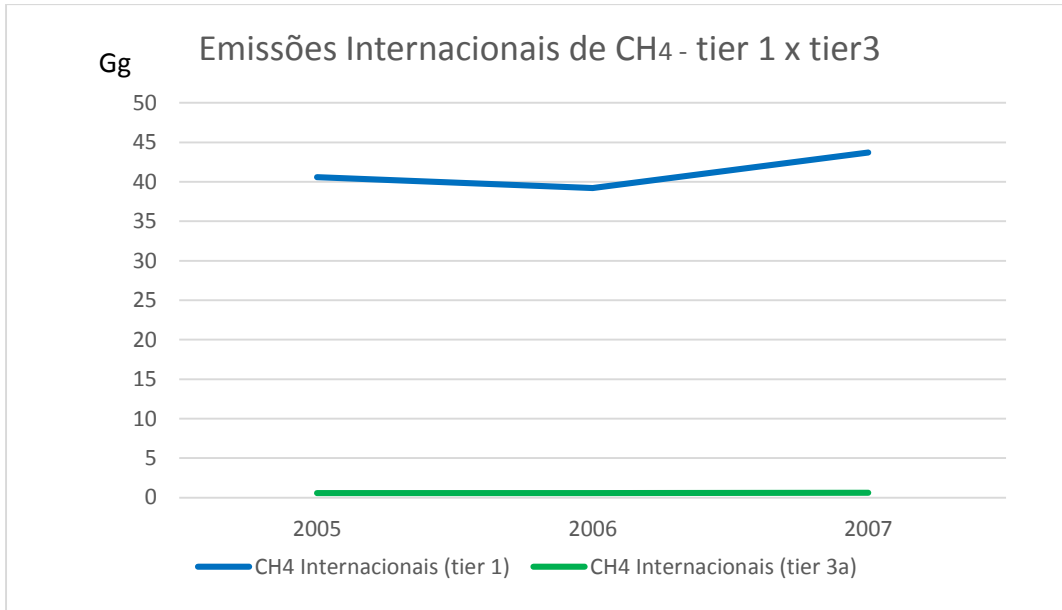


Figura 13: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de CH₄

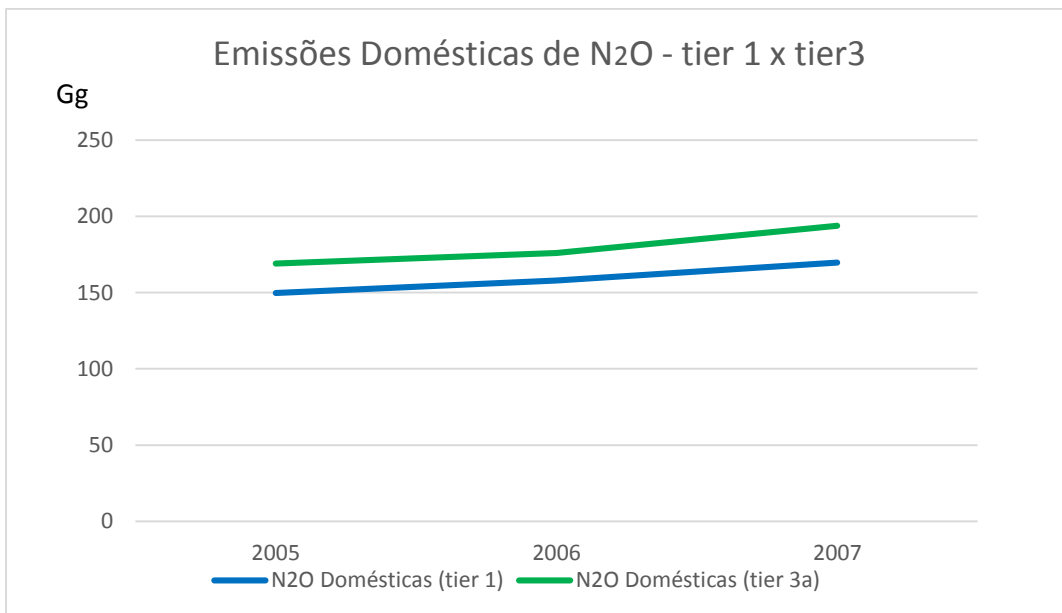


Figura 14: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de N₂O

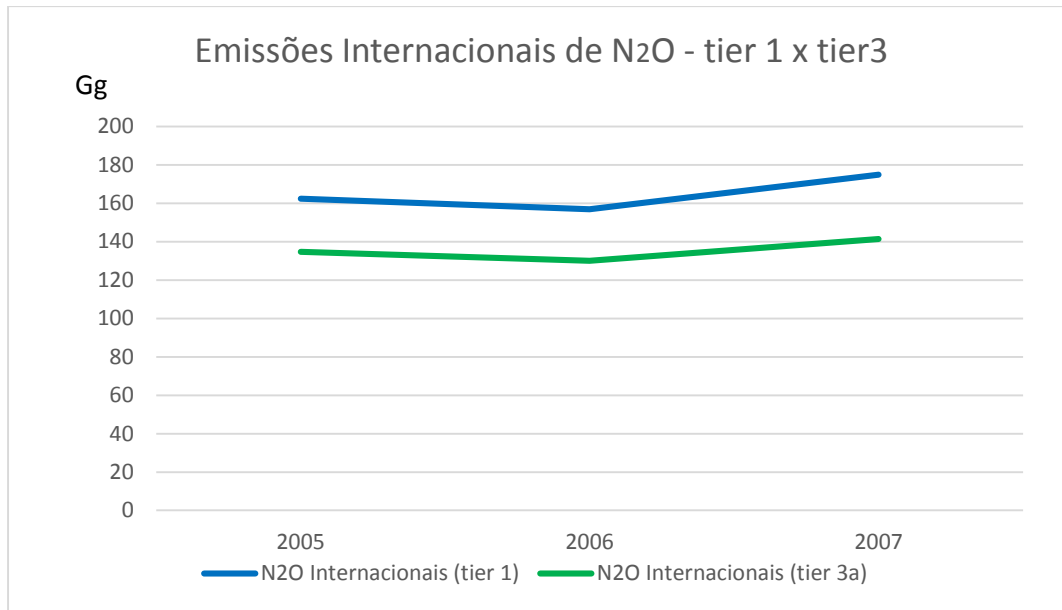


Figura 15: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de N₂O

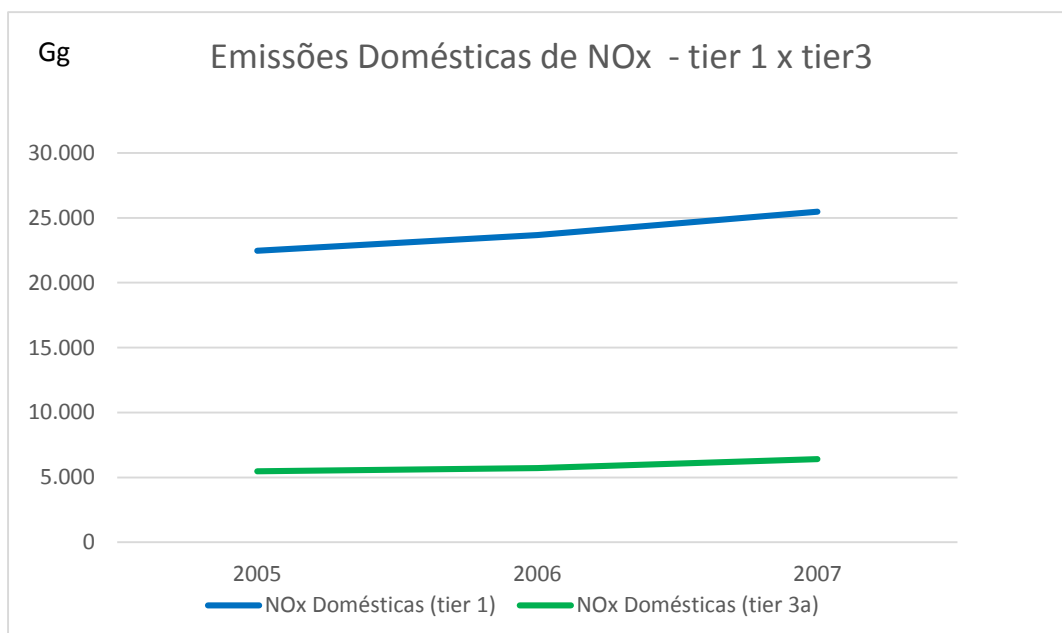


