

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**CENTRO DE FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS EM TRANSPORTES**

**PROCEDIMENTOS PARA A ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS DE GASES DO**  
**EFEITO ESTUFA DA AVIAÇÃO CIVIL BRASILEIRA**

**DANIEL NICOLATO EPITÁCIO PEREIRA**

**ORIENTADOR: ADYR DA SILVA, PHD**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO DA AVIAÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E-TA-006A/2009**  
**BRASÍLIA/DF: OUTUBRO/2009**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**CENTRO DE FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS EM TRANSPORTES**

**PROCEDIMENTOS PARA A ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS DE GASES DO**  
**EFEITO ESTUFA DA AVIAÇÃO CIVIL BRASILEIRA**

**DANIEL NICOLATO EPITÁCIO PEREIRA**

**MONOGRAFIA DO CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO SUBMETIDA AO CENTRO**  
**DE FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS EM TRANSPORTES DA**  
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS**  
**PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ESPECIALISTA EM GESTÃO DA AVIAÇÃO**  
**CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**ADYR DA SILVA, PhD (UnB)**  
**(Orientador)**

---

**JOSÉ ALEX SANT'ANNA, PhD (UnB)**  
**(Examinador)**

---

**JOSÉ MATSUO SHIMOISHI, PhD (UnB)**  
**(Examinador)**

---

**ANDERSON RIBEIRO CORREIA, PhD (ITA)**  
**(Examinador)**

**BRASÍLIA/DF, 22 DE OUTUBRO DE 2009**

## FICHA CATALOGRÁFICA

EPITÁCIO PEREIRA, DANIEL NICOLATO.

Procedimentos para a Elaboração de Inventários de Gases do Efeito Estufa da Aviação Civil Brasileira.

xii, 59p, 210x297 mm (CEFTRU/UnB, Especialista, Gestão da Aviação Civil, 2009).

Monografia de Especialização – Universidade de Brasília, Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes, 2009.

- |    |                     |     |                         |
|----|---------------------|-----|-------------------------|
| 1. | Mudança Climática   | 2.  | Efeito Estufa           |
| 3. | Emissões da Aviação | 4.  | Inventários de Emissões |
| I. | CEFTRU/UnB          | II. | Título (série)          |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

EPITÁCIO PEREIRA, D. N. (2009), Procedimentos para a Elaboração de Inventários de Gases do Efeito Estufa da Aviação Civil Brasileira, Monografia de Especialização, Publicação E-TA-006A/2009, Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 59p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Daniel Nicolato Epitácio Pereira

TÍTULO DA MONOGRAFIA: Procedimentos para a Elaboração de Inventários de Gases do Efeito Estufa da Aviação Civil Brasileira.

GRAU/ANO: Especialista / 2009.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de especialização e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de especialização pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Daniel Nicolato Epitácio Pereira

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha querida Ana Beatriz, aos meus amigos e à minha família por todo o carinho e apoio que tenho recebido.

Agradeço à Agência Nacional de Aviação Civil por me possibilitar participar desse curso.

Na época em que este trabalho começou a ser desenvolvido, a Agência Nacional de Aviação Civil, através do NEPA — Núcleo de Estudos em Proteção Ambiental, da Gerência Geral de Suporte e Desenvolvimento, parte da Superintendência de Estudos, Pesquisa e Capacitação, se engajou em um projeto de elaboração de inventários de emissões de gases do efeito estufa da aviação civil, em parceria com o Ministério da Ciência e Tecnologia.

Por estar sendo um dos responsáveis pela execução desse projeto, avalio que houve uma simbiose entre o mesmo, com enfoque mais prático, e este trabalho, com uma perspectiva mais teórica. Assim, se faz necessário reconhecer a significativa contribuição para parte desta pesquisa da equipe do NEPA e, em particular, do servidor Alexandre Rodrigues Filizola, que tem estado à frente desse projeto, juntamente comigo.

Este documento foi preparado com L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

## **RESUMO**

### **PROCEDIMENTOS PARA A ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS DE GASES DO EFEITO ESTUFA DA AVIAÇÃO CIVIL BRASILEIRA**

O clima da Terra esteve, ao longo de toda sua história, em constante transformação, mas acredita-se que, nos últimos 50 anos, ele tenha experimentado variações excepcionalmente rápidas. Essas variações são normalmente associadas a uma intensificação do efeito estufa, ligada ao desenvolvimento de atividades humanas. A aviação contribui para essa intensificação, e conseqüentemente para a mudança climática, através, especialmente, das emissões dos motores de aeronaves, que incluem gases do efeito estufa e outros agentes associados ao fenômeno. Diversos gases e outros constituintes capazes de contribuir para o efeito estufa. Nesse contexto, inventários de emissões de gases do efeito estufa da aviação civil representam ferramentas para a avaliação, e, indiretamente, para o controle desses impactos. Este trabalho apresenta uma breve revisão sobre os impactos da aviação sobre o clima global e sobre o papel dos inventários de emissões, e discute as opções mais adequadas para o Brasil na elaboração de seus próprios inventários, em termos de metodologia e dados a serem adotados. Essa análise é feita a partir de um levantamento das diferentes fontes de dados existentes no contexto nacional e de sua adequação a cada um dos possíveis métodos para o cálculo das emissões. Algumas soluções são apontadas, incluindo procedimentos para o uso de métodos detalhados com ou sem acesso a bases de dados de acesso controlado. Constata-se que é possível desenvolver de forma regular inventários detalhados de emissões para a aviação, e propõem-se medidas para alcançar resultados ainda mais acurados, através da garantia de disponibilização de informações mais completas.

## **ABSTRACT**

### **PROCEDURES FOR GREENHOUSE GAS INVENTORIES FOR BRAZILIAN CIVIL AVIATION**

Earth's climate has been in constant transformation through its history, but it is believed that, during the last 50 years, it has experienced exceptionally fast changes. Those changes are usually linked to an intensification of the greenhouse effect, which in turn is connected to human activities. Aviation plays a role on this intensification, and therefore on climate change, mainly through emissions of aero engines, which include direct and indirect greenhouse gases. Thus, aviation greenhouse gas emission inventories are tools for the evaluation, and, indirectly, for the mitigation of those impacts. In this work, we present a review of the impacts of civil aviation on the global climate and of the role of emission inventories. It is also discussed which options are most suited to Brazil in the process of making of its own inventories, including the definition of methodology and data to be adopted. This analysis is based on a review of the several data sources available on the national context and their compatibility with each of the possible methods for emission calculations. Some solutions are identified, including procedures for estimation with the detailed methods that are feasible either with or without access to restricted data sources. It is concluded that it is possible to regularly develop detailed emission inventories for civil aviation. Some measures are suggested to ensure access to more complete data, which may lead to more accurate results.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	PROBLEMA	1
1.2	JUSTIFICATIVA	1
1.3	HIPÓTESE	2
1.4	OBJETIVOS	2
1.5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
1.6	METODOLOGIA	3
1.7	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	4
<b>2</b>	<b>AVIAÇÃO E EFEITO ESTUFA</b>	<b>5</b>
2.1	MUDANÇA CLIMÁTICA	5
2.2	AQUECIMENTO GLOBAL E EFEITO ESTUFA	6
2.3	FORÇAMENTO RADIATIVO	9
2.4	O PAPEL DA AVIAÇÃO	10
2.4.1	Origem das emissões	11
2.4.2	Dióxido de carbono	12
2.4.3	Metano	12
2.4.4	Óxido nitroso	13
2.4.5	Óxido nítrico e dióxido de nitrogênio	13
2.4.6	Vapor d'água	13
2.4.7	Aerosóis	14
2.4.8	Trilhas de condensação	14
2.4.9	Formação de cirrus	15
2.4.10	Efeito total	16
<b>3</b>	<b>INVENTÁRIOS DE GASES DO EFEITO ESTUFA DA AVIAÇÃO CIVIL</b>	<b>18</b>
3.1	INVENTÁRIOS DE GASES DO EFEITO ESTUFA	18

3.2	IMPORTÂNCIA DOS INVENTÁRIOS DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA . . . . .	19
3.2.1	Cumprir compromissos internacionais . . . . .	19
3.2.2	Informar a sociedade e a comunidade científica . . . . .	20
3.2.3	Fundamentar decisões políticas . . . . .	20
3.2.4	Contribuir para a preservação do meio-ambiente . . . . .	21
3.3	PRINCÍPIOS APLICÁVEIS À ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS NACIONAIS DE EMISSÕES . . . . .	21
3.3.1	Transparência . . . . .	21
3.3.2	Consistência . . . . .	22
3.3.3	Comparabilidade . . . . .	22
3.3.4	Completeza . . . . .	22
3.3.5	Acurácia . . . . .	22
3.4	METODOLOGIA PARA A ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS . . . . .	23
<b>4</b>	<b><i>TIERS DO IPCC PARA O CÁLCULO DE EMISSÕES DA AVIAÇÃO</i></b> . . . . .	<b>24</b>
4.1	NOMENCLATURA . . . . .	24
4.2	<i>TIER 1</i> . . . . .	24
4.3	<i>TIER 2</i> . . . . .	25
4.3.1	<i>Tier 2a</i> . . . . .	26
4.3.2	<i>Tier 2b</i> . . . . .	27
4.3.3	<i>Tier 2c</i> . . . . .	28
4.4	<i>TIER 3</i> . . . . .	28
4.4.1	<i>Tier 3a</i> . . . . .	29
4.4.2	<i>Tier 3b</i> . . . . .	29
4.5	DADOS EXIGIDOS POR CADA <i>TIER</i> . . . . .	29
<b>5</b>	<b>FONTES DE DADOS NO CONTEXTO ATUAL BRASILEIRO</b> . . . . .	<b>31</b>
5.1	CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS . . . . .	31
5.1.1	Anuário estatístico da ANP . . . . .	31
5.1.2	Estatísticas adicionais da ANP . . . . .	32
5.1.3	Anuário estatístico da ANAC . . . . .	32
5.1.4	Estatísticas detalhadas da ANAC . . . . .	33
5.1.5	Consultas a empresas distribuidoras de combustível e companhias aéreas . . . . .	33

5.2	MOVIMENTOS DE AERONAVES . . . . .	34
5.2.1	Vôos autorizados pela ANAC (HOTRAN) . . . . .	34
5.2.2	Vôos regulares ativos (VRA) . . . . .	34
5.2.3	Estatísticas detalhadas da ANAC. . . . .	35
5.2.4	Movimentos registrados pelo controle do espaço aéreo . . . . .	35
5.2.5	Consultas a empresas aéreas e administrações aeroportuárias . . . . .	36
5.3	FATORES E OUTROS DADOS RELATIVOS A EMISSÕES . . . . .	36
5.4	RESUMO DAS PROPRIEDADES DAS FONTES DE DADOS . . . . .	37
<b>6</b>	<b>ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS DA AVIAÇÃO CIVIL BRASILEIRA . . . . .</b>	<b>40</b>
6.1	QUADRO ATUAL DOS INVENTÁRIOS DA AVIAÇÃO BRASILEIRA . . . . .	40
6.2	USO DAS FONTES DE DADOS — CENÁRIOS . . . . .	40
6.3	CENÁRIO I. . . . .	41
6.3.1	<i>Tier 1</i> . . . . .	41
6.3.2	<i>Tier 2b</i> . . . . .	42
6.3.3	<i>Tier 2c</i> . . . . .	43
6.4	CENÁRIO II . . . . .	45
6.4.1	<i>Tier 1</i> . . . . .	45
6.4.2	<i>Tier 2b</i> . . . . .	45
6.4.3	<i>Tier 2c</i> . . . . .	47
6.4.4	<i>Tier 3a</i> . . . . .	49
6.5	OPORTUNIDADE DA APLICAÇÃO DOS <i>TIERS</i> . . . . .	49
6.6	ÁRVORE DE DECISÃO PARA A CONSTRUÇÃO DE INVENTÁRIOS . . . . .	51
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>53</b>
7.1	RESUMO DO DESENVOLVIMENTO . . . . .	53
7.2	ESCOLHA DE MÉTODO PARA OS INVENTÁRIOS BRASILEIROS . . . . .	54
7.3	AVALIAÇÃO DA HIPÓTESE PRIMÁRIA . . . . .	54
7.4	RECOMENDAÇÕES . . . . .	55
7.5	PASSOS FUTUROS . . . . .	56
	<b>BIBLIOGRAFIA . . . . .</b>	<b>57</b>

## LISTA DE TABELAS

2.1	Principais contribuições da aviação para o forçamento radiativo em 2005 . . . .	17
4.1	Relação entre a nomenclatura deste trabalho e a de cada guia do IPCC para os <i>tiers</i> . . . . .	24
4.2	Dados necessários para o emprego de cada <i>tier</i> . . . . .	30
5.1	Resumo das fontes de dados de consumo de combustíveis de aviação no Brasil.	38
5.2	Resumo das fontes de dados de movimentos de aeronaves no Brasil. . . . .	39

## LISTA DE FIGURAS

2.1	Circulação de energia no sistema STA com a ação do efeito estufa. . . . .	8
2.2	Resumo de emissões da aviação relacionadas ao efeito estufa. . . . .	16
6.1	Fluxo de dados proposto para inventários <i>tier</i> 1 no cenário I. . . . .	42
6.2	Fluxo de dados proposto para inventários <i>tier</i> 2b no cenário I. . . . .	44
6.3	Fluxo de dados proposto para inventários <i>tier</i> 2c no cenário I. . . . .	46
6.4	Fluxo de dados proposto para inventários <i>tier</i> 2b no cenário II. . . . .	48
6.5	Fluxo de dados proposto para inventários <i>tier</i> 2c no cenário II. . . . .	50
6.6	Árvore de decisão para a aplicação de <i>tiers</i> do IPCC no Brasil. . . . .	52

## LISTA DE ABREVIACOES

ANAC	Agência Nacional de Aviao Civil
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ATS	Serviço de Tráfego Aéreo ( <i>Air Traffic Service</i> )
AVGAS	Gasolina de Aviao
BAV	Boletim de Alterao de Vo
BIMTRA	Banco de Informaoes do Movimento de Tráfego Aéreo
DAC	Departamento de Aviao Civil
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
EEA	Agência Européia do Ambiente ( <i>European Environment Agency</i> )
EMEP	<i>European Monitoring and Evaluation Programme</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
GAO	<i>Government Accountability Office</i>
HOTRAN	[base de dados] Horário de Transporte
IAC	Instruo de Aviao Civil
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas ( <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
LTO	[ciclo] Pouso-Decolagem ( <i>Landing-Take Off</i> )
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
NC	Nível de Compreensão Científica
NRC	<i>National Research Council</i>
ONU	Organizao das Nao Unidas
QAV	Querosene de Aviao
SISCEAB	Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro
STA	[sistema] Superfície-Topo da Atmosfera
UNFCCC	Conveno-Quadro das Nao Unidas Sobre Mudança do Clima ( <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> )
VRA	[base de dados] Vôos Regulares Ativos

# **1 INTRODUÇÃO**

Este trabalho se propõe a analisar as diferentes formas pelas quais o Brasil poderia relatar à sociedade e à comunidade internacional as emissões de gases do efeito estufa pela sua aviação civil, e a propor uma solução em termos de metodologia e dados a serem adotados.

Para tanto, as características de cada um dos métodos já estabelecidos são analisadas, juntamente com as fontes de dados aplicáveis e adaptações que possam ser necessárias.

Algumas possíveis soluções, em termos de procedimentos e escolhas metodológicas, são propostas, assim como medidas que poderiam permitir obter resultados mais precisos.

## **1.1 PROBLEMA**

O problema para cuja solução este trabalho se propõe a contribuir pode ser assim enunciado:

“Como elaborar com regularidade um inventário de emissões de gases do efeito estufa para a aviação civil brasileira, de forma elevar a confiabilidade das estimativas de impacto da atividade sobre a mudança climática global?”

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

É predominante, entre cientistas que investigam mudanças climáticas, a posição de que as alterações verificadas recentemente são causadas, principalmente, por atividades humanas, inclusive a aviação. A comunidade internacional tem demonstrado grande interesse nos impactos da aviação sobre o clima.

A elaboração de inventários nacionais de emissões é prática acordada entre as partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima, para mensuração da produção de gases do efeito estufa, que é, por sua vez, requisito importante para a avaliação dos impactos ambientais de cada atividade. Além disso, inventários são importantes para informar a sociedade, assim

como a comunidade acadêmica que desenvolve pesquisas a respeito dos efeitos das atividades humanas sobre o clima.

Apesar de existirem metodologias padronizadas acordadas para a produção desses inventários, estas se apresentam com um grau considerável de flexibilidade, para que possam se adequar à realidade de cada país que se propõe a adotá-las. Da mesma forma, diferentes fontes de dados estão disponíveis em cada país para a elaboração de inventários.

Assim, uma análise de metodologias e fontes de dados para a elaboração de inventários dentro do contexto brasileiro pode servir de base para um procedimento regular de compilação de inventários de emissões da aviação civil brasileira, e assim contribuir para que o País cumpra com seus compromissos com a sociedade e com a comunidade internacional.