Figura 16: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de NO_x

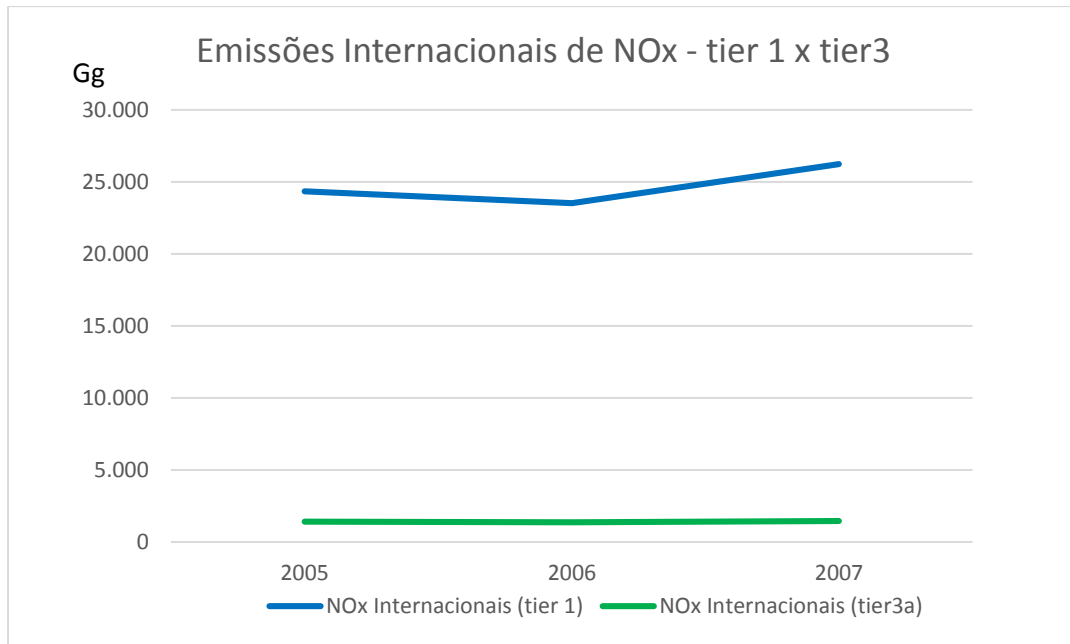


Figura 17: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de NOx

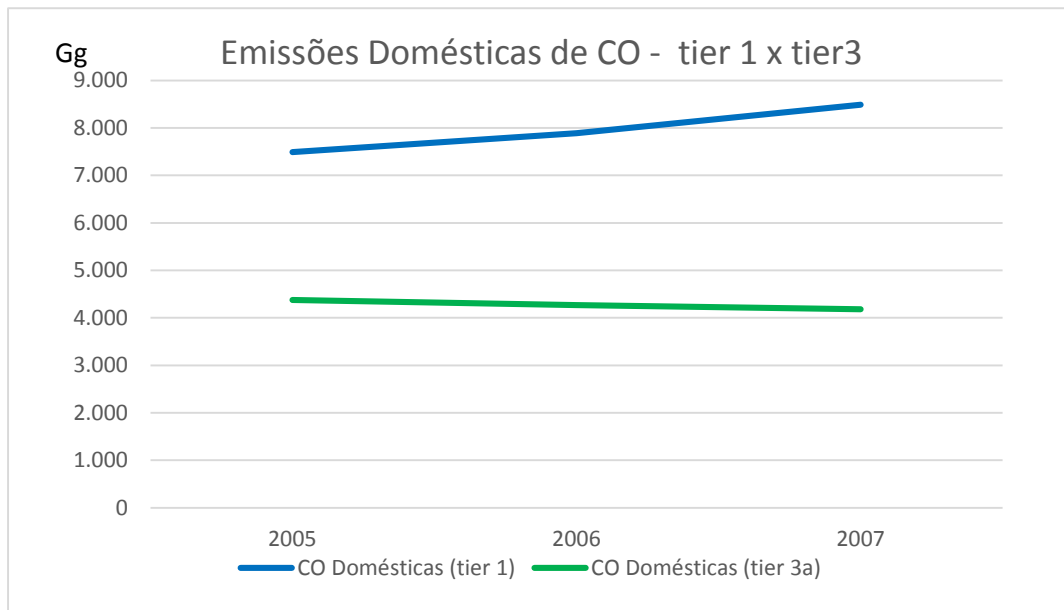


Figura 18: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de CO

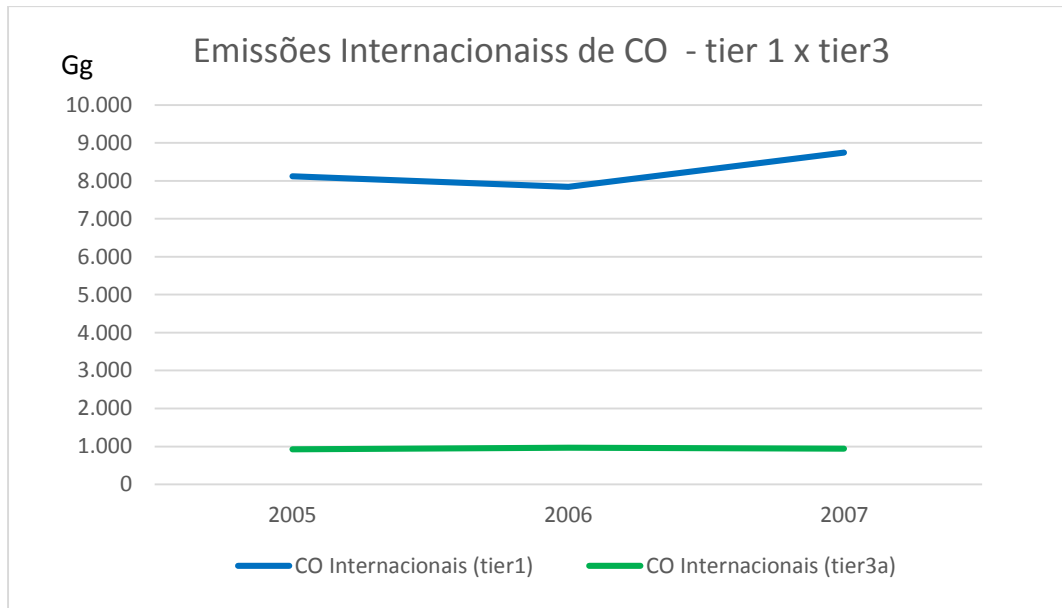