### **1.3 HIPÓTESE**

A hipótese primária a ser confirmada ou refutada neste trabalho é a de que é possível, para o Brasil, desenvolver, com regularidade e de forma padronizada, um inventário detalhado de emissões de gases do efeito estufa da aviação civil.

Por detalhado entenda-se que, no mínimo, atenda às especificações *tier 2b* do IPCC, as quais são descritas no capítulo 3.

### **1.4 OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo principal contribuir para a atividade de acompanhamento das emissões brasileiras apontando uma metodologia eficiente e compatível com a nossa realidade, e em consonância com os compromissos assumidos internacionalmente pelo Brasil, para elaboração continuada de inventários de emissões pela aviação civil.

Como objetivos adicionais, o trabalho se propõe a mapear as fontes de dados estatísticos relevantes para a elaboração de inventários existentes no Brasil, e a formular propostas que, se adotadas, possam modificar positivamente o cenário de elaboração de inventários no Brasil, permitindo a obtenção de resultados mais precisos.

## 1.5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base teórica para o desenvolvimento deste trabalho se constitui em três frentes principais.

No que se refere ao problema da mudança climática e do aumento do efeito estufa, a fundamentação se construiu sobre livros e artigos da área de ciências atmosféricas, tendo como referência central o livro *Introduction to Atmospheric Chemistry*, de Jacob (1999).

Quanto ao papel da aviação no quadro de mudança climática, o relatório especial *Aviation and the Global Atmosphere*, do IPCC (1999), que resume grande parte do conhecimento científico no tema, foi a referência principal, acompanhado de artigos sobre assuntos específicos.

No que se refere aos inventários de emissão de gases do efeito estufa, os guias de construção de inventários do IPCC constituem a referência principal, já que além de determinarem a metodologia em si, apresentam discussões e conceitos a respeito do tópico (IPCC, 1996, 2000, 2006).

## 1.6 METODOLOGIA

Para chegar a uma solução para o problema proposto, primeiramente foi feito um estudo detalhado das metodologias estabelecidas para a elaboração de inventários de emissões para aviação. Cada variante foi estudada em detalhes, e as semelhanças e diferenças entre elas foram traçadas. Essa etapa foi realizada através do estudo de documentos de orientação publicados por autoridades reconhecidas nesse tópico.

Na etapa seguinte, investigaram-se as possíveis formas de se satisfazer os requerimentos de cada método, em termos de dados. Durante essa parte do trabalho, foi levantado o material que serviu de base para testar a hipótese primária adotada. Para isso, primeiramente se identificou os “atores” que, possivelmente, possuiriam as informações. Em seguida procurou-se por dados estatísticos públicos. Em alguns casos foi possível identificar dados de acesso restrito, que, quando possível, foram também estudados. No caso de órgãos públicos, a legislação pertinente foi também analisada, com o intuito de identificar obrigações de coleta e divulgação de dados definidas por lei.

A partir desse estudo, se avaliou a hipótese adotada, e então foram elaboradas propostas de fluxos de trabalho para a elaboração continuada de inventários, assim como de possíveis melhorias na coleta de dados pelos atores envolvidos em cada área.

Vale ressaltar que a elaboração de um inventário de emissões em si vai além do escopo deste trabalho, que se propõe a apenas analisar as opções metodológicas disponíveis para essa tarefa.

## **1.7 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA**

No capítulo 2 são apresentados os conceitos e dados relevantes para este trabalho acerca do efeito estufa e do papel da aviação no mesmo. No capítulo 3, os inventários de emissões, instrumentos essenciais para a avaliação desse efeito, são apresentados. O capítulo 4 trata da metodologia aplicável à elaboração de inventários e descreve cada método individualmente, listando os respectivos requisitos no que se refere a fontes de dados.

Um estudo das possíveis fontes de dados para a elaboração de inventários no contexto brasileiro é desenvolvido no capítulo 5, e soluções em termos de combinações de métodos e conjuntos de dados são apresentadas no capítulo 6. Finalmente, conclusões, propostas e comentários finais são apresentados no capítulo 7.

## **2 AVIAÇÃO E EFEITO ESTUFA**

Neste capítulo são apresentados conceitos e dados básicos acerca das alterações climáticas para as quais contribuem os gases do efeito estufa, e o papel da aviação nesse quadro.

Esses tópicos são abordados de forma superficial, com o intuito de apenas contextualizar o problema tratado neste trabalho. Para uma discussão mais profunda sobre mudança climática e efeito estufa em geral, ver Jacob (1999), e, quanto ao papel da aviação, ver IPCC (1999).

### **2.1 MUDANÇA CLIMÁTICA**

Como praticamente todos os sistemas naturais, o nosso planeta está em constante transformação. O clima da Terra já sofreu grandes variações ao longo de sua história. No entanto, acredita-se que recentemente — especificamente, nos últimos 50 anos — o clima tenha sofrido variações excepcionalmente rápidas, ao ponto de, possivelmente, ameaçarem a própria vida na Terra.

De fato, essas mudanças climáticas já influenciam em muitos aspectos as atividades humanas. Os principais fenômenos, associados à mudança climática, que têm sido observados são: o aumento da temperatura média à superfície da Terra, a elevação do nível do mar, alterações nos ciclos hidrológicos (precipitações, degelos, evaporação etc.), ocorrência mais frequente de fenômenos extremos como grandes tempestades e secas severas, redução na cobertura de gelo do Ártico e acidificação dos oceanos.

Além desses fenômenos, sofremos indiretamente os efeitos da mudança climática sobre as demais espécies de seres vivos. Cada ecossistema existente em nosso planeta é intimamente conectado ao clima que o suporta, de forma que mudanças neste implicam em necessidade de adaptação dos seres vivos.

A maioria das espécies pode se adaptar a mudanças pequenas ou graduais de forma que o ecossistema como um todo se mantém, mesmo que precise para isso se transformar de forma significativa. Por outro lado, mudanças rápidas ou de grande magnitude podem representar uma ameaça à sobrevivência de um ecossistema e mesmo ocasionar na extinção de várias espécies. Em ambos os casos, mas especialmente no último, pode haver reflexos negativos para a sobrevivência e o bem estar dos seres humanos, que se utilizam de vários ecossistemas para a sua

manutenção e para o desenvolvimento de suas atividades (NRC, 2008), além, é claro, dos danos irreversíveis à biodiversidade.

Portanto, uma mudança rápida nas condições climáticas do Planeta, como a que experimentamos atualmente, implica em obstáculos diretos e indiretos para a sobrevivência e o desenvolvimento da espécie humana.

Quase todos os fenômenos citados são decorrentes de um aumento da quantidade de calor retido entre a superfície terrestre e o topo da atmosfera — evento denominado aquecimento global. A exceção é a acidificação dos oceanos, que decorre diretamente do aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, e que, portanto, tem causas em comum com o aquecimento global.

## **2.2 AQUECIMENTO GLOBAL E EFEITO ESTUFA**

O sistema físico definido entre a superfície terrestre e o topo da atmosfera (STA, daqui em diante) recebe constantemente energia externa, essencialmente do Sol, sob a forma de radiação, e esta o percorre antes de ser devolvida ao espaço. O aquecimento global consiste em um aumento da quantidade de calor presente em um dado instante no sistema STA. Esta depende da quantidade de energia recebida e também da forma como esta é transportada no interior do sistema até escapar do mesmo.

Variações no fluxo de radiação recebida do Sol são bem estudadas e verifica-se que estamos, realmente, em um período de aumento do fluxo de energia solar. A corrente dominante dentro da comunidade científica considera, no entanto, que esse aumento por si só não pode explicar a taxa observada de aquecimento global; e que esta, em verdade, se deve principalmente a uma intensificação do efeito estufa — um dos principais fenômenos que interferem no transporte de energia no sistema STA — e, em particular, àquela de caráter antropogênico<sup>1</sup> (IPCC, 2007; JACOB, 1999; NRC, 2008).

O efeito estufa é o fenômeno em que energia solar captada pelo sistema STA é nele retida devido à presença de certos gases e outros elementos presentes na atmosfera, como alguns tipos de aerossóis e de nuvens. É apresentada a seguir uma breve descrição do efeito, na qual alguns processos são deixados de lado (para uma explicação detalhada, ver Jacob (1999), por exemplo).

---

<sup>1</sup>Ou seja, originada em atividades humanas.

A Terra recebe continuamente radiação eletromagnética proveniente do Sol. O espectro de radiação do Sol tem seu máximo na região espectral correspondente à luz visível. Aproximadamente metade da radiação solar está contida nessa região. A atmosfera terrestre é essencialmente transparente à luz visível, de forma que a maior parte dessa radiação atinge a superfície terrestre e, desta, grande parte é absorvida.

A radiação absorvida pela superfície terrestre causa o aquecimento da mesma. Como todo corpo aquecido, esta passa a emitir radiação eletromagnética. No caso da superfície terrestre, essas emissões se dão predominantemente em comprimentos de onda entre  $5\mu\text{m}$  e  $50\mu\text{m}$ , na região espectral do infravermelho.

Diferentemente do que ocorre com a luz visível, no entanto, existem certos gases na atmosfera que são eficientes em absorver (e emitir) radiação nessa faixa espectral, através de transições moleculares vibracionais e rotacionais-vibracionais como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , hidrocarbonetos etc. Esses são denominados “gases do efeito estufa”. Os gases mais abundantes na atmosfera ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) não pertencem a esse grupo.

Dessa forma, parte da radiação emitida pela superfície da Terra, ao invés de ser devolvida imediatamente ao espaço, é absorvida por moléculas de gases do efeito estufa, e a atmosfera assim se aquece. Essas moléculas reemitem a energia obtida, através de radiação ainda na faixa do infravermelho. Essa radiação pode então ser absorvida e reemitida um número arbitrário de vezes até escapar para o espaço. Parte dessa radiação acaba atingindo a superfície, aquecendo-a novamente e sendo emitida uma vez mais para a atmosfera, onde pode escapar ou ser absorvida novamente, e assim em diante. Esse processo é ilustrado na figura 2.1.

Além de gases, existem outros elementos que, por suas propriedades ópticas, podem influenciar esse processo, como aerossóis e certos tipos de nuvens, por exemplo.

Dessa forma, além do aquecimento direto da superfície pela radiação solar, temos uma atmosfera também aquecida, e constantemente emitindo radiação adicional para a superfície. A temperatura na superfície terrestre é maior, portanto, do que seria caso não existissem os gases do efeito estufa.

É importante acrescentar que a ocorrência do efeito estufa, em si, não implica em um desequilíbrio climático — é possível que, mesmo ocorrendo esse fenômeno, toda a radiação incidente no sistema STA seja emitida de volta para o espaço. Nesse caso a temperatura na superfície seria constante, apesar de estabilizada em um nível mais elevado do que o que se observaria sem o efeito estufa.



Figura 2.1: Diagrama mostrando, de forma simplificada, a circulação de energia no sistema STA com a ação do efeito estufa. Para facilitar a compreensão, alguns processos são omitidos (reflexão da radiação solar, espalhamento, transporte convectivo de energia, processamento de radiação solar infravermelha etc.). Losangos são usados para identificar processos de absorção de radiação, e círculos para identificar processos de emissão. O diagrama mostra como a superfície terrestre recebe energia adicional graças à presença de gases do efeito estufa.

Também cabe ressaltar que esse efeito, por si só, não é nocivo. Muito pelo contrário, ele, juntamente com outros processos, é responsável pela manutenção da vida na Terra, já que proporciona temperaturas propícias a esta na superfície, e reduz sua variação.

O que se acredita que está ocorrendo atualmente é que as concentrações atmosféricas de gases do efeito estufa estejam aumentando continuamente devido, principalmente, a atividades humanas. Essas emissões antropogênicas de gases do efeito estufa cresceram 70% entre 1970 e 2004 (IPCC, 2007).

Assim, o efeito estufa estaria se intensificando, e, como consequência desse fenômeno, uma quantidade cada vez maior de calor estaria circulando no sistema, provocando um aumento progressivo da temperatura na superfície da Terra.

### **2.3 FORÇAMENTO RADIATIVO**

Uma vez que se conheça a magnitude do aumento da concentração de certo gás do efeito estufa na atmosfera, é, em princípio, possível estimar o aumento correspondente na temperatura da superfície da Terra. No entanto, esses cálculos são realizados com modelos climáticos de grande complexidade e, freqüentemente, uma solução diferente será encontrada com a aplicação de cada modelo, devido a diferenças nas premissas de cada um.

Para que se possa avaliar os impactos relativos de cada gás e de cada atividade humana sobre o clima global, se faz necessário adotar uma métrica que seja independente do modelo adotado. Por isso se emprega o conceito de “forçamento radiativo”, que é um dos pontos de partida de grande parte dos modelos climáticos, para descrever os impactos individuais.

Como discutido anteriormente, a ocorrência do efeito estufa não implica, necessariamente em um desequilíbrio do sistema STA. Se as propriedades do sistema, inclusive as concentrações dos gases do efeito estufa, permanecem constantes por um longo tempo, ele tende ao equilíbrio. Nessa situação, a quantidade de energia que entra na atmosfera ao longo de certo período de tempo e a quantidade de energia que sai de volta para o espaço nesse mesmo período se equiparam. Se além desse equilíbrio radiativo, os processos internos de transferência de energia no sistema (tanto radiativos quanto através de convecção e condensação) estiverem estabilizados, se diz que o sistema encontra-se em equilíbrio radiativo-convectivo (NRC, 2005).

O forçamento radiativo relativo a certa mudança no sistema STA é uma medida do desequilíbrio causado por esta alteração em curto prazo — antes que o sistema tenha tempo para retornar ao

equilíbrio. O forçamento radiativo  $\Delta F$  é dado pela expressão

$$\Delta F = F_{in} - F_{out}, \quad (2.1)$$

onde  $F_{in}$  é o fluxo de energia solar que atravessa a tropopausa e  $F_{out}$  é o fluxo de energia vinda da Terra ou da troposfera que atravessa a tropopausa de volta para o espaço<sup>2</sup>. O forçamento radiativo é comumente expresso em unidades de watt por metro quadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Com o tempo, caso não haja novas alterações no sistema, um novo equilíbrio é alcançado. Se o forçamento é positivo, como é o caso dos gases do efeito estufa, esse equilíbrio será caracterizado por temperaturas mais altas. Se for negativo, as novas temperaturas serão mais baixas.

Uma quantificação de forçamento radiativo relativo às emissões de certo gás é usualmente feita a partir de um ano de referência (que se não especificado, assume-se ser 1750), e supõe uma situação idealizada em que, nesse ano, a atmosfera se encontrava em equilíbrio radiativo-convectivo, e a medida expressa o desequilíbrio total induzido, sem levar em conta qualquer adaptação da troposfera no sentido de retornar ao equilíbrio durante o tempo em que as emissões ocorreram (ou seja, mantendo todas suas demais características, inclusive perfil de temperatura, constante). Por outro lado, normalmente assume-se que a estratosfera teve seu equilíbrio radiativo-convectivo restaurado. Esse conceito pode ser aplicado não apenas a aumentos nas concentrações de gases, mas também a outras mudanças que possam ser introduzidas no sistema, como as relativas ao uso do solo ou mesmo variações no fluxo de radiação solar.

De acordo com o IPCC (2007), pode-se afirmar, com alto grau de confiabilidade, que o efeito resultante de todas as atividades humanas desde 1750 até 2007 foi de um forçamento radiativo de cerca de  $+1,6 \text{ W}/\text{m}^2$  (sendo  $+0,6 \text{ W}/\text{m}^2$  e  $+2,4 \text{ W}/\text{m}^2$  os limites inferior e superior, respectivamente).

## 2.4 O PAPEL DA AVIAÇÃO

A aviação tem recebido muita atenção, ao redor do mundo, como emissora de gases do efeito estufa. A contribuição da aviação para as emissões antrópicas de  $\text{CO}_2$ , o gás do efeito estufa mais abordado em discussões políticas sobre o fenômeno, pode ser considerada relativamente

---

<sup>2</sup>Note-se que os limites do sistema a ser considerado se deslocam do topo da atmosfera para a tropopausa, que é o limite entre a troposfera e a estratosfera. Isso se deve ao fato de que perturbações na estratosfera (ou seja, acima da tropopausa) normalmente têm pouco efeito sobre as temperaturas nas superfícies da Terra, por ser fraco o acoplamento dinâmico entre a troposfera e a estratosfera (JACOB, 1999).

pequena, totalizando algo entre 2% e 3%. No entanto, essa parcela de emissões da aviação encontra-se em crescimento (GAO, 2009).

Além disso, a contribuição da aviação para o efeito estufa não se resume ao CO<sub>2</sub> — há outros agentes causadores diretos e indiretos do efeito estufa emitidos por aeronaves. Efeitos peculiares, como desequilíbrios nas concentrações de ozônio e a indução da formação de cirrus, advêm do fato de que aeronaves emitem algumas dessas substâncias diretamente na alta troposfera. Alguns desses problemas podem, em algumas décadas, se igualar ao CO<sub>2</sub> ou mesmo superá-lo no que se refere a impactos climáticos.