Figura 19: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de CO

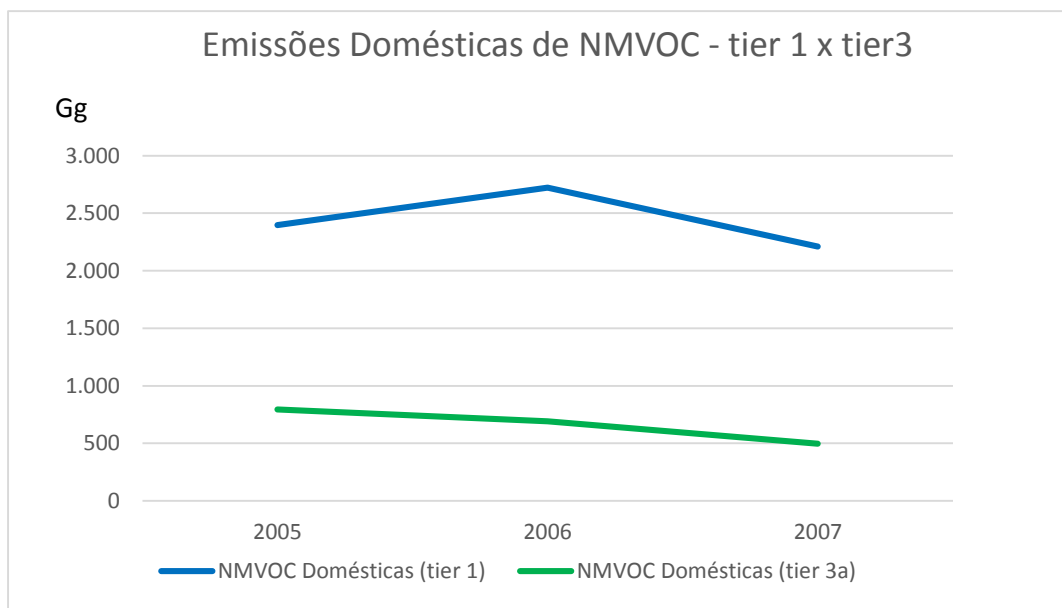


Figura 20: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões domésticas de NMVOC

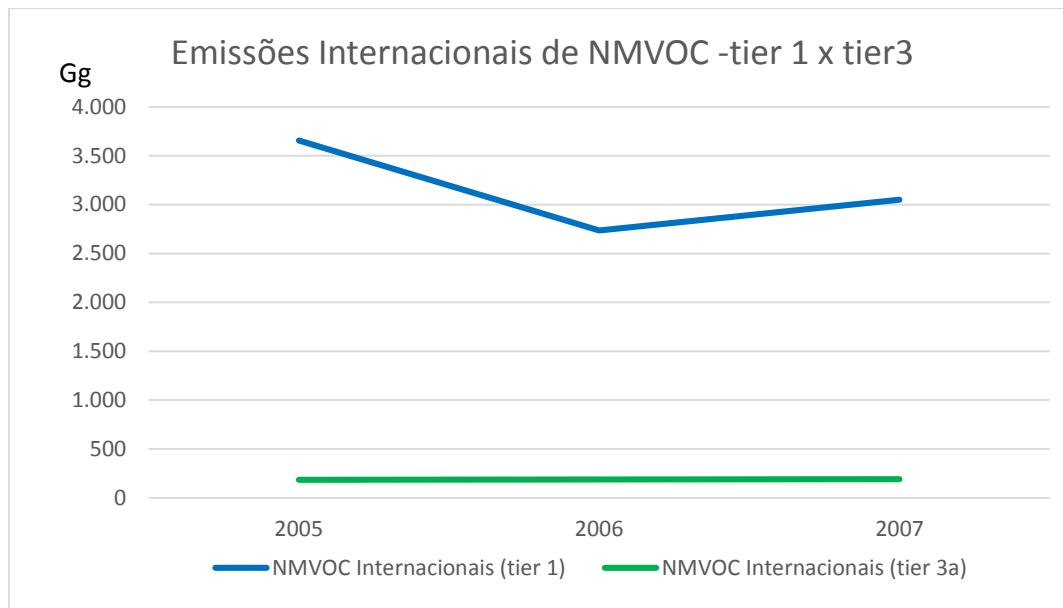


Figura 21: Comparação dos resultados *Tier 1* e *Tier 3a* para os anos de 2005 a 2007 - emissões internacionais de NMVOC