Nesta seção, faz-se uma breve apresentação da diversidade de componentes com os quais a aviação interfere no ciclo de energia no sistema STA. Primeiramente é apresentado o mecanismo que origina as emissões de aeronaves. Em seguida, são descritas as emissões que são mais relevantes para o efeito estufa, além de fenômenos como formação de trilhas de condensação e cirrus. Por fim, as estimativas mais recentes para a contribuição total da aviação global são comentadas.

#### 2.4.1 Origem das emissões

Motores aeronáuticos existem em dois grandes grupos: aqueles a pistão, e que empregam, em geral, como combustível a gasolina de aviação; e os a reação, também denominados a jato, que empregam normalmente o querosene de aviação. Embora os dois tipos de motores tenham princípios de funcionamento bem diferentes, ambos são dependentes de um mesmo processo: a combustão.

A combustão consiste na oxidação de um combustível, o que leva à produção de calor. No caso de uma aeronave, o combustível é uma mistura de hidrocarbonetos, e o agente oxidante é o oxigênio contido no ar (que possui também grandes quantidades de nitrogênio). A reação obedecerá à equação geral (em linguagem simplificada):



onde quantidades são intencionalmente omitidas. “Outros” inclui tanto compostos resultantes de combustão imperfeita (como carbono puro, CO, metano e outros compostos orgânicos), quanto aqueles devidos à presença de substâncias adicionais no combustível (como compostos contendo enxofre), e ainda os originados da oxidação do nitrogênio (como N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub>).

As altas temperatura e pressão dos gases resultantes da combustão causam sua expansão, e conferem movimento à aeronave, o que se dá através de mecanismos diferentes de acordo com o tipo de motor. Independentemente do caso, como parte desse processo, os produtos da combustão são liberados na atmosfera.

#### **2.4.2 Dióxido de carbono**

O dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ , é um dos mais bem estudados gases associados ao efeito estufa. É liberado por uma enorme gama de atividades humanas, por ser um produto inevitável do processo de combustão. Justamente por isso, existe uma relação direta entre a massa de carbono contida nos combustíveis consumidos e a massa de  $\text{CO}_2$  liberada.

As emissões de  $\text{CO}_2$  em 1992 por aeronaves em todo o mundo foram estimadas em 140 milhões de toneladas, ou cerca de 2% das emissões antropogênicas desse gás (IPCC, 1999). No ano de 2005 essa quantidade se elevou para 733 milhões de toneladas, ou cerca de 2,5% das emissões totais de  $\text{CO}_2$  (LEE et al., 2009).

O  $\text{CO}_2$  se caracteriza por difundir-se rapidamente pela atmosfera, de forma que não é possível se distinguir, *a posteriori*, as emissões de aeronaves daquelas provenientes de outras atividades.

Um dos maiores problemas envolvendo as emissões de dióxido de carbono é a longa vida média da substância na atmosfera. Cada vez que se tenha uma elevação das concentrações atmosféricas de  $\text{CO}_2$ , a maior parte desse “excesso” será removida naturalmente em cerca de 100 a 300 anos; porém, uma parcela ainda grande permanecerá na atmosfera por milhares de anos (ARCHER, 2005).

#### **2.4.3 Metano**

O metano,  $\text{CH}_4$ , é também um gás do efeito estufa de mistura rápida. Ele é produzido por aeronaves de forma considerável apenas quando em espera, taxando e, possivelmente em parte da aproximação, porque seu coeficiente de emissão — a massa de gás emitido por unidade de massa de combustível consumido — tende a cair rapidamente com o aumento da potência do motor (WIESEN et al., 1994). Assim, emissões de metano por aeronaves em vôo de cruzeiro são normalmente consideradas desprezíveis.

Apesar das emissões ocorridas a baixas altitudes, aumentos na concentração de  $\text{NO}_x$  devidos a emissões de aeronaves causam a destruição do  $\text{CH}_4$ , como discutido a seguir, de forma que, como efeito final, temos que a aviação causa uma queda na concentração de metano.

Estima-se que, em 1992, atmosfera possuía 2% menos metano do que teria se não houvesse aeronaves (IPCC, 1999).

#### **2.4.4 Óxido nitroso**

O óxido nitroso,  $\text{N}_2\text{O}$ , outro gás considerado como causador do efeito estufa, e comumente relatado em inventários, está presente, embora em quantidades muito pequenas (WIESEN et al., 1994), nas emissões aeronáuticas. Sua presença como subproduto da combustão nos motores aeronáuticos decorre do fato de que o oxigênio, que serve como comburente, é obtido do ar, que além deste inclui grandes quantidades de nitrogênio.

#### **2.4.5 Óxido nítrico e dióxido de nitrogênio**

Os  $\text{NO}_x$ , denominação que compreende o óxido nítrico,  $\text{NO}$ , e o dióxido de nitrogênio,  $\text{NO}_2$ , também produtos da combustão ocorrida em motores aeronáuticos, apesar de não contribuírem diretamente para o efeito estufa, têm papel importante como precursores do ozônio,  $\text{O}_3$ , um potente gás do efeito estufa.

Aumentos na concentração de  $\text{NO}_x$  causam um aumento na taxa de formação de  $\text{O}_3$  introduzindo um forçamento radiativo positivo, e, por outro lado, provocam a destruição do metano, introduzindo uma componente de forçamento negativa. O efeito resultante ainda é positivo, de forma que maiores concentrações de  $\text{NO}_x$  resultam em aquecimento da superfície da Terra.

#### **2.4.6 Vapor d'água**

A água em forma de vapor é, como o dióxido de carbono, um produto inevitável da combustão, ocorrida em todos os motores de aeronaves atualmente em operação, e as quantidades emitidas são rigorosamente determinadas por características dos combustíveis empregados.

O vapor d'água é também um gás do efeito estufa. Porém, a maior parte das emissões de vapor d'água por aeronaves ocorre na troposfera, onde o excesso resultante é pequeno se comparado aos fluxos envolvidos no ciclo hidrológico natural, e é eliminado em uma curta escala de tempo (cerca de nove dias) através de precipitação. Apenas uma pequena fração das emissões é lançada diretamente na baixa estratosfera, onde pode permanecer por escalas de tempo maiores (meses a anos), pode se concentrar e contribuir para o aquecimento da superfície da Terra (IPCC, 1999).

A importância relativa do vapor d'água em relação aos demais gases do efeito estufa emitidos por aeronaves é pequena, a não ser quando se leva em consideração o potencial de geração de trilhas de condensação ou cirrus, como discutido adiante.

#### **2.4.7 Aerosóis**

Do motor aeronáutico em operação, podem emergir partículas ou gotículas de diversos tipos, que se misturam aos gases produzidos na combustão e vem a formar aerosóis (suspensões de partículas ou gotículas). Os principais tipos de aerosóis produzidos são o de partículas compostas essencialmente de carbono puro, podendo ainda incluir compostos não-voláteis de carbono, produzidas na combustão incompleta, denominado comumente como “fuligem”; e o de sulfatos, decorrentes da presença de enxofre no combustível.

Como efeito direto, partículas de carbono produzem um pequeno forçamento radiativo positivo, já que são capazes de absorver parte da radiação solar, aquecendo a atmosfera. Aerosóis de sulfatos, por outro lado, por suas propriedades de espalhamento da radiação solar, contribuem com um ligeiro efeito de resfriamento (forçamento radiativo negativo) (GAO, 2009; IPCC, 1999). O efeito conjunto das duas espécies, atualmente, parece ser ligeiramente negativo, no sentido oposto ao do aquecimento global (LEE et al., 2009).

No entanto, além desse efeito direto, essas partículas, uma vez liberadas na atmosfera, podem servir de núcleos para cristais de gelo, que integram trilhas de condensação e cirrus induzidas, como apresentado a seguir.

#### **2.4.8 Trilhas de condensação**

Trilhas de condensação de forma linear (comumente chamadas *contrails*, do inglês “*condensation trails*”) deixadas por aeronaves são também consideradas potenciais intensificadoras do efeito estufa. Essas trilhas são formadas por cristais de gelo, que podem ser tanto puros quanto

nucleados por partículas emitidas pelas aeronaves. Esse processo é iniciado pelo encontro da mistura de gases emitidos pelo motor aeronáutico, quente e úmida (graças às emissões de H<sub>2</sub>O), com o ar mais frio e seco do ambiente (IPCC, 1999).

Entre um minuto e uma hora depois de formada, uma trilha de condensação se expande horizontalmente, podendo alcançar uma largura de vários quilômetros (IPCC, 1999). Além disso, essas trilhas podem se afastar até centenas de quilômetros de sua posição original (MINNIS et al., 2004).

Sabe-se que em 1992 cerca de 0,1% da superfície do planeta era coberto por essas trilhas, e que em 2050 essa cobertura deve chegar a 0,5%, embora haja tendência a uma concentração maior em latitudes mais setentrionais, onde o tráfego aéreo em grandes altitudes é mais intenso.

O forçamento radiativo de trilhas de condensação possui duas componentes: uma negativa, devida à reflexão da radiação solar incidente; e uma positiva, devida à absorção de radiação infravermelha emitida pela Terra. Estima-se que o segundo efeito supere o primeiro, de forma a produzir um resultado positivo.

Trilhas de condensação têm a mesma natureza de cirrus (nuvens formadas por cristais de gelo na alta troposfera), e trilhas persistentes podem converter-se em cirrus induzidos, indistinguíveis de cirrus naturais.

#### **2.4.9 Formação de cirrus**

Acredita-se que formação de cirrus induzida pela aviação é produto de dois mecanismos diferentes, ambos já mencionados. O primeiro é por meio da criação de trilhas de condensação persistentes, através de passagens repetidas pela mesma rota. Estudos foram realizados sobre a correlação entre a presença de cirrus e de trilhas persistentes (MINNIS et al., 2004), e os resultados apontam para uma correspondência entre os dois fenômenos. O outro mecanismo consiste na ação de aerossóis emitidos por aeronaves, que podem servir de núcleos para cristais de gelo, iniciando a formação de novas nuvens diretamente.

Como ocorre com as trilhas de condensação, há a coexistência de forçamento negativo, devido à reflexão pelos cristais de gelo, e positivo, devido à absorção de energia emitida na faixa do infravermelho pela superfície e pela atmosfera. No entanto, o grau de incerteza científica sobre

o forçamento radiativo total de cirrus induzidos pela aviação ainda é muito alto, sendo que modelos apontam para contribuições que podem ser desde quantidades modestas até forçamentos que superam o atribuído ao CO<sub>2</sub> (LEE et al., 2009).

Devido ao baixo grau de compreensão relacionado aos cirrus induzidos, estimativas de forçamento radiativo da aviação são usualmente totalizadas sem seu efeito, que costuma ser informado separadamente.

#### 2.4.10 Efeito total

Um resumo esquemático das contribuições da aviação para a mudança climática, em termos de forçamento radiativo, é apresentado na figura 2.2.

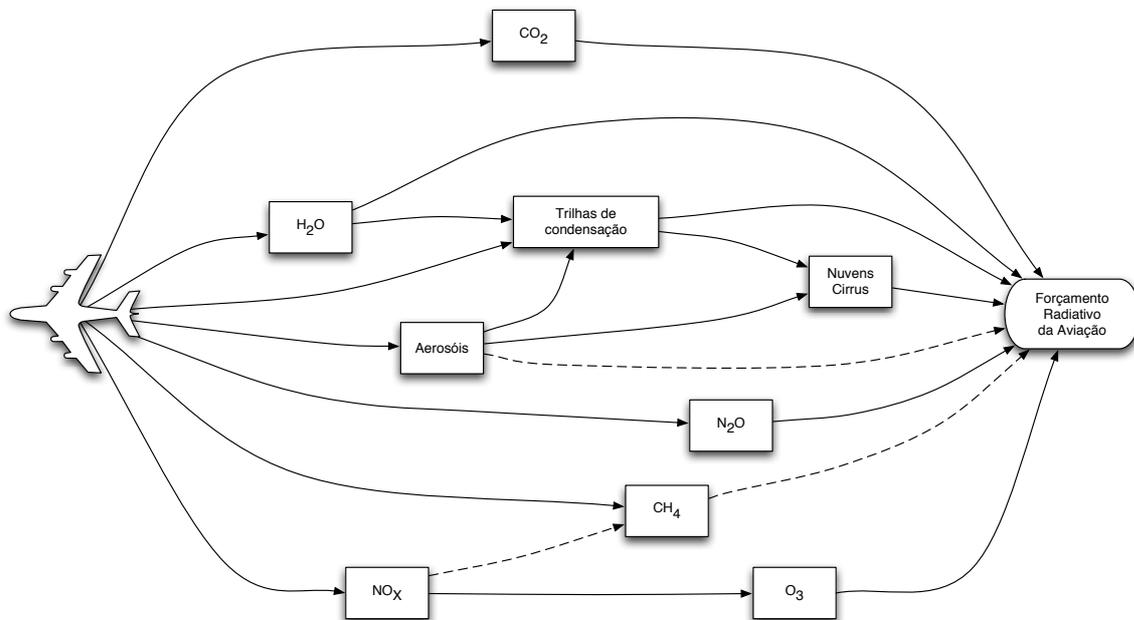


Figura 2.2: Resumo de emissões da aviação relacionadas ao efeito estufa. Setas tracejadas indicam destruição ou contribuição negativa. O diagrama é simplificado e não expressa todas as relações entre as diversas emissões.

Os valores estimados de forçamento radiativo da aviação global em 2005 para os principais componentes e o total, de acordo com Lee et al. (2009), são dados na tabela 2.1. É listada também uma avaliação do nível de compreensão científica atingido atualmente sobre cada componente, como apresentada no mesmo trabalho.

Computados todos esses efeitos, a importância relativa da aviação pode ser avaliada. Desconsiderando-se o efeito dos cirrus induzidos, a aviação mundial contribui com 3,5% do forçamento radiativo

Tabela 2.1: Principais contribuições da aviação para o forçamento radiativo em 2005, e níveis de compreensão científica (*NC*). Os valores apresentados são os publicados por Lee et al.(2009). As estimativas para cirrus induzidas pela aviação incluem o efeito de trilhas de condensação.

Componente		$\Delta F$ (W/m <sup>2</sup> )	<i>NC</i>
CO <sub>2</sub>		0,0280	Alto
NO <sub>x</sub>	Produção de O <sub>3</sub>	0,0263	Médio-Baixo
	Destruição de CH <sub>4</sub>	-0,0125	Médio-Baixo
Vapor d'água		0,0028	Baixo
Aerosóis	Fuligem	0,0034	Baixo
	Sulfatos	-0,0048	Baixo
Trilhas de condensação		0,0118	Baixo
Cirrus induzidos	Estimativa inferior	0,011	Muito Baixo
	Média	0,033	
	Estimativa superior	0,087	
Total, exceto cirrus		0,055	Baixo

de todas as atividades humanas. Considerando estimativas médias para o efeito de cirrus induzidos, essa fração se eleva para 4,9% do forçamento antropogênico total (LEE et al., 2009).

Além do conhecimento que se tem sobre o perfil das emissões globais da aviação, é importante avaliar as emissões de cada país, para que se possa fundamentar a adoção de políticas efetivas de mitigação. O mecanismo empregado para obter essas informações é a elaboração de inventários, introduzida no próximo capítulo.

### **3 INVENTÁRIOS DE GASES DO EFEITO ESTUFA DA AVIAÇÃO CIVIL**

Neste capítulo são apresentados os conceitos relativos aos inventários de emissões de gases do efeito estufa. Discute-se a importância do inventário como ferramenta para avaliação e controle das emissões, em seus vários aspectos. Também são abordados os princípios básicos que devem nortear seu desenvolvimento.

#### **3.1 INVENTÁRIOS DE GASES DO EFEITO ESTUFA**

Inventários de gases do efeito estufa são registros do conjunto de emissões, por fontes, e de remoções, por sumidouros, relacionados a atividades humanas, de gases do efeito estufa, ao longo de certo período de tempo, em um determinado contexto. Inventários estabelecem o elo entre as atividades humanas e as alterações atmosféricas reconhecidamente ou potencialmente relacionadas à mudança climática (EGGLESTON, 2007).

Com o propósito de avaliar as implicações de suas atividades sobre as concentrações de gases do efeito estufa, algumas empresas e entidades de outras naturezas elaboram inventários organizacionais. Inventários de emissões podem ser elaborados até mesmo para avaliar os impactos de um evento ou projeto específico. De importância para este estudo, no entanto, são os inventários que englobam fontes e sumidouros de um país inteiro — inventários nacionais.

Inventários nacionais são elaborados pelos Estados nacionais para traçar um panorama das emissões de suas diversas atividades, e também com o propósito de fundamentar discussões internacionais. Inventários nacionais de emissões idealmente devem registrar as contribuições individuais da cada atividade separadamente, de forma a permitir um melhor diagnóstico das emissões do país, e, conseqüentemente, a elaboração de ações mais eficazes para sua redução. Assim, um inventário nacional de emissões deve incluir diversos inventários setoriais. Um inventário de emissões de gases do efeito estufa da aviação civil é um exemplo de inventário setorial, e é o caso estudado neste trabalho.