As figuras acima refletem não somente o ajuste no combustível como também nos fatores de emissão de cada *tier*. No *Tier 3a* os fatores de emissão dependem do regime de operação do motor nas diversas fases do voo enquanto no *Tier 1* esta variação não é captada. Os fatores de ajuste para cada gás são os seguintes:

Tabela 21: Fator de Ajuste entre *Tier 3a* e *Tier 1*

Gás	Fator de Ajuste Tier 3 ^a /Tier 1
Combustível doméstico*	1,18
Combustível internacional*	0,83
CH ₄ doméstico	0,08
CH ₄ internacional	0,01
N ₂ O doméstico	1,13
N ₂ O internacional	0,82
NO _x doméstico	0,25
NO _x internacional	0,06
CO doméstico	0,54
CO internacional	0,11
NMVOC doméstico	0,27
NMVOC internacional	0,06

* ajuste do combustível e, portanto, CO₂

7.4 Resultados consolidados

São apresentados a seguir os resultados consolidados para as emissões de cada gás avaliado para o período de 1990 a 2013.

Tabela 22: Emissões em voos domésticos

Ano	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	NM VOC
	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)
1990	4.232	0,003	0,11	4,1	33,0	1,3
1991	4.606	0,003	0,13	4,6	31,0	1,3
1992	3.854	0,003	0,10	3,7	26,5	1,1
1993	4.180	0,003	0,11	4,1	29,7	1,2
1994	4.446	0,003	0,12	4,4	35,2	1,3
1995	4.732	0,003	0,13	4,6	33,1	1,3
1996	4.509	0,003	0,12	4,3	34,8	1,3
1997	5.324	0,004	0,14	5,1	39,5	1,5
1998	5.857	0,004	0,15	5,6	42,5	1,7
1999	6.017	0,004	0,16	5,8	39,9	1,7
2000	6.206	0,004	0,17	6,1	40,3	1,7
2001	6.626	0,004	0,18	6,4	38,1	1,7
2002	6.677	0,004	0,18	6,5	34,6	1,7
2003	5.871	0,004	0,16	5,7	32,0	1,5
2004	6.193	0,004	0,17	6,0	33,2	1,6
2005	6.316	0,004	0,17	6,0	30,7	1,3
2006	6.563	0,004	0,18	6,2	29,3	1,2
2007	7.220	0,004	0,20	6,9	30,4	1,0
2008	7.325	0,004	0,20	7,0	32,8	1,0
2009	8.330	0,005	0,23	8,1	34,3	1,0
2010	9.751	0,005	0,27	9,3	38,4	1,2
2011	10.863	0,006	0,30	10,2	39,5	1,3
2012	11.218	0,006	0,31	10,6	42,6	1,4
2013	10.978	0,006	0,30	10,4	42,7	1,4

Tabela 23: Emissões em voos internacionais

Ano	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	NM VOC
	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)	(Gg)
1990	4.366	0,0005	0,12	1,3	0,9	0,2
1991	3.147	0,0004	0,09	0,9	0,6	0,2
1992	3.610	0,0004	0,10	1,0	0,7	0,2
1993	3.619	0,0004	0,10	1,1	0,7	0,2
1994	3.539	0,0004	0,10	1,0	0,7	0,2
1995	4.520	0,0005	0,13	1,3	0,9	0,2
1996	5.541	0,0007	0,15	1,6	1,1	0,3
1997	5.911	0,0007	0,16	1,7	1,1	0,3
1998	6.621	0,0008	0,18	1,9	1,3	0,3
1999	5.397	0,0007	0,15	1,6	1,1	0,3
2000	4.626	0,0006	0,13	1,4	0,9	0,2
2001	5.388	0,0007	0,15	1,6	1,1	0,3
2002	4.381	0,0005	0,13	1,3	0,9	0,2
2003	4.035	0,0005	0,12	1,2	0,8	0,2
2004	4.303	0,0005	0,12	1,3	1,1	0,2
2005	4.707	0,0006	0,13	1,4	1,2	0,2
2006	4.543	0,0006	0,13	1,4	1,0	0,2
2007	4.936	0,0006	0,14	1,5	0,9	0,2
2008	5.675	0,0007	0,16	1,7	1,2	0,2
2009	5.167	0,0006	0,15	1,6	1,0	0,2
2010	5.784	0,0007	0,17	1,8	1,1	0,2
2011	6.410	0,0007	0,18	2,0	1,2	0,2
2012	6.896	0,0008	0,20	2,1	1,3	0,2
2013	6.972	0,0008	0,20	2,1	1,3	0,2