## **3.2 IMPORTÂNCIA DOS INVENTÁRIOS DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA**

Inventários de emissões de gases do efeito estufa apresentam informações sobre as contribuições das diferentes atividades desenvolvidas em um país para o aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera terrestre. Por isso, representam instrumentos importantes para o cumprimento de compromissos internacionais; para a educação e informação da sociedade sobre o tema, incluindo a comunidade científica; para fundamentar decisões políticas do ponto de vista ambiental; e para cumprir o objetivo — que envolve cada um desses aspectos — de dar suporte à preservação do meio-ambiente global, como bem difuso.

### **3.2.1 Cumprir compromissos internacionais**

Devido ao caráter global de que está imbuído o problema do aumento das concentrações atmosféricas de gases do efeito estufa, é de interesse comum a todas as nações a avaliação e o controle das emissões desses gases. Por isso se faz imperiosa a necessidade de se debater e tratar o problema em um âmbito internacional.

Nesse sentido, destaca-se como um marco a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro em 1992. Um dos produtos dessa conferência foi a Declaração do Rio Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (ONU, 1992a), que, em seu Princípio 2, declara que “os Estados têm (...) a responsabilidade de assegurar que atividades sob sua jurisdição ou seu controle não causem danos ao meio ambiente de outros Estados ou de áreas além dos limites da jurisdição nacional”. Além disso, o Princípio 7 determina que os Estados devem “cooperar, em espírito de parceria global, para a conservação, proteção e restauração da saúde e da integridade do ecossistema terrestre”.

Durante a mesma conferência, muito países, inclusive o Brasil, aderiram a um tratado especificamente voltado para o tratamento do problema da mudança climática, a Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima — UNFCCC (ONU, 1992b), com o objetivo de juntos abordarem as medidas possíveis para reduzir o aquecimento global, e para garantir a adaptação à parcela inevitável desse aquecimento.

Dentre outros compromissos, as partes signatárias da Convenção concordaram em “elaborar, atualizar periodicamente, publicar e pôr à disposição da Conferência das Partes (...) inventários nacionais de emissões antrópicas por fontes e das remoções por sumidouros de todos os gases

de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal, empregando metodologias comparáveis a serem adotadas pela Conferência das Partes”.

Assim, o Brasil possui o compromisso, perante a comunidade internacional, de apresentar inventários de emissões de gases do efeito estufa, seguindo as metodologias e formatos acordados entre os signatários da Convenção.

### **3.2.2 Informar a sociedade e a comunidade científica**

Além dos compromissos que possa assumir com outras nações, é importante que um país seja capaz de manter seus habitantes informados sobre os custos ambientais das atividades econômicas que nele são desenvolvidas, permitindo a construção de uma maior consciência ambiental na sociedade. Inventários de emissões podem ser ferramentas para essa divulgação de informações.

Esse aspecto é também contemplado, de forma geral, pela Declaração do Rio, em seu Princípio 10: “... os Estados devem facilitar e estimular a conscientização e a participação popular, colocando as informações [relativas ao meio ambiente] à disposição de todos ...”.

Além de possibilitar essa maior percepção ambiental, a divulgação das emissões de gases do efeito estufa de um país constitui em uma ferramenta que pode ser empregada pela comunidade científica ao estudar o aquecimento global, e pode, portanto, converter-se em benefícios de longo prazo para o meio-ambiente global.

### **3.2.3 Fundamental decisões políticas**

É comum que decisões políticas, sejam estas calcadas ou não em motivações de cunho ambiental, interfiram em um ou mais setores da economia, inclusive estimulando ou desestimulando a intensificação de certas atividades humanas. Inventários de emissões de gases do efeito estufa, como já comentado, nos ajudam a compreender a ligação entre cada atividade e o acúmulo desses gases na atmosfera. Portanto, inventários que registrem detalhadamente as emissões decorrentes de cada atividade podem servir de apoio para um processo decisório mais bem informado, que leve em consideração as interações dessas atividades com o meio-ambiente de forma mais completa.

Esse aspecto é especialmente significativo à luz do conceito de desenvolvimento sustentável, expresso no Princípio 4 da Declaração do Rio: “... a proteção ambiental deve constituir parte integrante do processo de desenvolvimento e não pode ser considerada isoladamente deste”. Assim, a definição de políticas que promovam o desenvolvimento de certos setores da economia não podem ignorar os efeitos ambientais desse desenvolvimento.

### **3.2.4 Contribuir para a preservação do meio-ambiente**

O fundamento por trás de cada um desses intuitos — a motivação maior — é a de se preservar o meio ambiente como bem difuso, isto é, como patrimônio de todos. A nossa Constituição Federal em seu Art. 255 define o meio ambiente como “bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida”, e impõe ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo.

A elaboração regular de inventários de emissões pode ajudar a promover a proteção ao meio ambiente, que requer a colaboração entre os países, a disseminação de informações e um processo de tomada de decisões bem informado.

## **3.3 PRINCÍPIOS APLICÁVEIS À ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS NACIONAIS DE EMISSÕES**

Quando se trata da elaboração de inventários nacionais, a utilidade dos resultados gerados, especialmente no que se refere a discussões de âmbito internacional, está vinculada à observância de certos princípios. Os princípios a serem seguidos pelas partes signatárias da UNCCC são Transparência, Consistência, Comparabilidade, Completeza e Acurácia (ONU, 2004). Esses princípios são descritos a seguir.

### **3.3.1 Transparência**

As premissas adotadas em um inventário, assim como os detalhes da metodologia empregada, devem ser claramente explicadas. Dessa forma, os resultados obtidos podem ser verificados de forma independente, o que lhes confere maior confiabilidade.

### **3.3.2 Consistência**

No contexto de inventários de emissão, a consistência se refere à uniformidade, em termos de metodologias e conjuntos de dados adotados, ao longo do tempo. Portanto, caso haja, entre dois anos, mudanças na metodologia adotada, os resultados antigos devem ser recalculados empregando-se o novo procedimento.

Para os casos em que os resultados antigos não podem ser recalculados, por exemplo se o novo método requer dados adicionais que não estão disponíveis para um ou mais anos anteriores, existem certos métodos matemáticos aproximados para consolidação da série temporal de emissões que podem ser empregados (IPCC, 2000, 2006, por exemplo).

### **3.3.3 Comparabilidade**

O princípio da comparabilidade estabelece que diferentes países produzindo inventários nacionais de emissões em um mesmo contexto devem seguir metodologias e formatos compatíveis entre si e previamente acordados na elaboração e comunicação dos inventários, de forma a permitir comparações entre os resultados.

### **3.3.4 Completeza**

Um inventário nacional deve incluir todas as fontes e sumidouros conhecidos de cada gás a ser considerado. Esse princípio também se refere a uma cobertura geográfica plena do país em questão.

### **3.3.5 Acurácia**

Inventários nacionais de emissões devem apresentar valores tão exatos quanto possível. Estimativas envolvidas na elaboração de inventários não podem ser sistematicamente superiores ou inferiores aos valores reais, até onde se possa julgar, e incertezas devem ser reduzidas tanto quanto possível.

### 3.4 METODOLOGIA PARA A ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS

Para atender ao princípio da comparabilidade, Estados signatários da UNFCCC, como o Brasil, devem estimar suas emissões a partir da metodologia recomendada pelo Painel Intergovernamental de Mudança Climática (*Intergovernmental Panel on Climate Change* — IPCC). O documento *Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 1996) é o guia cuja utilização é atualmente acordada pelas partes da UNFCCC (ONU, 2002, 2004). A UNFCCC recomenda também o uso do manual *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2000), que revisa alguns aspectos do guia básico, e acrescenta mais detalhes.

Uma evolução desses guias, intitulado *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006), ainda não é de uso requerido pela conferência das partes, mas vários Estados já o empregam como material adicional de referência (EPA, 2009; JACKSON et al., 2009, por exemplo).

A metodologia do IPCC é desenvolvida de forma a poder ser aplicada, em princípio, por qualquer Estado. Como diferentes Estados possuem diferentes realidades, em termos de disponibilidade de dados e de recursos, essas metodologias não se apresentam de forma rígida, mas, ao contrário, definem uma série de procedimentos diferentes de cálculo, cada um com nível de complexidade maior e resultados progressivamente mais precisos. Esses procedimentos com diferentes níveis de complexidade são denominados *tiers*<sup>1</sup>. Os *tiers* definidos para o cálculo de emissões da aviação são descritos no capítulo 4.

---

<sup>1</sup>A palavra inglesa “*tier*” pode ser traduzida como “nível” ou “camada”. Neste trabalho, no entanto, optou-se por manter a forma original para identificar inequivocamente o conceito em questão.

## 4 TIERS DO IPCC PARA O CÁLCULO DE EMISSÕES DA AVIAÇÃO

Neste capítulo descrevemos a metodologia estabelecida pelo IPCC para o cálculo das emissões do setor de aviação civil. Essa metodologia inclui três *tiers*, que apresentam ainda subdivisões. Cada um desses *tiers*, como explicado na seção 3.4, consiste em uma forma diferente de cálculo das emissões, e quanto maior o *tier*, mais complexo (e potencialmente mais preciso) é o método.

### 4.1 NOMENCLATURA

Embora os detalhes metodológicos sejam essencialmente consistentes entre os diferentes guias do IPCC (1996; 2000; 2006), a nomenclatura para as subdivisões dos *tiers* foi modificada ao longo do tempo. É determinada para este trabalho uma nomenclatura unificada. A relação entre essa nomenclatura e as designações usadas em cada guia é mostrada na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Relação entre a nomenclatura adotada neste trabalho para os *tiers* do IPCC para aviação e aquelas adotadas em cada um dos guias.

Este trabalho	<i>1996 Guidelines</i>	<i>Good Practice Guidance</i>	<i>2006 Guidelines</i>
<i>Tier 1</i>	<i>Tier 1</i>	<i>Tier 1</i>	<i>Tier 1</i>
<i>Tier 2a</i>	—	<i>Tier 2A</i>	<i>Tier 2</i> <sup>†</sup>
<i>Tier 2b</i>	<i>Tier 2</i>	<i>Tier 2B</i>	<i>Tier 2</i> <sup>†</sup>
<i>Tier 2c</i> <sup>*</sup>	—	<i>Tier 2B</i> <sup>**</sup>	<i>Tier 2</i> <sup>†</sup>
<i>Tier 3a</i>	—	—	<i>Tier 3A</i>
<i>Tier 3b</i>	—	—	<i>Tier 3B</i>

<sup>\*</sup> A designação *tier 2c* é introduzida neste trabalho, a partir de uma variação comum do *tier 2b*.

<sup>\*\*</sup> A definição do *tier 2B* nesse caso admite uma variação correspondente ao *tier 2c* definido neste trabalho.

<sup>†</sup> A designação *tier 2* nesse caso é genérica, e pode corresponder aos *tiers 2a, 2b* ou *2c*.

É apresentada, nas seções a seguir, uma descrição de cada um desses métodos.

### 4.2 TIER 1

Em um inventário *tier 1*, as emissões são estimadas exclusivamente a partir do consumo de combustível pela aviação civil. O consumo de cada combustível de aviação empregado no

país deve ser obtido ou estimado e, em seguida, multiplicado, para cada gás considerado, por um fator de emissão médio — que representa uma média de todas as fases do voo para uma aeronave média. De acordo com a metodologia do IPCC o cálculo deve ser feito separadamente para voos domésticos e voos internacionais, portanto, os dados de consumo de combustível devem permitir essa segregação.

Sejam  $e_{i,j}$  o fator de emissão do gás  $i$  relativo ao combustível  $j$ , e  $C_j$  o consumo do combustível  $j$ . A massa do gás  $i$  emitida através do consumo do combustível  $j$ ,  $E_{i,j}$ , é calculada como

$$E_{i,j} = C_j \times e_{i,j}. \quad (4.1)$$

Os fatores de emissão devem ser adimensionais (unidades de massa de gás emitidas para cada unidade de massa de combustível consumido). O consumo de combustível deve ser expresso em unidades de massa. O cálculo deve ser feito para os combustíveis querosene de aviação (QAV) e a gasolina de aviação (AVGAS), atualmente em uso no país.

As emissões totais de cada gás são dadas então por

$$E_i = E_{i,QAV} + E_{i,AVGAS} \quad (4.2)$$

Normalmente, para o cálculo das emissões relativas ao uso de gasolina de aviação usa-se apenas o método *tier 1*, dado que em geral esse combustível é usado apenas na aviação geral e normalmente os países não dispõem de dados completos de movimentação para esse segmento, os quais são necessários para o emprego de *tiers* maiores. Independentemente desse fato, o consumo de gasolina de aviação tende ser muito pouco expressivo em relação ao consumo de querosene, de forma que não se justificaria a adoção de um método mais elaborado.

Vale ressaltar que para as emissões de CO<sub>2</sub>, que são, em boa aproximação, diretamente proporcionais ao consumo de combustível, os cálculos *tier 1* são suficientes para a obtenção de resultados confiáveis.

### 4.3 TIER 2

Inventários *tier 2* reconhecem as diferenças nas emissões ao longo de duas fases diferentes de voo: durante o ciclo LTO (do inglês *Landing-Take Off* — aterrissagem e decolagem) e durante

vôo em cruzeiro<sup>1</sup>.

Além dos dados de consumo de combustível, inventários *tier 2* requerem que se conheça o número de ciclos LTO realizados no período analisado. Quando as fontes de dados disponíveis não permitem distinguir com confiança os movimentos realizados por cada tipo de aeronave adota-se o método *tier 2a*, e quando essa distinção é possível, adota-se o método *tier 2b*. Quando se dispõe, além do número de ciclos LTO, do consumo de combustível de cada tipo de aeronave (e não apenas de um valor total), pode-se adotar o *tier 2c*.

Por considerarem as diferenças entre as emissões em LTO e cruzeiro e (no caso dos *tiers 2b* e *2c*) entre diferentes tipos de aeronaves, esses métodos permitem uma avaliação mais acurada das contribuições da aviação para o aumento das concentrações atmosféricas de gases como os NO<sub>x</sub> e o N<sub>2</sub>O, já que as emissões desses gases não são diretamente proporcionais ao consumo de combustível, ao contrário do que ocorre com as emissões de CO<sub>2</sub>.

#### 4.3.1 Tier 2a

Segundo o método *tier 2a*, as emissões ocorridas durante os ciclos LTO são dadas por

$$E_i^{\text{LTO}} = N \times e_i^{\text{LTO}}, \quad (4.3)$$

onde  $E_i^{\text{LTO}}$  é a estimativa de massa do gás  $i$  emitida em ciclos LTO,  $N$  é o número total de ciclos LTO verificados no país, incluindo todos os tipos de aeronaves, e  $e_i^{\text{LTO}}$  é o fator de emissão médio para a frota, relativo a esse mesmo gás. Fatores de emissão para esse cálculo são em geral escolhidos entre fatores considerados típicos, de acordo com a idade média da frota, por exemplo.

Da mesma forma, a partir de estimativas do consumo médio de combustível (em massa) por ciclo LTO,  $c^{\text{LTO}}$ , calcula-se o consumo total de combustível durante os ciclos LTO,  $C^{\text{LTO}}$ :

$$C^{\text{LTO}} = N \times c^{\text{LTO}}. \quad (4.4)$$

O combustível consumido em cruzeiro,  $C^{\text{Cr}}$  é então obtido subtraindo-se do consumo total,  $C$ , o consumo em LTO:

$$C^{\text{Cr}} = C - C^{\text{LTO}}. \quad (4.5)$$

---

<sup>1</sup>O IPCC define como ciclo LTO toda a operação das aeronaves em altitudes de até 3.000 pés (ou 914 metros) acima do solo, e como cruzeiro toda a operação acima dessa altitude

As emissões em vôo de cruzeiro,  $E_i^{\text{Cr}}$  podem então ser estimadas a partir de fatores de emissão em cruzeiro, de forma análoga ao cálculo das emissões da metodologia *tier* 1:

$$E_i^{\text{Cr}} = C^{\text{Cr}} \times e_i^{\text{Cr}}, \quad (4.6)$$

e, finalmente, as emissões totais do gás  $i$  podem ser calculadas através da soma das emissões em LTO e em cruzeiro:

$$E_i = E_i^{\text{LTO}} + E_i^{\text{Cr}}. \quad (4.7)$$

### 4.3.2 Tier 2b

O método *tier* 2b consiste basicamente nos mesmos passos, mas ao invés de se considerar um valor global para o número de movimentos e de se adotar fatores de emissão médios, considera-se esses dados individualmente para cada tipo de aeronave  $k$ . Os dados de consumo de combustíveis são ainda considerados de forma agregada.