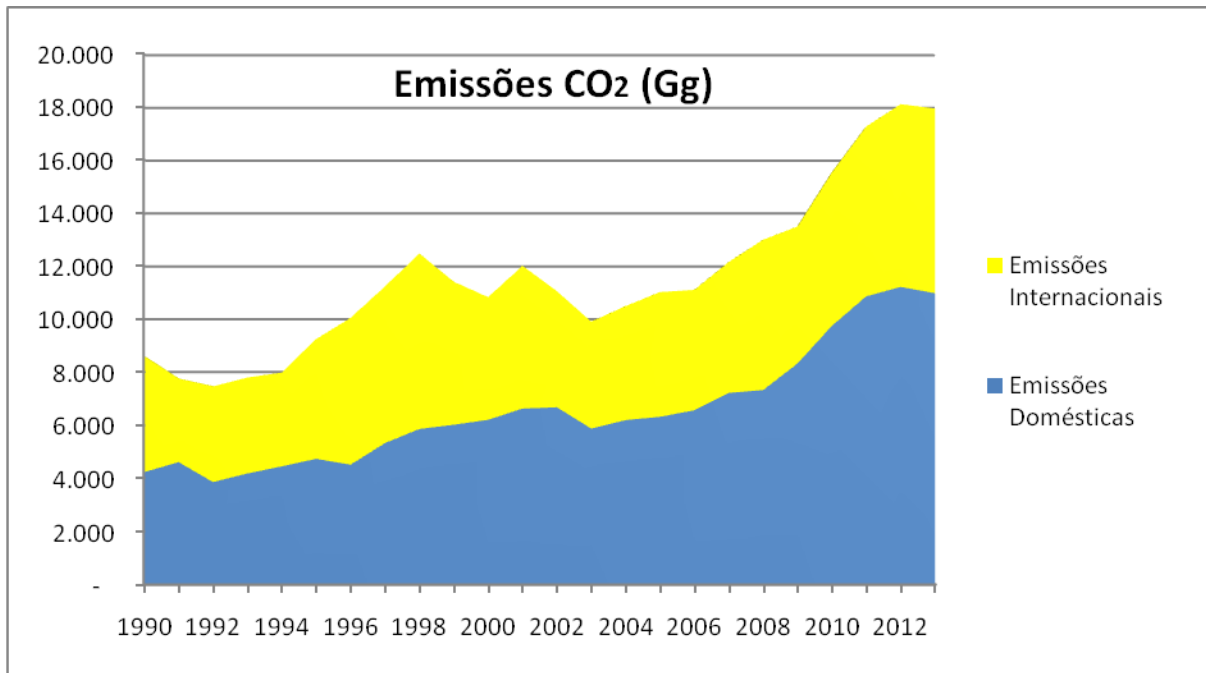


Figura 22: Emissões anuais de CO₂

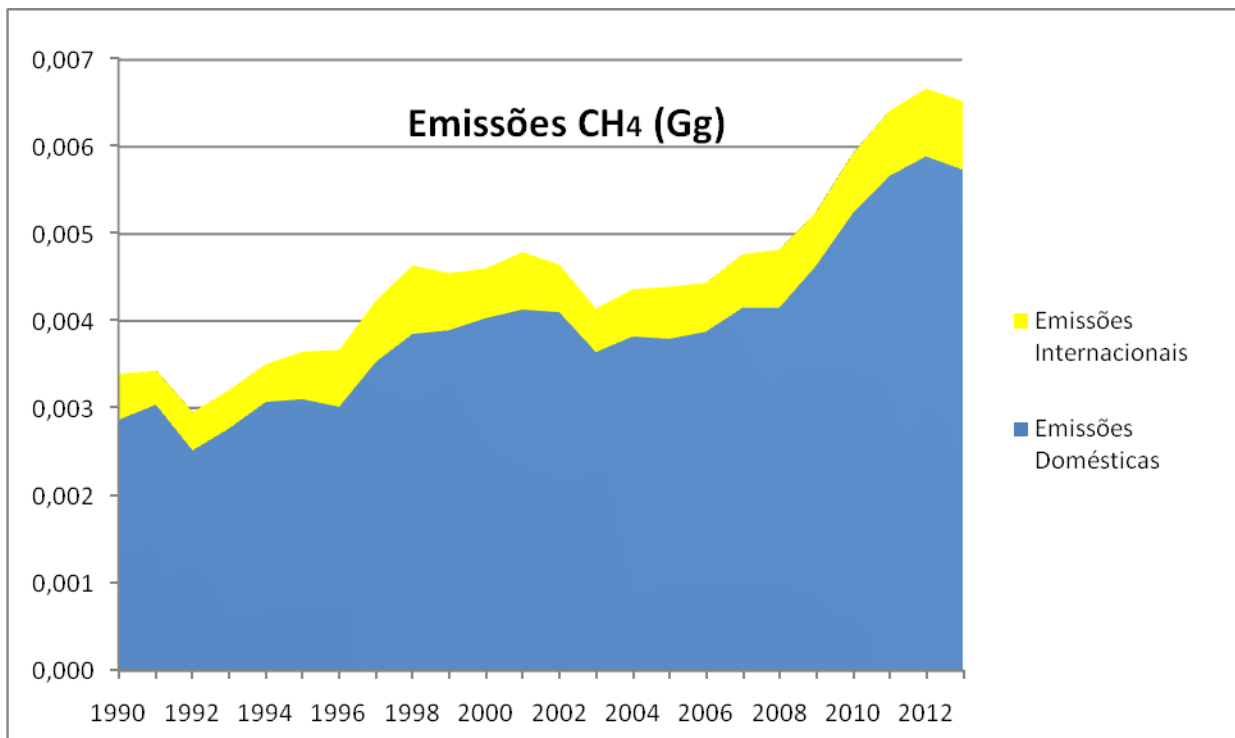


Figura 23: Emissões anuais de CH₄

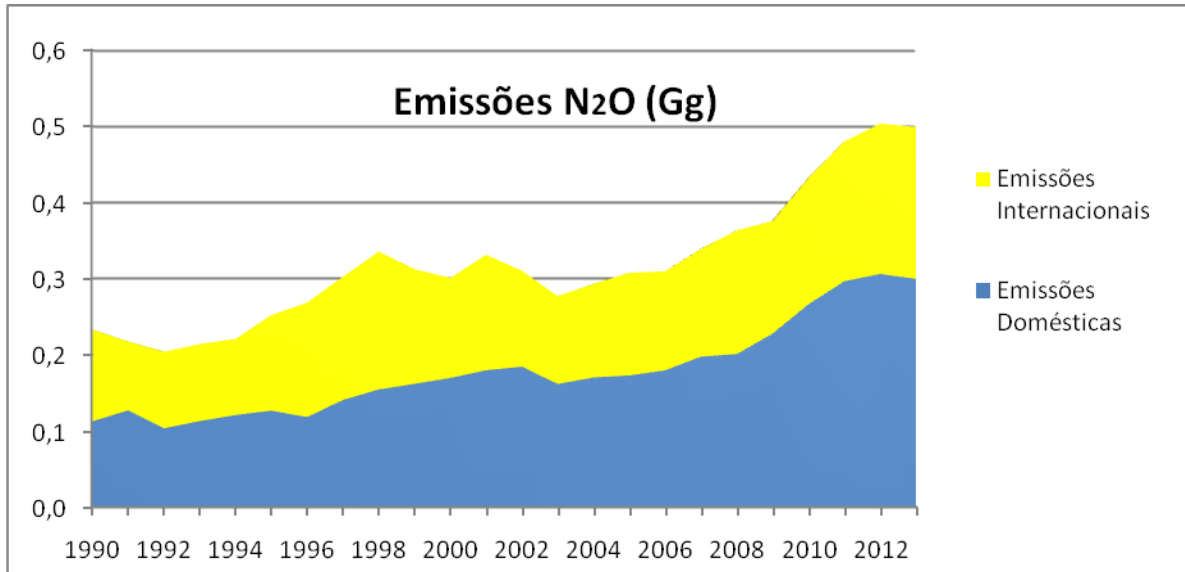


Figura 24: Emissões anuais de N₂O

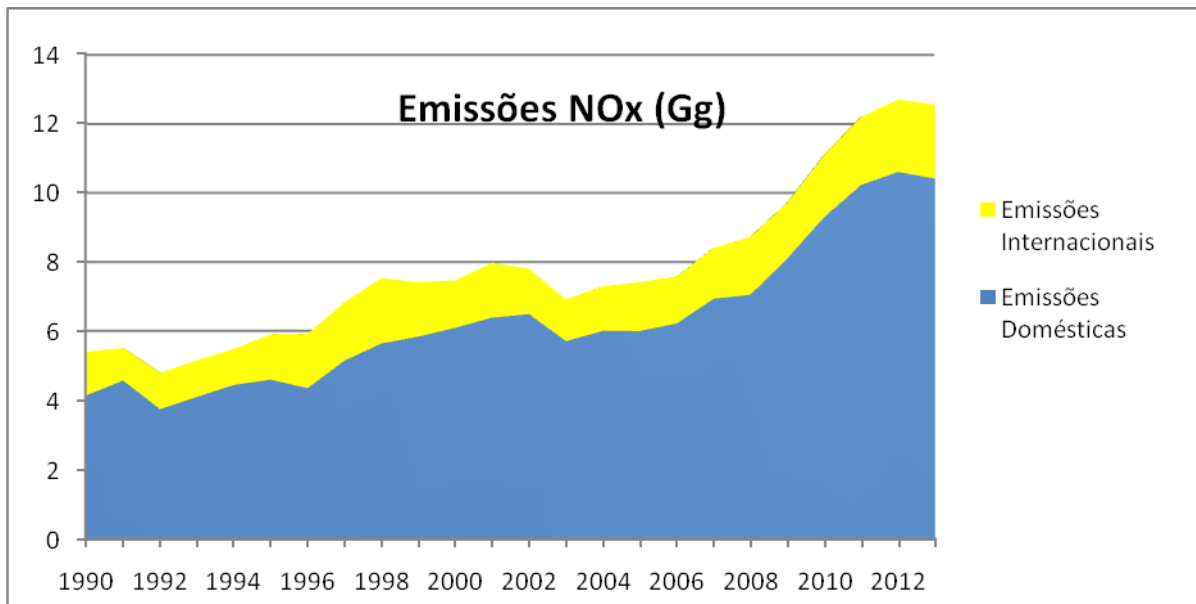


Figura 25: Emissões anuais de NO_x

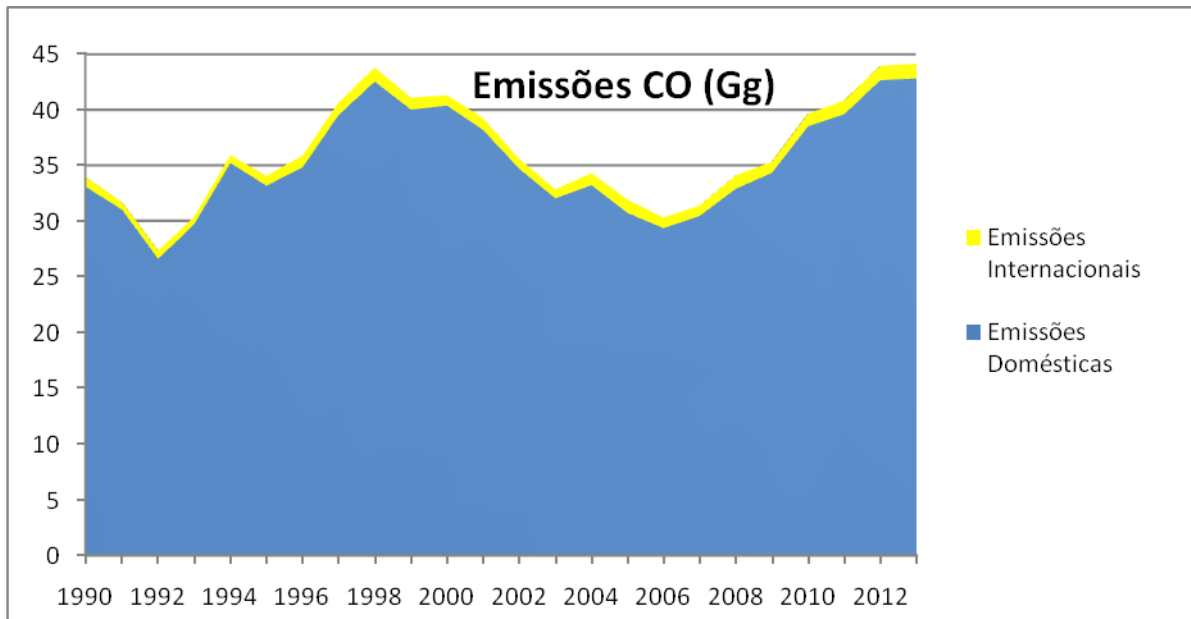


Figura 26: Emissões anuais de CO

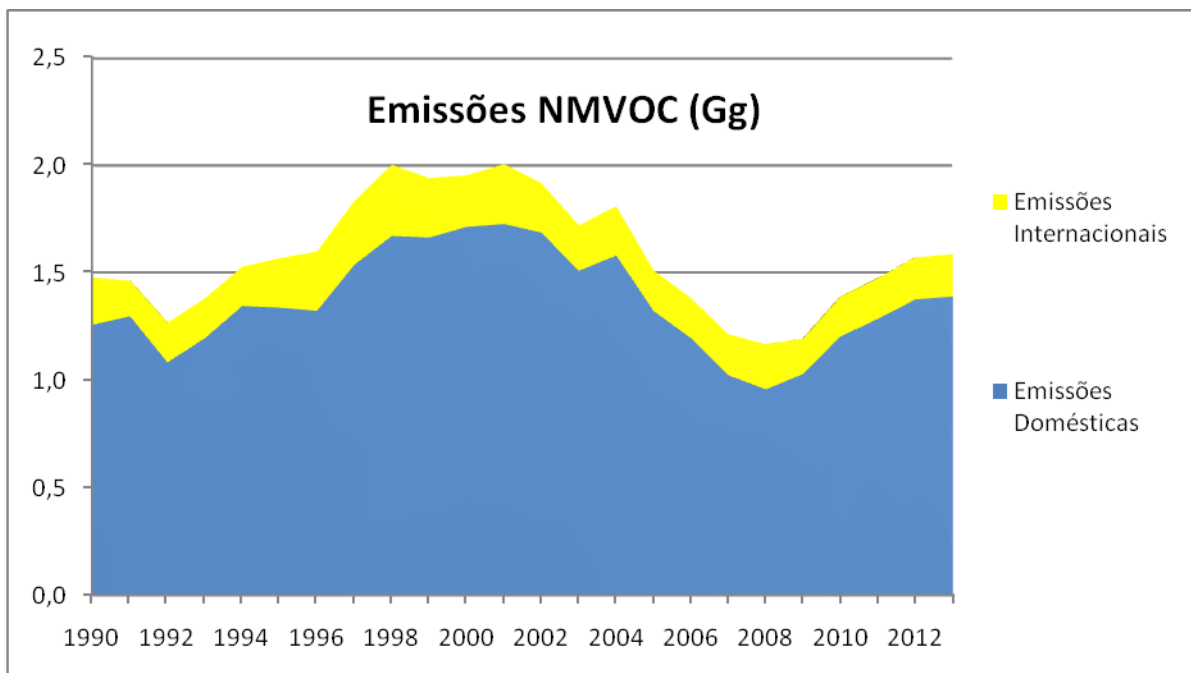


Figura 27: Emissões anuais de NMVOC

8. Análise de incertezas

8.1. Nas fontes de dados

O BIMTRA é uma agregação de informações coletadas em diversos postos de controle do espaço aéreo em todo o Brasil. O aspecto positivo a esse respeito é que os movimentos registrados consistem em observações diretas, e não em previsões ou estimativas. Por outro lado, espera-se encontrar nele eventuais erros de entrada e omissões. Uma estimativa destes erros devido a incoerências nas informações dos campos, aeroporto de origem, aeroporto de destino e tipo da aeronave foi feita através de um código que comparava os dados do BIMTRA com os dados constantes na tabela de aeródromos nacionais, divulgada pela ANAC, e com a tabela de códigos de aeronaves divulgada pela ICAO. Os resultados são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 24: Registros incorretos BIMTRA

Ano	Registros		Diferença
	Total	Não coincidentes	(%)
2005	969.400	508	$5,1 \times 10^{-3}$
2006	1.010.469	408	$3,9 \times 10^{-3}$
2007	1.083.656	565	$5,1 \times 10^{-4}$
2008	1.010.267	322	$3,1 \times 10^{-4}$
2009	1.322.749	411	$3,1 \times 10^{-4}$
2010	1.697.923	1105	$6,5 \times 10^{-4}$
2011	1.670.403	1301	$7,8 \times 10^{-4}$
2012	220.029	69	$3,1 \times 10^{-4}$

Observa-se uma taxa de erro média da ordem de 10^{-4} .

8.2. Nas premissas adotadas

A inexistência de um modelo globalmente aceito para estimar as emissões de helicópteros automaticamente exclui a possibilidade de se calcular o consumo de combustível e das emissões deste tipo de aeronave. Apesar de os motores que impulsionam os helicópteros terem uma tração nominal não muito elevada e, por conseguinte, não se esperar que as emissões deles sejam significativas, a grande quantidade destes equipamentos na frota brasileira deve levar a uma participação não desprezível no total das emissões e consumo de QAV.

No momento, por falta de informação, ainda não é possível considerar variações nos regimes de operação dos motores por aeroporto que porventura estejam sendo aplicadas pelas companhias aéreas, como *de-rating* dos motores ou taxi com um motor só. Tais variações podem ter impacto significativo nas emissões em ciclo LTO, diminuindo o total de emissões abaixo de 3000 ft.

Alguns dados de tempo de taxi médio em aeroportos, sem operação comercial, nacionais são estimados. Um melhor conhecimento destes tempos pode ser fator na melhoria da precisão dos

cálculos de emissão local. Em particular, também por falta de informação disponível, não foram consideradas as emissões durante a corrida de desaceleração no pouso, quando o acionamento do reverso pode elevar o regime do motor a até 30%. Toda esta etapa foi considerada como pouso sem reverso e o regime do motor estando o tempo todo em 7%.

Os tempos médios de parada das aeronaves nos aeroportos são estimados em 75 minutos, baseados na experiência média do setor, este tempo é aplicado a todas as aeronaves, ou seja, aviação regular, geral e cargueiros. Na medida em que tempos reais por aeroportos puderem ser implementados no sistema este cálculo tende a refletir mais a realidade da operação. A adoção por alguns aeroportos de equipamentos de alimentação elétrica e condicionamento de ar de solo deverá permitir ainda futuras reduções nos tempos de utilização das APUs o que possivelmente impactará positivamente as emissões deste tipo de motor e o total de emissões em ciclo LTO.