Assim, as emissões em LTOs de cada tipo de aeronave são obtidas pela expressão

$$E_{i,k}^{\text{LTO}} = N_k \times e_{i,k}^{\text{LTO}}, \quad (4.8)$$

e o consumo de cada tipo de aeronave em LTOs por

$$C_k^{\text{LTO}} = N_k \times c_k^{\text{LTO}}. \quad (4.9)$$

Quanto ao consumo de combustível em cruzeiro, como apenas o consumo agregado é conhecido, a aproximação recomendada (IPCC, 1996) é assumir uma proporcionalidade entre o número de LTOs e o consumo em cruzeiro para cada tipo de aeronave:

$$C_k^{\text{Cr}} = \left( C - \sum_k C_k^{\text{LTO}} \right) \times \frac{N_k}{\sum_k N_k}. \quad (4.10)$$

Pode-se então calcular as emissões de cada tipo de aeronave em cruzeiro:

$$E_{i,k}^{\text{Cr}} = C_k^{\text{Cr}} \times e_{i,k}^{\text{Cr}}. \quad (4.11)$$

As emissões em LTOs e em cruzeiro são então totalizadas:

$$E_i^{\text{LTO}} = \sum_k E_{i,k}^{\text{LTO}}, \quad (4.12)$$

$$E_i^{\text{Cr}} = \sum_k E_{i,k}^{\text{Cr}}. \quad (4.13)$$

E, finalmente, somam-se as emissões nas duas etapas:

$$E_i = E_i^{\text{LTO}} + E_i^{\text{Cr}}. \quad (4.14)$$

### 4.3.3 Tier 2c

O *tier 2c* consiste essencialmente no mesmo procedimento, através das equações 4.8 a 4.14, mas nesse caso, o consumo individual de cada tipo de aeronave é conhecido. Assim, a equação 4.10 é substituída por

$$C_k^{\text{Cr}} = C_k - C_k^{\text{LTO}}. \quad (4.15)$$

Essa variante não é identificada como um método separado em nenhum dos guias do IPCC, mas o é neste trabalho por empregar tipos de dados diferentes — o que é relevante para a análise que é apresentada no próximo capítulo.

## 4.4 TIER 3

Métodos *tier 3* diferem dos demais por não estimarem as emissões a partir do consumo de combustível de aviação, mas diretamente a partir dos dados de movimentos de aeronaves. Esses métodos requerem uma maior quantidade de dados sobre a movimentação das aeronaves, e são de aplicação mais difícil, mas podem fornecer resultados mais detalhados, como uma melhor divisão entre emissões domésticas e internacionais, informações sobre a localização geográfica das emissões e valores ainda mais acurados para as emissões não diretamente proporcionais ao consumo de combustível.

#### 4.4.1 Tier 3a

O método *tier* 3a requer dados que identifiquem o aeródromo de partida e o de destino para cada voo individual realizado no país ao longo do período estudado. A partir das coordenadas do aeródromo, estima-se a distância percorrida aproximando-se a trajetória da aeronave como um arco de círculo máximo<sup>2</sup>. Empregam-se então valores tabelados de consumo e emissões em função da distância percorrida e do tipo de aeronave. Essas tabelas são construídas, evidentemente, a partir de uma quantidade finita de valores de distância de tipos de aeronaves, consideradas representativas. Assim, interpolações e substituições são normalmente necessárias.

A vantagem do uso desse método é que se passa a levar em conta não apenas as diferenças entre os diferentes tipos de aeronaves, mas também a mudança nos perfis de emissões de acordo com a distância voada.

#### 4.4.2 Tier 3b

Substituindo as trajetórias aproximadas por rotas reais e as tabelas simplificadas por modelos completos, tem-se o método *tier* 3b. Neste caso, é preciso que se desenvolva um modelo sofisticado, capaz de processar informação de performance aerodinâmica específica para cada tipo de aeronave e de motor, e as várias possibilidades de rotas aéreas para todos os voos ao longo do período estudado.

Em relação ao *tier* 3a, tem-se maior acurácia nos cálculos e acrescenta-se a capacidade de gerar projeções baseadas em cenários específicos.

### 4.5 DADOS EXIGIDOS POR CADA TIER

A tabela 4.2, a seguir, resume os requisitos, em termos de dados, para cada um dos *tiers* apresentados neste capítulo. O próximo capítulo explora as opções disponíveis no contexto brasileiro para satisfazer a cada um desses requisitos.

---

<sup>2</sup>Em uma superfície esférica — aproximação aceitável, para muitas aplicações, para a forma da superfície terrestre — o menor caminho entre dois pontos é um arco de círculo máximo que os liga. Um círculo sobre a superfície de uma esfera é máximo se seu centro coincide com o centro da esfera, ou ainda, equivalentemente, se seu raio se iguala ao da esfera.

Tabela 4.2: Dados necessários para o emprego de cada *tier*.

Método	Consumo de combustíveis	Movimentos de aeronaves	Dados de emissão
<i>Tier 1</i>	Totais em vôos domésticos e em vôos internacionais	—	Fatores médios para todas as fases do vôo e tipos de aeronaves, para cada gás.
<i>Tier 2a</i>	Totais em vôos domésticos e em vôos internacionais	LTOs totais em vôos domésticos e internacionais	Fatores médios para frota típica, para cada gás e fase do vôo (LTO/cruzeiro).
<i>Tier 2b</i>	Totais em vôos domésticos e em vôos internacionais	LTOs por tipo de aeronave em vôos domésticos e internacionais	Fatores para cada tipo de aeronave, gás e fase do vôo (LTO/cruzeiro).
<i>Tier 2c</i>	Por tipo de aeronave, em vôos domésticos e internacionais	LTOs por tipo de aeronave em vôos domésticos e internacionais	Fatores para cada tipo de aeronave, gás e fase do vôo (LTO/cruzeiro).
<i>Tier 3a</i>	—	Aeródromos de origem e destino e tipo de aeronave para cada trecho individual	Dados pré-calculados de emissões por distância voada.
<i>Tier 3b</i>	—	Aeródromos de origem e destino, rota, tipo de aeronave e motores para cada trecho individual	Modelos de emissões, considerando distâncias, rotas e performance de cada tipo de aeronave e motor.

## **5 FONTES DE DADOS NO CONTEXTO ATUAL BRASILEIRO**

Neste capítulo são apresentadas fontes de dados presentes no contexto brasileiro que podem ser aplicadas na elaboração de inventários brasileiros de emissões de gases do efeito estufa na aviação civil. Primeiramente, são apresentadas as possíveis fontes para dados de consumo de combustíveis, seguidas pelas fontes de dados de movimentação de aeronaves, e de fatores de emissão e dados afins. Por fim, são apresentadas tabelas resumindo as principais características de cada fonte.

### **5.1 CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS**

Dados de consumo de combustíveis são necessários para que se estimem as emissões com os *tiers* 1 e 2. Independentemente do caso, como as emissões em vôos internacionais precisam ser relatadas separadamente, é necessário que haja a distinção entre o consumo em vôos domésticos e em vôos internacionais. Vale destacar que, segundo as recomendações do IPCC, deve-se buscar considerar apenas o consumo de combustível adquirido no próprio país, de forma a evitar que as mesmas emissões sejam contabilizadas por países diferentes. Algumas possíveis fontes para essas informações são apresentadas a seguir.

#### **5.1.1 Anuário estatístico da ANP**

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) coleta dados relativos à distribuição de produtos derivados de petróleo no país, inclusive os combustíveis de aviação. Essa coleta se dá como determinado na Resolução N<sup>o</sup> 15/2004 da agência (ANP, 2004).

Partindo da hipótese de que não há estocagem significativa de combustível de aviação por parte de seus consumidores (companhias aéreas e usuários particulares), e de que perdas por derramamento ou evaporação são desprezíveis, pode-se considerar a quantidade de combustível vendida equivalente à quantidade consumida.

O IPCC orienta os Estados a contabilizarem, ao elaborarem inventários através dos *tiers* 1 e 2, todo (e apenas) o combustível de aviação vendido no país. Portanto, esses dados da ANP representam o máximo de completeza.

Os dados são de fácil acesso. As vendas totais de combustível são publicamente disponíveis, e divulgadas eletronicamente no anuário estatístico da agência (ANP, 2008, edição mais recente), no *site* da agência. Cada edição reproduz ainda os valores para os dez anos anteriores, o que facilita a formação de uma série histórica e o atendimento ao princípio da Consistência.

Não é apresentada nenhuma separação relativa à natureza dos vôos para os quais o combustível se destina, ou à nacionalidade das aeronaves abastecidas.

### **5.1.2 Estatísticas adicionais da ANP**

A ANP produz ainda dados desagregados em relação à nacionalidade da aeronave abastecida — brasileira ou estrangeira em trânsito. No entanto, esses dados não estão, no momento, disponíveis no *site* da agência, e precisam ser requisitados diretamente.

### **5.1.3 Anuário estatístico da ANAC**

A Agência Nacional de Aviação Civil publica, no volume relativo a dados econômicos de seu anuário estatístico (ANAC, 2008, edição mais recente), entre outras informações, dados detalhados de consumo de combustível. Os dados publicados pela ANAC são obtidos a partir das demonstrações financeiras e relatórios de custeio, encaminhadas à agência pelas empresas aéreas.

Os dados relativos à aviação regular são informados separadamente por empresa, tipo de aeronave e tipo de operação (doméstica ou internacional). Os dados relativos a outras atividades, como serviços aéreos especializados (aviação agrícola, aeropublicidade, aerofotografia etc.) e táxi aéreo são desagregados apenas por empresa.

A maior limitação desses dados reside no fato de que abrangem apenas as atividades de companhias brasileiras. Com isso, essa fonte só pode ser empregada em conjunto com outras, já que companhias estrangeiras operando no Brasil também devem ter suas emissões consideradas ao se construir um inventário com qualquer *tier*.

Esses dados são de acesso público irrestrito, estando disponíveis para consulta no *site* da ANAC.

#### **5.1.4 Estatísticas detalhadas da ANAC**

As companhias aéreas brasileiras que operam vôos regulares são obrigadas a remeter mensalmente à ANAC dados estatísticos sob forma eletrônica, conforme o disposto na Instrução de Aviação Civil (IAC) de número 1505 (DAC, 2000c). Além de determinar a obrigatoriedade e as condições para comunicação desses dados, a IAC 1505 estabelece ainda o formato a ser seguido estritamente pelas companhias em sua transmissão. Entre as informações a serem transmitidas, incluem-se os consumos de combustível de aviação relativos a cada etapa básica (ligação direta entre dois aeroportos) executada pela companhia.

Como também está incluída nos dados transmitidos à ANAC para cada etapa básica a identificação do tipo da aeronave, é possível determinar o consumo correspondente a cada tipo, necessário para o *tier 2c*.

A norma correspondente para companhias estrangeiras, a IAC 1506 (DAC, 2000d), não obriga as companhias a relatarem dados referentes a consumo de combustível. O mesmo ocorre com a IAC 1503 (DAC, 1999), referente a empresas de transporte aéreo não-regular. Assim, apenas o consumo de combustível relativo ao transporte regular por companhias brasileiras é representado por esses dados, que precisam, portanto, ser complementados com outras fontes. Além disso, esse conjunto de dados é de acesso restrito aos setores responsáveis pela manutenção dos dados estatísticos da agência.

#### **5.1.5 Consultas a empresas distribuidoras de combustível e companhias aéreas**

Evidentemente os dados podem ser buscados diretamente junto aos fornecedores de combustível — as empresas distribuidoras — e a seus consumidores — as companhias aéreas. A vantagem de se buscar os dados diretamente junto às empresas reside na possibilidade de se obter informações que atendam de forma mais específica aos requisitos do cálculo das emissões.

Por outro lado, existem grandes desvantagens. É possível, por exemplo, que não se possa obter resposta de todos os participantes do mercado, ameaçando o atendimento ao princípio da Completeza. Além disso, não existem garantias de que os mesmos dados poderão ser obtidos nos anos subsequentes, o que vai de encontro ao propósito de se garantir a regularidade da elaboração dos inventários e ao princípio da Consistência.

## 5.2 MOVIMENTOS DE AERONAVES

Dados de movimentos de aeronaves (pousos e decolagens) são necessários para se estimar as emissões com qualquer método mais complexo do que o *tier 1*. Para os métodos *tier 2*, é necessário apenas que se conheça o número de ciclos LTOs realizados (total ou por tipo de aeronave). Por outro lado, para os métodos *tier 3* é preciso obter dados mais específicos, que incluam, para vôos individuais, detalhes como aeródromos de origem e destino, rotas etc. A seguir, algumas possíveis fontes para esses dados são descritas.

### 5.2.1 Vôos autorizados pela ANAC (HOTRAN)

A Agência Nacional de Aviação Civil mantém o registro dos vôos regulares previstos no sistema HOTRAN — Horário de Transporte, de acordo com a IAC 1223 (DAC, 2000a). Esses dados incluem, para cada número de vôo previsto, especificação de tipo de aeronave pretendida, número de frequências semanais, natureza da operação (doméstica ou internacional), aeroporto de partida e aeroporto de chegada. Assim pode-se obter um perfil das movimentações realizadas pela aviação regular. No entanto, é comum haver alterações imprevistas nos vôos autorizados, de forma que esses dados não correspondem estritamente à realidade. Além disso, essa base de dados não inclui as operações não-regulares.

Consultas ao HOTRAN vigente são, atualmente, disponíveis no *site* da ANAC na internet, através de planilhas atualizadas diariamente.

### 5.2.2 Vôos regulares ativos (VRA)

A base de vôos regulares ativos é formada a partir do HOTRAN, com a introdução das respectivas alterações de vôo comunicadas pelas companhias em caso de troca de equipamentos, atrasos, cancelamentos etc., através de Boletim de Alteração de Vôo (BAV), como especificado na IAC 1504 (DAC, 2000b).

Essa base representa de forma mais realista os movimentos de aeronaves da aviação regular do que o HOTRAN. Ocorre, ainda, que certos vôos não-regulares são passíveis de serem registrados em um BAV, e passarem a integrar a base de VRA.

A base de VRA, assim como seu histórico, é mantida, e tem acesso controlado, pela ANAC.

### **5.2.3 Estatísticas detalhadas da ANAC**

A partir dos dados obtidos mensalmente pela ANAC através do disposto na IAC 1505, já abordados na seção 5.1.4, é possível obter a informação de número de movimentos realizados por aeronaves de companhias brasileiras. Essa informação pode ser segregada por tipo de aeronave e natureza da operação, e cada entrada inclui ainda a identificação dos aeródromos de origem e destino e a distância oficial correspondente à ligação.

As IACs 1503 e 1506 apresentam essas mesmas informações para empresas de transporte aéreo não-regular e para companhias estrangeiras de transporte aéreo regular, respectivamente. Assim, esse conjunto de dados pode ser considerado praticamente completo. Apenas vôos executados por particulares e entidades não classificáveis como empresas aéreas não são alcançados por esses regulamentos.

Esses dados são de acesso restrito aos setores responsáveis pela manutenção dos dados estatísticos da ANAC.

### **5.2.4 Movimentos registrados pelo controle do espaço aéreo**

Os órgãos que participam do controle do espaço aéreo brasileiro possuem, por sua natureza, acesso a informações detalhadas de atividade aérea no país. Por exemplo, todos os operadores de aeronaves que utilizam o espaço aéreo brasileiro são obrigados, com poucas exceções, a submeterem seus planos de vôo a um órgão de serviço de tráfego aéreo (ATS). A obrigatoriedade da submissão de planos de vôo é estabelecida pela Instrução do Comando da Aeronáutica 100-11 (DECEA, 2008a), e deve dar-se de acordo com as orientações do Manual do Comando da Aeronáutica 100-11 (DECEA, 2008b). As informações necessariamente entregues através desse mecanismo são razoavelmente completas ao descreverem a operação realizada, incluindo dados de aeródromo de partida e de destino, matrícula e tipo da aeronave empregada, número do vôo, e ainda a definição da rota prevista.

Além desses dados, os órgãos do Sistema Brasileiro de Controle do Espaço Aéreo (SISCEAB), conduzido pelo Comando da Aeronáutica, têm acesso, evidentemente, a muitas informações, em tempo real, sobre a movimentação de aeronaves.

Algumas das informações coletadas ou produzidas por esses órgãos são reunidas em bases de dados como o Banco de Informações do Movimento de Tráfego Aéreo (BIMTRA).

Uma grande vantagem desses dados é o nível de detalhamento que eles podem fornecer, inclusive com detalhes de rota que poderiam ser utilizados em cálculos empregando o *tier* 3b. Informações como o número do voo podem ser utilizados para determinar a natureza dos voos realizados (regulares ou não) e identificar a companhia que o opera, como nacional ou estrangeira. O registro do aeródromo de destino permite, por sua vez, identificar cada voo como doméstico ou internacional. Além disso, a abrangência que esses dados podem oferecer é muito grande, incluindo aviação regular, não-regular, e mesmo de caráter não-comercial.

Esses dados, de uma forma geral, não estão publicamente disponíveis, e são administrados pelo órgão central do SISCEAB, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) do Comando da Aeronáutica. Por isso, este trabalho emprega, para o conjunto dessas informações, a abreviação “DECEA”.

### **5.2.5 Consultas a empresas aéreas e administrações aeroportuárias**

Como ocorre com o consumo de combustíveis, é possível obter as informações de movimentos de aeronaves diretamente das companhias aéreas. Neste caso, os dados podem também ser obtidos consultando-se administrações aeroportuárias.

Como argumentado no caso do consumo de combustíveis, é possível obter informações mais específicas consultando-se diretamente essas organizações, mas, por outro lado, há dificuldades em se garantir o atendimento aos princípios da Completeza e da Consistência.