8.3. Na reconciliação do consumo de combustível calculado e emissões com os totais de QAV distribuídos no Brasil

A metodologia *Tier3a* adotada pelo MIATA permite que se calcule o consumo de combustível diretamente a partir da base de movimentos das aeronaves. Pelos motivos apresentados nos itens antecedentes e mais outros possíveis, como a possibilidade de haver estocagem de combustível, perdas por vazamento e etc., estes resultados nem sempre conferem com os totais informados de venda de QAV pela ANP através do Anuário Brasileiro do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis. No entanto, a comparação dos valores informados pela ANP com os valores calculados pode servir como uma estimativa da precisão do Sistema. Além disso, os *Guidelines* do IPCC recomendam que as emissões totais nacionais sejam computadas com base nas vendas de combustíveis declaradas. Desta forma, as emissões são ajustadas baseadas nos resultados desta comparação. O ajuste nos dados de emissão é feito ano a ano com base nas diferenças apuradas. A conversão entre m^3 e Kg de combustível é feita com base na densidade média do QAV nacional, a mesma utilizada no Relatório de Referência da aviação ao Inventário Nacional de 2010 que é de 0,799 Kg/l⁸. Abaixo tabela comparativa:

⁸Nota-se uma diferença de 2,3% nas emissões de GEE a menor quando calculadas a partir do conteúdo energético do QAV em comparação aos cálculos feitos a partir da massa do combustível, sugerindo a necessidade de revisão da densidade do QAV utilizada no BEN.

Tabela 25: Comparativo combustível consumido (ANP) x (BEN) x combustível estimado (MIATA)

Dados Venda de QAV Distribuidoras - ANP (tabela 3.11)			Dados BEN. (tabela 3.6.3.a mais bunker matriz ampliada)		Comparativo					
Ano	(m ³)	(kg)	(m ³)	(kg)	Consumo Calculado MIATA (Kg)	(%) Calculado/ ANP	(%) Calculado/ ANP	Fator de correção - ANP	Fator de correção B.E.N.	Dif ANP x B.E.N.
2005	4.429.475	3.539.150.921	4.463.956	3.566.700.844	3.330.466.938	94,10%	93,38%	1,063	1,071	0,778%
2006	4.465.962	3.568.303.665	4.466.390	3.568.645.610	3.338.168.802	93,55%	93,54%	1,069	1,069	0,010%
2007	4.890.597	3.907.586.807	4.893.557	3.909.952.043	3.622.217.314	92,70%	92,64%	1,079	1,079	0,061%
2008	5.227.500	4.176.772.126	5.360.885	4.283.347.115	3.715.726.500	88,96%	86,75%	1,124	1,153	2,552%
2009	5.428.384	4.337.278.816	5.407.131	4.320.297.669	4.119.419.709	94,98%	95,35%	1,053	1,049	-0,392%
2010	6.250.101	4.993.830.941	6.252.946	4.996.103.854	4.811.346.590	96,35%	96,30%	1,038	1,038	0,046%
2011	6.955.355	5.557.328.667	6.957.589	5.559.113.611	4.969.791.441	89,43%	89,40%	1,118	1,119	0,032%
2012	7.291.993	5.826.302.047	7.294.698	5.828.463.702	5.342.682.105	91,70%	91,67%	1,091	1,091	0,037%
2013	7.224.826	5.772.635.577			5.627.744.705	97,49%		1,026	0,000	
Densidade QAV (kg/l)	0,799	Conversão 1 tep = 1,217 m ³		1217						

9. Disposições Finais

O método empregado pelo Sistema MIATA - Módulo de Emissões, descrito por este relatório tem uma série de vantagens em relação ao método empregado anteriormente:

Para poluentes como CO₂ (e SO₂, cujos valores estão estimados apenas em ANAC, 2014), ele provê maior precisão no cálculo da separação entre o tráfego doméstico e o internacional e, conseqüentemente, as emissões devidas a cada um.

Para outros gases poluentes, o método provê maior precisão nas estimativas de consumo de combustível nas fases de LTO e em cruzeiro, tornando possível uma estimativa mais precisa destes gases por fase de voo.

As emissões totais são mais bem estimadas através da quebra e aplicação de fatores de emissão para cada aeronave e para cada aeroporto em cada fase de LTO e cruzeiro.

O método permite a agregação dos valores de emissão e consumo totais por diversos parâmetros diferentes, permitindo a construção de séries históricas por aeronave, aeroporto, estado de origem, país ou continente de destino, entre outros.

Novos dados sobre os tempos das fases LTO, por aeroporto, podem facilmente ser atualizados nas tabelas de cálculo à medida que mais dados operacionais se tornarem disponíveis.

Referências Bibliográficas

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

ANAC, 2014. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas da Aviação Civil 2014 ano base 2013. 74p.

ANAC, 2012. AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). Anuário Estatístico do Transporte Aéreo de 2012. 188p.

ANP, 2013. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIODIESEL. Dados Estatísticos Mensais, disponível em <http://www.anp.gov.br/?dw=11031> (Acessado em nov/2013)

DECEA, 2014. DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO. BIMTRA - Banco Informações do Movimento de Tráfego Aéreo, 2005 - 2013, acessível à ANAC através do Termo de Cooperação Específico Nº002/ DECEA-ANAC/2008.

EASA, 2013. EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY - ICAO Emissions Databank updated april/2013, disponível em <http://easa.europa.eu/environment/edb/aircraft-engine-emissions.php>

EMEP/EEA, 2013. EUROPEAN MONITORING AND EVALUATION PROGRAMME. Emission Inventory Guidebook 2013, disponível em <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013>

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

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.

FOI, 2013. SWEDISH DEFENSE RESEARCH AGENCY. Base de dados de emissões de motores Turbohélice. <http://www.foi.se/en/Our-Knowledge/Aeronautics/FOIs-Confidential-database-for-Turboprop-Engine-Emissions/>

IPCC, 1996. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, UK Meteorological Office, Bracknell

IPCC, 1999. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Aviation and the global Atmosphere. 373p.

IPCC, 2000. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2000 Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Chapter 2 - ENERGY. 95p.

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

MCTI, 2004. MINISTÉRIO DA CIENCIA E TECNOLOGIA. 1ª Comunicação Nacional à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

MCT, 2010. MINISTÉRIO DA CIENCIA E TECNOLOGIA. 2ª Comunicação Nacional à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. 2V.

MME, 2013. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional 2013, Ano Base 2012.

OACI, 2010. ORGANIZAÇÃO DA AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL. ICAO Annex 16 “International standards and recommended practices, Environmental protection”, Volume II “Aircraft engine emissions”. Disponível em http://www.caa.govt.nz/ICAO/ICAO_Compliance.htm

OACI, 2011. ORGANIZAÇÃO DA AVIAÇÃO CIVIL INTERNACIONAL. Doc 9889 Airport Air Quality Manual - First Edition - 2011. 200p. WIESEN, P. et al., 1994, ‘Nitrous oxide and methane emissions from aero engines’. Geophysics Research Letters 21(18), 2027-2030.