## **5.3 FATORES E OUTROS DADOS RELATIVOS A EMISSÕES**

Como é possível haver diferenças entre os Estados, no que se refere aos fatores de emissão (por exemplo, referentes à composição de combustível, e aos tempos médios gastos pelas aeronaves em cada etapa do voo — em espera, taxiando, decolando etc.), o IPCC recomenda que cada país, na medida do possível, tente estimar fatores de emissão próprios. Na ausência desses fatores, os padrões do IPCC (IPCC, 2006) devem ser empregados.

Quanto às exigências do *tier* 3a, os valores de emissões tabelados por distância voada para um conjunto de aeronaves representativas são apresentados pela Agência Europeia do Ambiente (EEA — *European Environment Agency*), em seu guia para produção de inventários de poluentes (EEA, 2009). O uso desses dados é explicitamente recomendado pelo IPCC.

Para que se possa obter uma estimativa das emissões através de um método *tier 3b*, é preciso desenvolver um modelo de emissões completo para a aviação brasileira, o que transcende ao conceito de fonte de dados tratado aqui.

#### 5.4 RESUMO DAS PROPRIEDADES DAS FONTES DE DADOS

As informações apontadas neste capítulo sobre a disponibilidade de dados de consumo de combustíveis de aviação e de movimentos de aeronaves para a construção de inventários de emissões da aviação civil no Brasil são resumidas nas tabelas 5.1 e 5.2. Cada fonte de dados, nessas tabelas, é caracterizada em três aspectos:

1. **Abrangência:** O quão completas são as informações, ou seja, sua aplicabilidade frente ao princípio da Completeza. As possíveis classificações são “Completa”, quando a fonte abrange, em princípio, todas as operações com aeronaves executadas no Brasil, e, em relação ao combustível, envolvendo o consumo de combustível nacional; “Incompleta”, quando essa condição não é verificada; e “Variável”, quando essa característica não é pré-determinada.
2. **Detalhamento:** Tipo de informações fornecidas pela fonte de dados. É explicitado se a fonte permite a separação entre operações de natureza doméstica e internacional, se há a separação entre atividades de empresas nacionais e estrangeiras, se há distinção entre tipos de aeronaves, além de outras características.
3. **Disponibilidade:** A facilidade de acesso à informação. Pode ser “Alta”, quando os dados são disponíveis ao público através da internet ou de outros meios de fácil acesso, “Intermediária”, quando o acesso à informação depende, na prática, de um pedido à instituição que o mantém, ou “Baixa”, quando as informações precisam ser coletadas diretamente junto com os participantes do setor, a cada ano. Esse critério está ligado à possibilidade de se adotar o conjunto de dados em um programa regular de inventários, e se relaciona com o princípio da Consistência.

As fontes de fatores, tabelas e modelos de emissão não são alvo desse estudo comparativo, porque não existe, nesse caso, a mesma pluralidade de opções — as orientações do IPCC já apontam para as fontes de dados a serem usadas em cada caso.

No próximo capítulo, são exploradas as diferentes combinações possíveis desses conjuntos de dados, e construída uma árvore de decisão para o cálculo das emissões da aviação civil brasileira tendo em vista os dados disponíveis.

Tabela 5.1: Resumo das fontes de dados de consumo de combustíveis de aviação disponíveis no contexto brasileiro, incluindo algumas de suas propriedades de maior relevância para este trabalho.

Fonte de dados	Abrangência	Detalhamento	Disponibilidade
Anuário ANP	Completa — Todo o combustível nacional consumido	Apenas totais de cada combustível	Alta
Estatísticas ANP	Completa — Todo o combustível nacional consumido	Vendas a companhias brasileiras e a companhias estrangeiras informadas separadamente	Intermediária
Anuário ANAC	Incompleta — Apenas consumo de companhias brasileiras, com possibilidade de omissões	Informado por tipo de aeronave e separadamente para trechos domésticos e internacionais (apenas para aviação regular)	Alta
Estatísticas ANAC	Incompleta — Apenas consumo de companhias brasileiras de transporte aéreo regular	Consumo por etapa, sendo possível distinguir tipo de aeronave e natureza da operação (doméstica / internacional)	Intermediária
Distribuidoras	Variável — Dependente do grau de sucesso da consulta a cada ano	Variável — Dependente das informações disponibilizadas por cada empresa a cada ano	Baixa
Companhias aéreas	Variável — Dependente do grau de sucesso da consulta a cada ano	Variável — Dependente das informações disponibilizadas por cada empresa a cada ano	Baixa

Tabela 5.2: Resumo das fontes de dados de movimentos de aeronaves disponíveis no contexto brasileiro, incluindo algumas de suas propriedades de maior relevância para este trabalho.

Fonte de dados	Abrangência	Detalhamento	Disponibilidade
HOTRAN	Incompleta — Apenas aviação regular	Dados por etapa, sendo possível distinguir tipo de aeronave, natureza da operação (doméstica / internacional), e aeródromos de origem e destino	Alta
Base VRA	Incompleta — Aviação regular e parte da aviação não-regular	Dados por etapa, sendo possível distinguir tipo de aeronave, natureza da operação, e aeródromos de origem e destino	Intermediária
Estatísticas ANAC	Incompleta — Apenas empresas	Dados por etapa, sendo possível distinguir tipo de aeronave, natureza da operação, aeródromos de origem e destino e distância teórica	Intermediária
DECEA	Completa — Exceto eventuais omissões	Dados por movimento, sendo possível distinguir tipo de aeronave, natureza da operação, aeródromos de origem e destino e rota planejada	Intermediária
Companhias aéreas	Variável — Dependente do grau de sucesso da consulta a cada ano	Variável — Dependente das informações disponibilizadas por cada empresa a cada ano	Baixa
Aeroportos	Variável — Dependente do grau de sucesso da consulta a cada ano	Variável — Dependente das informações disponibilizadas por cada administração a cada ano	Baixa

## 6 ELABORAÇÃO DE INVENTÁRIOS DA AVIAÇÃO CIVIL BRASILEIRA

Neste capítulo são apontadas possíveis soluções para a elaboração de inventários de emissões de gases do efeito estufa pela aviação brasileira tendo em vista os diferentes *tiers* introduzidos no Capítulo 4 e os dados existentes no contexto brasileiro levantados no Capítulo 5. Inicialmente, no entanto, é comentado o trabalho já realizado até o momento nesse campo.

### 6.1 QUADRO ATUAL DOS INVENTÁRIOS DA AVIAÇÃO BRASILEIRA

Desde que o Brasil se tornou parte da Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima, contraindo assim a obrigação formal de produzir inventários nacionais de emissões, apenas um inventário setorial da aviação civil foi produzido, pelo extinto Instituto de Aviação Civil, para integrar o Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões em colaboração com o Ministério da Ciência e Tecnologia (SCATOLINI, 2006).

O inventário elaborado se refere ao ano de 1995, e as emissões foram estimadas através da metodologia aqui identificada como *tier 2b*.

Atualmente, a Agência Nacional de Aviação Civil está no processo de elaboração de um novo inventário de emissões, contemplando os anos 1990 a 2007, também em colaboração com o MCT.

### 6.2 USO DAS FONTES DE DADOS — CENÁRIOS

São apresentados a seguir, procedimentos possíveis para a elaboração dos inventários, baseados no estudo das fontes de dados mostrado no capítulo anterior. Para esta análise, são admitidos inicialmente dois cenários extremos, com o objetivo de abranger uma maior gama de situações:

- **cenário I (pior caso):** Esse cenário consiste na situação em que apenas dados de acesso público (disponibilidade “Alta”) estejam disponíveis.

- **cenário II (melhor caso):** Nesse cenário admite-se a possibilidade de acesso a todos os dados de disponibilidade “Intermediária”.

Como está entre os objetivos do trabalho apontar um método que garanta a regularidade na construção dos inventários, soluções que envolvam dados de disponibilidade “Baixa” não são consideradas.

## 6.3 CENÁRIO I

Os dados de acesso público incluem, em relação ao consumo de combustível, apenas as informações constantes no anuário estatístico da ANP e no anuário estatístico da ANAC. Os dados de livre acesso de movimentação de aeronaves incluem apenas os constantes na base de dados HO-TRAN.

### 6.3.1 Tier 1

De posse desses dados, é possível obter estimativas das emissões através de método *tier 1*, de forma razoavelmente simples. O consumo total de cada combustível de aviação é fornecido diretamente pelo anuário da ANP. O consumo de combustível em vôos domésticos pode ser obtido através da totalização do consumo de companhias brasileiras em operações regulares domésticas e operações não-regulares relatado no anuário da ANAC.

Esse cálculo é válido porque não se admite, no Brasil, a execução de trechos domésticos por companhias estrangeiras — os trechos dentro do país destinados apenas a alimentar vôos internacionais, e que são, portanto, permitidos, são, pelos critérios do IPCC (2000), considerados também como internacionais. Assim, todos os vôos executados por companhias estrangeiras são considerados como internacionais.

O consumo de combustível em vôos internacionais pode então ser obtido pela diferença entre o consumo total e o consumo doméstico.

A partir dos consumos em vôos domésticos e internacionais é possível estimar as emissões de cada gás de interesse a partir da metodologia delineada na seção 4.2. O fluxo de dados proposto é ilustrado na figura 6.1.

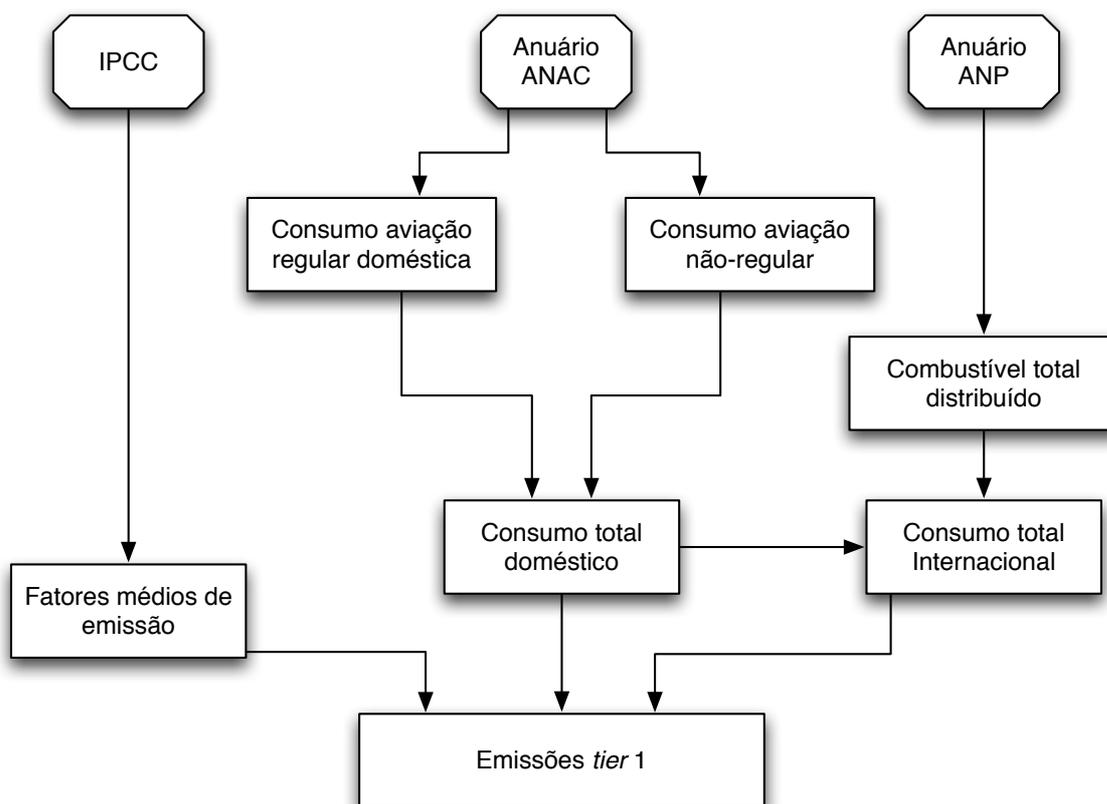


Figura 6.1: Fluxo de dados proposto para inventários *tier 1* no cenário I.

### 6.3.2 Tier 2b

É possível ainda calcular emissões através do *tier 2b* para a aviação regular, que representa a maioria das operações de transporte aéreo. As emissões e o consumo em LTO relativos ao transporte regular doméstico e internacional podem ser obtidos através dos registros da base HOTRAN, de acordo com o método descrito na seção 4.3.2. Note-se que a adoção de dados do HOTRAN implica em uma aproximação, visto que esses dados correspondem a previsões e não a constatações dos movimentos da aviação regular.

A partir do anuário da ANAC é possível, então, obter os valores de consumo de combustível para a aviação regular doméstica operada por companhias brasileiras e para a aviação não-regular. O consumo de combustível da aviação regular internacional (incluindo atividades de empresas brasileiras e estrangeiras) pode ser obtido subtraindo-se esses dois valores do consumo total de combustíveis registrado no anuário da ANP.

Pode-se então associar o consumo em vôos regulares domésticos por companhias brasileiras e o consumo em vôos internacionais aos LTOs obtidos para esses dois grupos a partir do HOTRAN,

e assim calcular as emissões em cruzeiro do transporte regular pelo método *tier 2b*. O processo é ilustrado na figura 6.2.

Para que seja observado o princípio da Completeza, os dados de emissão em LTO e cruzeiro da aviação regular precisam ser complementados com as emissões totais da aviação não-regular. Estas emissões devem ser calculadas a partir do consumo de combustível dessa atividade (obtido do anuário da ANAC) com *tier 1*, já que não há, nesse cenário, dados de movimentação para essa categoria.

### 6.3.3 *Tier 2c*

Apenas as escolhas de dados de consumo de combustíveis diferem entre os *tiers 2b* e *2c*. No caso do *tier 2c* é preciso empregar uma fonte de dados que apresente separadamente o combustível consumido em cada tipo de aeronave. Os dados econômicos do anuário estatístico da ANAC representam a única fonte com disponibilidade irrestrita e que apresenta essa divisão.

No entanto, existem dois problemas em se aplicar essa fonte de dados. Primeiramente, o anuário da ANAC só trata de companhias aéreas brasileiras. Isso implica na necessidade de se estimar o consumo de cada tipo de aeronave estrangeira de forma aproximada, ou de se aplicar um *tier* menor para essas atividades.

O segundo problema diz respeito ao consumo de combustível registrado para cada tipo de aeronave na aviação regular internacional. É preciso fazer um ajuste nesses dados de consumo internacional das empresas brasileiras, porque, como mencionado anteriormente, pela metodologia do IPCC só se deve considerar o consumo de combustível vendido no país. Já que não há, nesse cenário, dados suficientes para se calcular a fração nacional do combustível empregado em trechos internacionais, é preciso assumir um valor para essa fração (como, por exemplo, 0,5). Na realidade, esse valor deve ser dependente de vários fatores, inclusive das variações de preços de combustíveis no Brasil e no exterior, por isso, uma hipótese como essa é uma ameaça em potencial à observância do princípio da Acurácia.

Note-se que, com o objetivo de atender ao princípio da Completeza, a soma de todo o consumo de combustível empregado deve ser verificada frente ao consumo total obtido a partir do anuário da ANP, que pode ser considerado completo.

Os valores de consumo de combustíveis para cada tipo de aeronave podem ser utilizados juntamente com movimentos inferidos a partir da base de dados HOTRAN para se estimar as

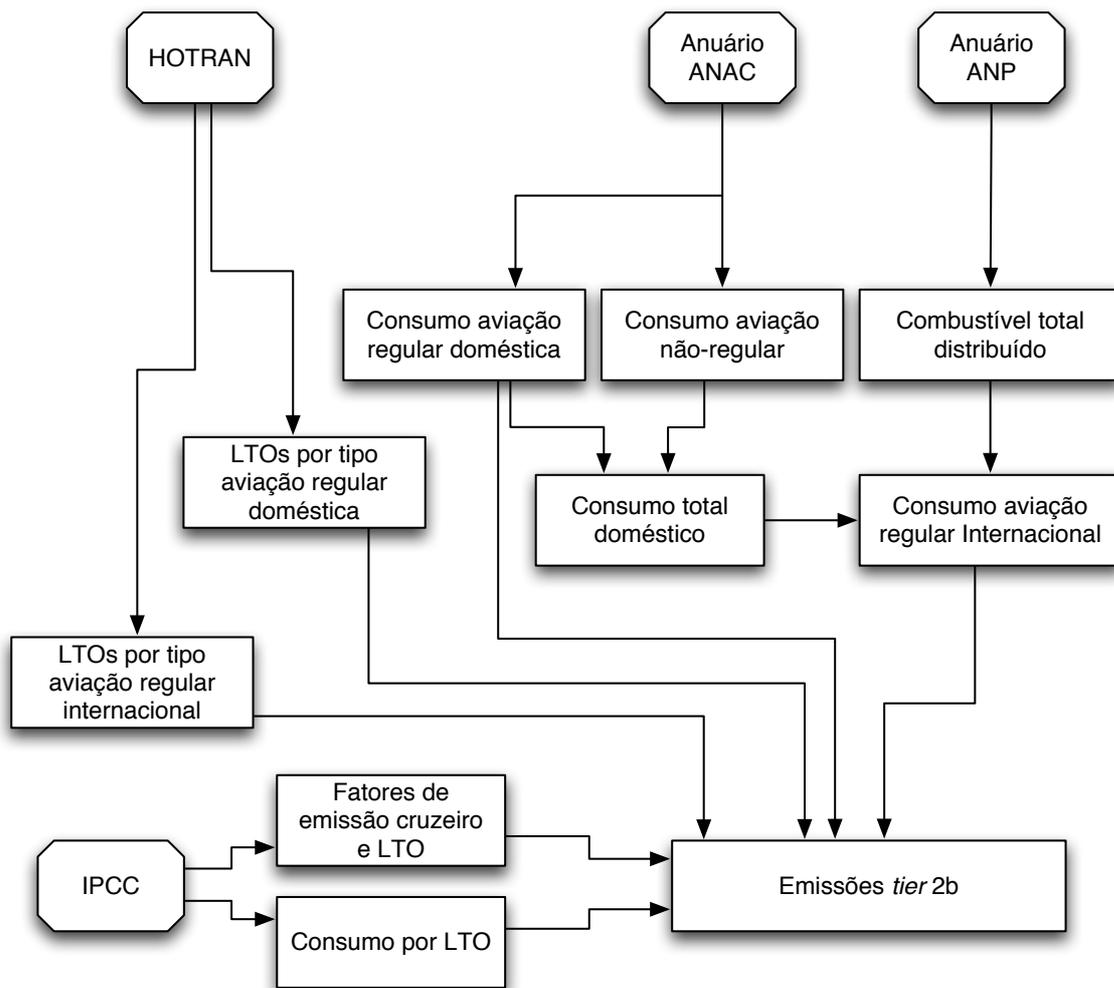


Figura 6.2: Fluxo de dados proposto para inventários *tier 2b* no cenário I.

emissões, de acordo com o método descrito na seção 4.3.3. O fluxo de dados é esboçado na figura 6.3.

Como no caso do *tier* 2b, as emissões da aviação não-regular precisam ser calculadas separadamente, através de *tier* 1, e então somadas às da aviação regular.

## **6.4 CENÁRIO II**

Uma gama maior de dados passa a estar disponível neste cenário, e, assim, é possível empregar *tiers* mais complexos e obter, em geral, resultados mais acurados. Além dos dados disponíveis no cenário I, tem-se, principalmente, dados detalhados de movimentação de aeronaves.

### **6.4.1 Tier 1**

As estimativas das emissões através de método *tier* 1 podem ser obtidas exatamente da mesma forma descrita para o cenário I, que já é essencialmente adequada, já que não requer o uso de aproximações ou estimativas consideráveis.

Tem-se a opção de empregar outros dados de consumo de combustível, como as estatísticas adicionais da ANP e as estatísticas detalhadas da ANAC, de forma complementar, a fim de verificar os valores utilizados nos cálculos.

### **6.4.2 Tier 2b**

O cálculo das emissões pode ser feito a partir do *tier* 2b de forma mais adequada no cenário II.

Em relação aos dados de consumo, é possível empregar ainda os dados do anuário da ANP, e estimar as parcelas de consumo de combustível da aviação regular doméstica, não-regular e regular internacional de forma análoga. No entanto, tem-se a possibilidade de aplicar, além dos dados do anuário da ANAC, as estatísticas detalhadas da ANAC no que se refere à aviação regular doméstica por companhias brasileiras, com fins de verificação dos valores.

No que se refere aos movimentos, seria possível empregar os dados da base VRA da ANAC, mantendo-se ainda o mesmo procedimento usado no cenário I, mas atendendo melhor ao princípio

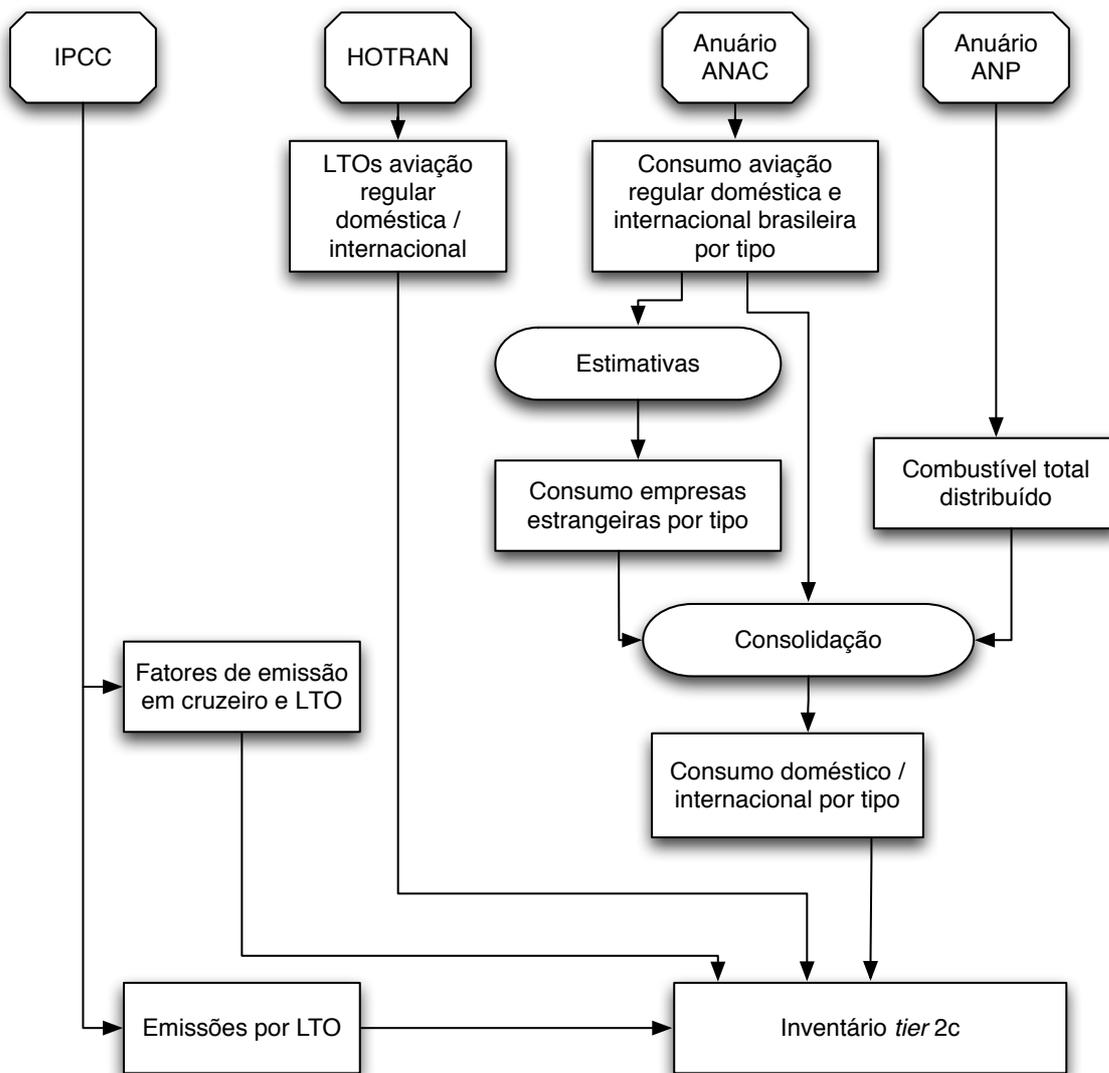


Figura 6.3: Fluxo de dados proposto para inventários *tier 2c* no cenário I.

da Acurácia — já que se utilizaria dados corrigidos pelas alterações de vôos notificadas — e ao princípio da Completeza — já que se passaria a incluir alguns vôos não-regulares, apesar do fato de que esses ainda não estariam totalmente contemplados.

No entanto, os dados do DECEA e os dados estatísticos detalhados da ANAC devem ser preferidos, já que incluem, em princípio, todas as atividades de empresas aéreas brasileiras e estrangeiras em vôos regulares e não-regulares. O ideal seria conjugar as duas fontes, empregando os dados do DECEA e verificando-os com a ajuda dos dados estatísticos da ANAC, por exemplo.

As estimativas para consumo de combustível em cruzeiro (ver equação 4.10) podem ser obtidas com maior acurácia se calculadas separadamente para diferentes tipos de atividade (por exemplo, regular doméstica, regular internacional e não-regular), ao invés de em um único bloco. Assim, ainda que de forma simplificada, se estaria levando em conta os diferentes tipos de aeronaves e as diferentes distâncias características presentes em cada um desses tipos.

O procedimento proposto é ilustrado na figura 6.4.

### **6.4.3 Tier 2c**

Como discutido no caso do cenário I, apenas as escolhas de dados de consumo de combustíveis diferem entre os *tiers* 2b e 2c. Existem, como opções para fontes de dados de consumo de combustível segregado por tipo de aeronave, os dados econômicos do anuário estatístico da ANAC e os dados estatísticos detalhados da ANAC.

De maneira semelhante ao que ocorre no cenário I, ambos os conjuntos de dados se resumem a registrar os consumos de combustível correspondentes às operações de companhias brasileiras e, da mesma forma, os dados para companhias estrangeiras precisam ser estimados, ou um *tier* mais baixo deve ser aplicado. O consumo de combustíveis pela aviação não-regular não é segregado por tipo de aeronave em nenhuma fonte e, portanto, as emissões relativas a essa parcela devem também ser calculadas com um *tier* mais baixo.

Por outro lado, ao contrário do que ocorre no cenário I, nesse caso é possível determinar a quantidade de combustível nacional consumida pelas companhias brasileiras operando na aviação regular internacional. Essa quantidade corresponde ao consumo total de combustível pelas companhias brasileiras, que é registrado nas estatísticas adicionais da ANP, subtraído dos valores de consumo registrados pela ANAC para as companhias brasileiras de aviação regular em operações domésticas e para a aviação não-regular.

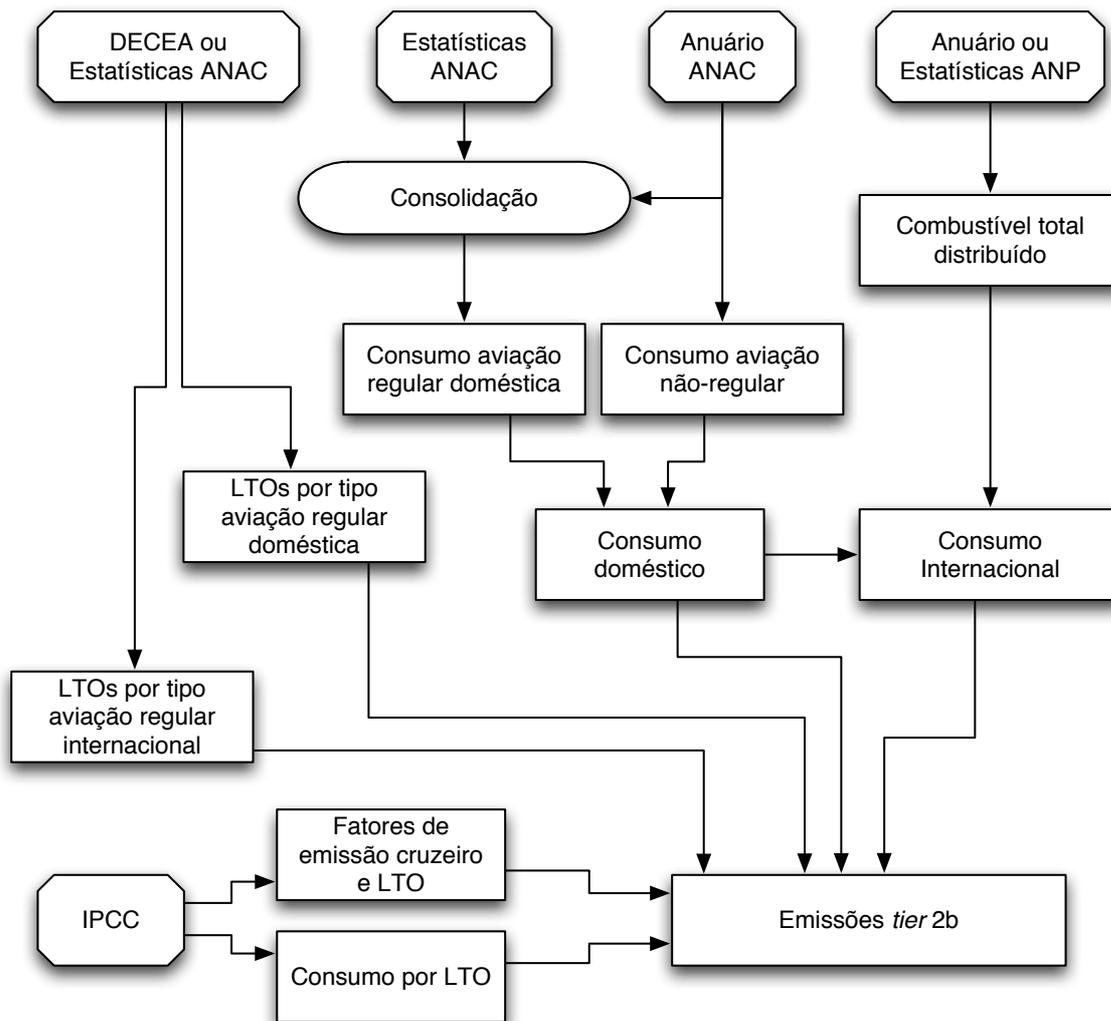


Figura 6.4: Fluxo de dados proposto para inventários *tier 2b* no cenário II.

As fontes para a movimentação das aeronaves que podem ser aplicadas ao *tier 2c* são as mesmas aplicáveis ao *tier 2b*. O fluxo de dados é ilustrado na figura 6.5.

#### **6.4.4 Tier 3a**

A aplicação do *tier 3a*, ao contrário do que ocorre com *tiers* menores, independe de dados de consumo de combustível. Os dados de movimentação de aeronaves, no entanto, precisam conter a identificação dos aeródromos de origem e destino para cada segmento realizado.

Destacam-se entre as possíveis fontes os dados estatísticos detalhados da ANAC, que já apresentam um valor de distância percorrida, dispensando o cálculo da distância através de um aproximação de círculo máximo; e os dados do DECEA, por sua completeza.

Como a acurácia dos resultados está, nesse caso, estritamente vinculada à qualidade dos dados de movimentos, seria desaconselhável o uso da base HOTRAN como fonte.

### **6.5 OPORTUNIDADE DA APLICAÇÃO DOS TIERS**

Tomando como base o princípio da Acurácia, o ideal é que, sempre que for razoável a aplicação de dois *tiers* diferentes, se opte pelo *tier* de nível mais alto. Assim, sempre que tanto métodos *tier 1* quanto *tier 2* possam ser aplicados a partir dos dados presentes no contexto brasileiro, é preferível optar pelos métodos *tier 2*.

Já em relação aos métodos *tier 3*, vale ressaltar que, apesar de considerados mais acurados que os demais, estes demandam quantidade consideravelmente maior de esforço para sua elaboração; e que sua aplicação ainda não é exigida pela Conferência das Partes da UNFCCC.

Dessa forma, embora seja interessante para o Brasil considerar, para o futuro, a implementação de inventários *tier 3*, no momento esta não é imprescindível.

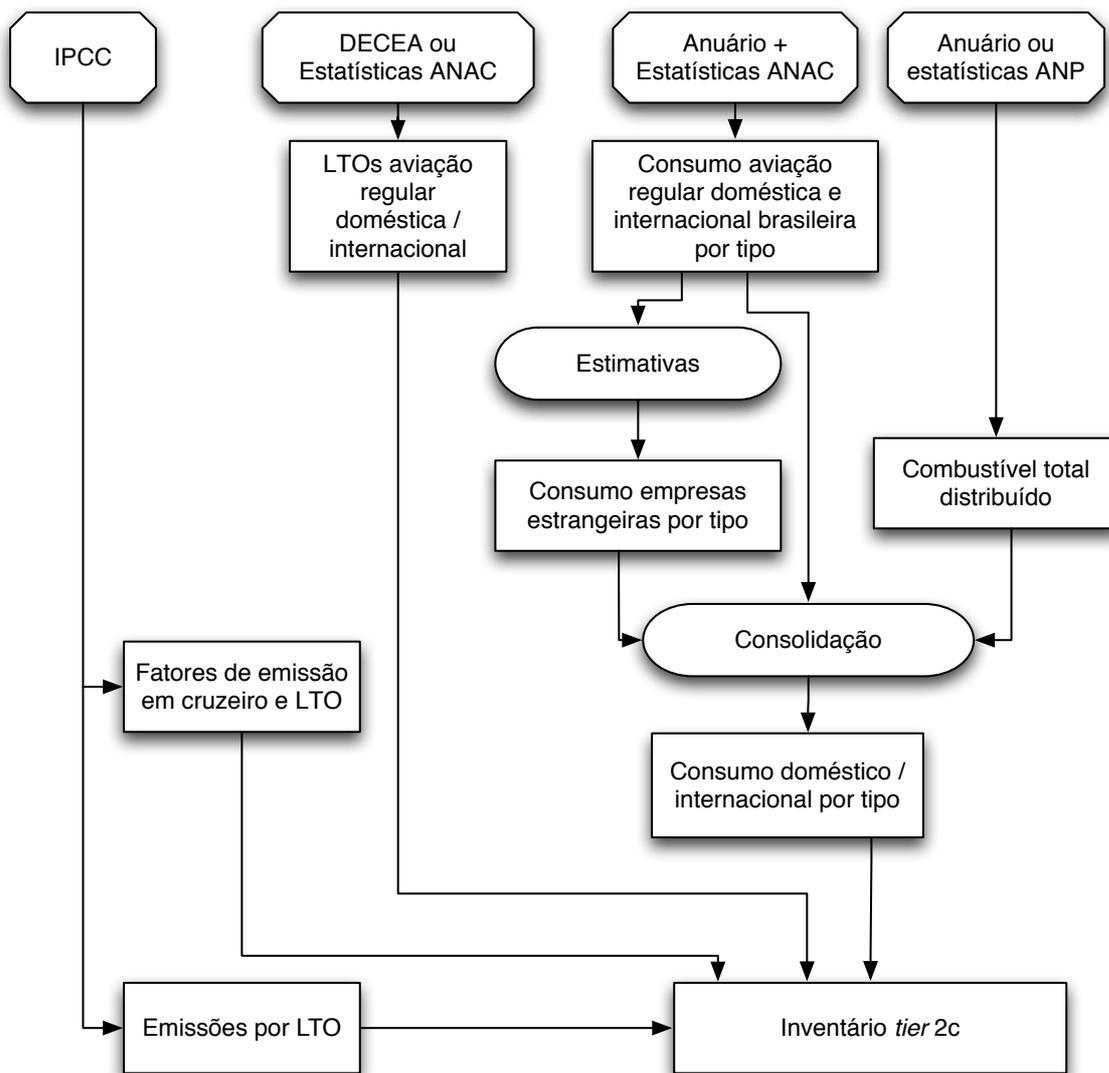


Figura 6.5: Fluxo de dados proposto para inventários *tier 2c* no cenário II.

## 6.6 ÁRVORE DE DECISÃO PARA A CONSTRUÇÃO DE INVENTÁRIOS

Em uma situação real, espera-se observar uma condição intermediária entre os cenários I e II. Os mesmos critérios empregados nas seções anteriores foram utilizados para construir uma árvore de decisão, mostrada na figura 6.6. A árvore não considera métodos *tier 3*, dado o disposto na seção 6.5.

Essa árvore considera as fontes de dados e problemas específicos do caso brasileiro, discutidos neste trabalho, em contraste com os critérios generalizados aplicados na construção das árvores de decisão definidas nos guias do IPCC (2006, p. 3.60, por exemplo). As duas abordagens também divergem pelo fato de que as orientações do IPCC consideram a importância relativa da aviação para o efeito estufa como fator que pode determinar a necessidade de criação de processos adicionais de coleta de dados. Neste trabalho, por outro lado, a aviação é tratada independentemente dos outros setores, e para a construção do esquema mostrado na figura 6.6 consideram-se apenas os dados já existentes.

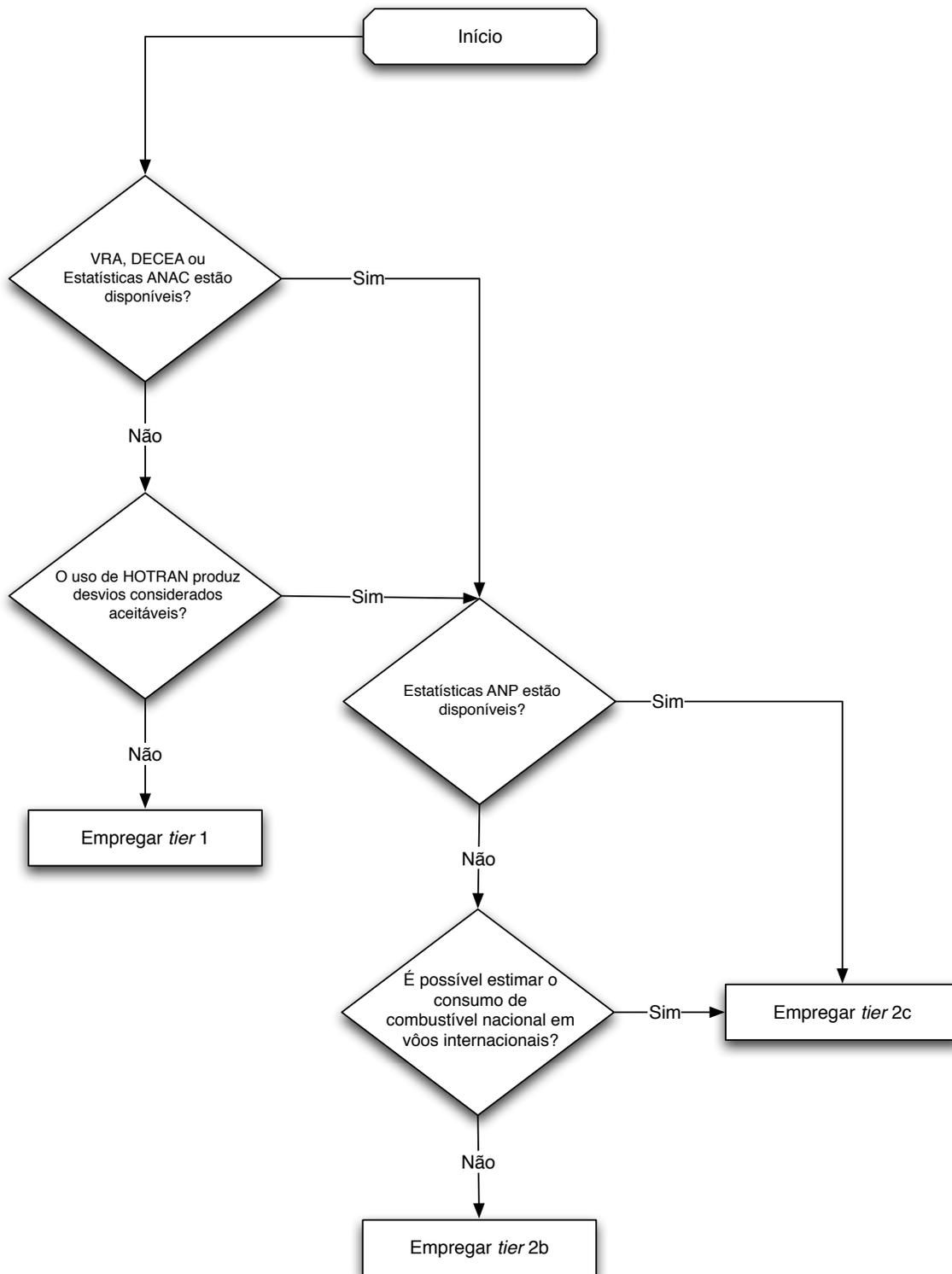


Figura 6.6: Árvore de decisão para a aplicação de *tiers* do IPCC para a elaboração de inventários de emissões para a aviação civil, tendo em vista a disponibilidade das diferentes fontes de dados.

## 7 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentamos as conclusões e comentários finais deste trabalho, incluindo algumas recomendações para uma melhor avaliação dos impactos da aviação nacional sobre o clima global.

### 7.1 RESUMO DO DESENVOLVIMENTO

Ao longo deste trabalho foram discutidos vários tópicos relativos à participação da aviação no problema do aquecimento global e à elaboração de inventários de gases do efeito estufa pelo Brasil, como forma de contribuição para o entendimento e o controle do problema.

Inicialmente, foram apresentados os conceitos e dados básicos sobre o mecanismo de aquecimento global através do aumento da concentração de gases do efeito estufa. As formas de contribuição da aviação para esse processo, e a quantificação dessa contribuição foram abordadas. Foram apresentados dados que mostram que a participação da aviação no processo antrópico de aquecimento global vai muito além das emissões de CO<sub>2</sub>. Foi também discutido como, apesar de relativamente pequena, essa contribuição tende a crescer, de forma que medidas para o controle dessas emissões são importantes.

Em seguida foram abordados os inventários de emissões e seu papel no combate ao problema do aquecimento global. Foi discutido, ainda, como a elaboração regular de inventários de emissões pode servir de base para a adoção de medidas mais informadas, e, portanto, com maior potencial para a eficácia, no controle do problema. Foram apresentados os princípios que devem nortear a elaboração de inventários para que estes possam ser aplicados em um contexto mundial de conciliação do desenvolvimento com a proteção ambiental, e os documentos que devem servir de referência para essa tarefa.

Foi então feita uma revisão da metodologia do Painel Intergovernamental de Mudança Climática para a construção de inventários, incluindo as características de cada um dos *tiers*, ou níveis metodológicos, definidos por ele. Vantagens e desvantagens de cada *tier*, assim como as informações necessárias para sua aplicação foram abordadas.

Foi feito um levantamento, então, das fontes de dados existentes no contexto brasileiro com potencial para serem aplicadas na elaboração de inventários. As fontes de dados foram avaliadas em relação à sua abrangência, aos detalhes que apresentam, e à sua disponibilidade e potencialidade para constituir uma fonte de um programa regular de inventários.

Por fim, foram apontadas soluções em termos de aplicação dos dados, e foi construída uma árvore de decisões geral para a elaboração dos inventários da aviação civil no contexto brasileiro.

## **7.2 ESCOLHA DE MÉTODO PARA OS INVENTÁRIOS BRASILEIROS**

A escolha do método específico, e do conjunto de dados a ser adotado para a elaboração de inventários de emissões da aviação civil no Brasil é dependente da disponibilidade, em um dado momento, de cada uma das fontes de dados (ver figura 6.6).

Conforme discutido, não é necessário que o Brasil se ocupe da elaboração de inventários através de métodos *tier* 3a ou 3b, visto que esses métodos ainda não são efetivamente recomendados pela Conferência das Partes da UNFCCC. No entanto, pode ser que no futuro esse quadro venha a se alterar.

Sob essa ótica, vale à pena notar que o Brasil tem as informações para aplicar método *tier* 3a no cálculo de emissões de gases do efeito estufa pela aviação, e é, portanto, capaz de passar a esse nível de complexidade. Pela falta de modelos nacionais de emissões, a adoção de *tier* 3b não é, no momento, possível.

No que se refere aos *tiers* abaixo do *tier* 3, é possível a elaboração de inventários através de *tier* 2b e 2c, mesmo sem acesso a informações de caráter restrito, apesar de, nesse caso, ser preciso recorrer a uma série de aproximações. Uma vez havendo acesso a um conjunto maior de informações, é possível elaborar, com certa garantia de regularidade, inventários através do método *tier* 2c.

## **7.3 AVALIAÇÃO DA HIPÓTESE PRIMÁRIA**

Portanto, pode-se considerar confirmada a hipótese primária, de que é possível ao Brasil a elaboração regular e padronizada de inventários de emissões de gases do efeito estufa da aviação

civil através de um método detalhado — ou seja, que atenda no mínimo às especificações do *tier 2b*.

#### **7.4 RECOMENDAÇÕES**

A maior dificuldade na aplicação do *tier 2c* é a falta de dados detalhados de consumo de combustível por companhias estrangeiras, que torna necessária a adoção de aproximações e estimativas. Essas companhias são obrigadas a transmitir dados estatísticos à autoridade de aviação civil, mas esses dados, ao contrário do que ocorre com as companhias nacionais, não incluem informações sobre o consumo de combustíveis. Levando em consideração não apenas a conveniência para a construção de inventários mais acurados, mas também a possibilidade de estar mais bem preparado frente às preocupações mundiais, tanto na esfera ambiental quanto na econômica, envolvendo a queima de combustíveis fósseis, seria interessante que o agente regulador considerasse estender a obrigatoriedade de relatar o consumo de combustíveis a companhias estrangeiras.

Mesmo no caso das companhias nacionais, mais detalhes poderiam ser requeridos quanto às informações sobre o consumo de combustíveis. O ideal seria que fosse identificada a parcela desse combustível adquirida no país, o que facilitaria o cumprimento das orientações do IPCC ao contabilizar esse consumo.

Além disso, recomenda-se que todas as instituições detentoras de dados estatísticos relacionados ao transporte aéreo ou a combustíveis de aviação avaliem com cuidado quais dessas informações realmente precisam ser de acesso restrito, de forma a não impedir desnecessariamente a divulgação de informações.

Por fim, de forma a garantir um melhor preparo do País frente aos desafios ambientais que se apresentam, devem ser promovidos a pesquisa e o desenvolvimento de modelos de emissões da aviação. Além de possibilitarem a elaboração de inventários *tier 3b*, esses modelos consistiriam em ferramentas para estudos ambientais relacionados à aviação, incluindo previsões a partir de dados sobre variações de demanda, substituições de frota, desenvolvimento tecnológico, entre outros.

## 7.5 PASSOS FUTUROS

Algo que pode ser explorado como continuação deste trabalho é a avaliação quantitativa dos resultados para as emissões alcançados com vários métodos diferentes. Um trabalho com proposta semelhante, a respeito da aviação italiana, foi conduzido por Romano et al. (1999). O problema poderia ser explorado a partir de uma amostra representativa de operações. Além dos *tiers* em si, poder-se-ia avaliar o impacto quantitativo sobre os resultados de mudanças nos dados adotados ou nas aproximações empregadas.

## BIBLIOGRAFIA

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil (2008). *Anuário do Transporte Aéreo 2007 — Volume II: Dados Econômicos*.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2004). *Resolução Nº 17/2004*.

\_\_\_\_\_ (2008). *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2008*.

ARCHER, David (2005). 'Fate of fossil fuel CO<sub>2</sub> in geologic time'. *Journal of Geophysical Research* 110, C9S05.

DAC – Departamento de Aviação Civil / Comando da Aeronáutica (1999). *Instrução de Aviação Civil 1503: Normas para informatização dos dados estatísticos das empresas não-regulares de transporte aéreo*.

\_\_\_\_\_ (2000a). *Instrução de Aviação Civil 1223: Normas para confecção e aprovação de horário de transporte - HOTRAN*.

\_\_\_\_\_ (2000b). *Instrução de Aviação Civil 1504: Procedimentos para o registro de alterações em vôos de empresas de transporte aéreo regular*.

\_\_\_\_\_ (2000c). *Instrução de Aviação Civil 1505: Normas para informatização dos dados estatísticos das empresas brasileiras de transporte aéreo regular*.

\_\_\_\_\_ (2000d). *Instrução de Aviação Civil 1506: Normas para informatização dos dados estatísticos das empresas estrangeiras de transporte aéreo regular*.

DECEA – Departamento de Controle do Espaço Aéreo / Comando da Aeronáutica (2008a). *Instrução do Comando da Aeronáutica 100-11: Plano de Vôo*.

\_\_\_\_\_ (2008b). *Manual do Comando da Aeronáutica 100-11: Preenchimento dos Formulários de Plano de Vôo*.

EEA – European Environment Agency (2009). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook*.

EGGLESTON, Simon (2007). 'IPCC guidelines for estimating national greenhouse gas inventories'. In *Environmental Report 2007*. ICAO – International Civil Aviation Organization.

EPA – United States Environmental Protection Agency (2009). *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990-2007*.

GAO – United States Government Accountability Office (2009). *Aviation and Climate Change*.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (1996). *Revised Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

\_\_\_\_\_ (1999). *Aviation and the global atmosphere*.

\_\_\_\_\_ (2000). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*.

\_\_\_\_\_ (2006). *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.

\_\_\_\_\_ (2007). *Climate Change 2007: AR 4 Synthesis Report*.

JACKSON, J. et al. (2009). *UK Greenhouse Gas Inventory, 1990 to 2007*. AEA Technology, para o UK Department of Energy and Climate Change.

JACOB, Daniel J. (1999). *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton University Press.

LEE, David S. et al. (2009). ‘Aviation and global climate change in the 21st century’. *Atmospheric Environment* 43, 3520–3537.

MINNIS, Patrick et al. (2004). ‘Contrails, cirrus trends, and climate’. *Journal of Climate* 17, 1671–1685.

NRC – USA National Research Council (EUA) (2005). *Radiative Forcing of Climate Change: Expanding the Concept and Addressing Uncertainties*. National Academy Press.

\_\_\_\_\_ (2008). *Ecological Impacts of Climate Change*. National Academy Press.

ONU – Organização das Nações Unidas (1992a). *Declaração do Rio Sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento*.

\_\_\_\_\_ (1992b). *United Nations Framework Convention on Climate Change*.

\_\_\_\_\_ (2002). *UNFCCC Report of the Conference of the Parties on its eighth session*.

\_\_\_\_\_ (2004). *Guidelines for the preparation of national communications by Parties included in Annex I to the Convention, Part I: UNFCCC reporting guidelines on annual inventories*.

ROMANO, Daniela; GAUDIOSO, Domenico; DELAURETIS, Riccardo (1999). 'Aircraft emissions: A comparison of methodologies based on different data availability'. *Environmental Monitoring and Assessment* 56, 51–74.

SCATOLINI, Fábio (2006). 'Transporte aéreo'. In *Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa*. Instituto de Aviação Civil para o Ministério da Ciência e Tecnologia.

WIESEN, P. et al. (1994). 'Nitrous oxide and methane emissions from aero engines'. *Geophysics Research Letters* 21(18), 2027–2030.