

*Adilson Cleômenes Rocha
ICEA – São José dos Campos
acr_64@yahoo.com.br

Maria Paulete Pereira Martins
INPE – São José dos Campos
maria.paulete@cptec.inpe.br

Cícero Barbosa dos Santos
UTP – Curitiba
carcarazao@gmail.com

Artigo Publicado no IV Workshop
de Mudanças Climáticas e Recursos
Hídricos do Estrado de Pernambuco
e I Workshop Internacional Sobre
Mudanças Climáticas e
Biodiversidade na Região Nordeste
do Brasil – Recife – PE

* Autor para contato

ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO PROVENIENTE DA AVIAÇÃO CIVIL REGULAR EM UM DIA ESPECÍFICO.

RESUMO: Este trabalho tem por finalidade estimar a quantidade de CO₂ emitida pela aviação civil de transporte regular nacional, no dia 31 de agosto 2010. Este dia é considerado representativo da média de voos de uma semana do mês em questão. Os resultados visam à produção de informações sobre emissões por aeronaves, bem como para possíveis tomadas de decisões sobre emissões atmosféricas nas proximidades dos 32 principais aeroportos do Brasil e em rotas aéreas onde elas são mais significativas. Com base nos dados de voos repetitivos do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea, foi feito o cálculo do consumo de combustível de todo tráfego aéreo das empresas nacionais previstos no dia de referência, para o ciclo LTO e voo em rota. Para a determinação do consumo de combustível durante o ciclo LTO foram utilizadas informações presentes no ICAO *Engine Exhaust Emissions Data Bank – Subsonic Engines*, e para calcular o consumo de combustível dos voos em rota foi utilizado o modelador de tempo acelerado TAAM, desenvolvido pela Jeppesen, Boeing. Este cálculo levou em conta 19 tipos de aeronaves e 2623 trechos de rotas voados. A partir do valor final encontrado e dos índices de emissões das respectivas aeronaves, obtidos de referências acadêmicas, foi possível estimar a quantidade final da emissão de CO₂.

Palavras Chave: Emissões, Dióxido de Carbono, Aviação.

ABSTRACT: This study seeks to estimate the amount of CO₂ emitted by regular national civil aviation, on August 31, 2010. This day is considered representative of the average flight a week of the month in question. The results aim to produce information on emissions from aircraft, as well as possible making decisions about air emissions near the top 32 airports in Brazil and on routes where they were more significant. Based on flight data repetitive Management Center of Air Navigation, the fuel consumption was calculated, for all scheduled flights of national companies on the reference, for the LTO cycle and flights on the route. To determine the fuel consumption during the LTO cycle we used information present in the ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank - Subsonic Engines, and to calculate the fuel consumption of flights on the route was used accelerated time TAAM modeler developed by Jeppesen, Boeing. This calculation took into account the operation of 19 aircraft types and 2623 portions of routes flown. From the final amount of fuel consumption and emission index of the respective aircraft, obtained from academic references, if the calculated final amount of emission of CO₂.

Keywords: Emissions, Carbon Dioxide, Aviation.

1 - INTRODUÇÃO

Mesmo diante das crises econômicas, as projeções para o futuro do tráfego aéreo é continuar crescendo (ANAC,2012). Dessa forma, a preocupação com a qualidade do ar e com o impacto climático, nas proximidades de grandes aeroportos e em regiões atmosféricas específicas, tem sido constante pelas instituições que acompanham o desenvolvimento das emissões atmosféricas e que têm por objetivo a adoção de ações que mitiguem os possíveis impactos provocados por esse tipo de fonte móvel de poluição. Investigações a respeito das emissões advindas do tráfego aéreo têm sido feitas há várias décadas com o objetivo de compreender seu papel nos vários fenômenos físicos e químicos que podem ocorrer na atmosfera. Observado a Figura 1, verifica-se que dentre as principais substâncias dispersadas pelos motores da aviação o dióxido de carbono (CO_2) é o de maior quantidade. A região da atmosfera onde pode ocorrer a emissão CO_2 é que determinará o tipo de impacto ambiental provocado.

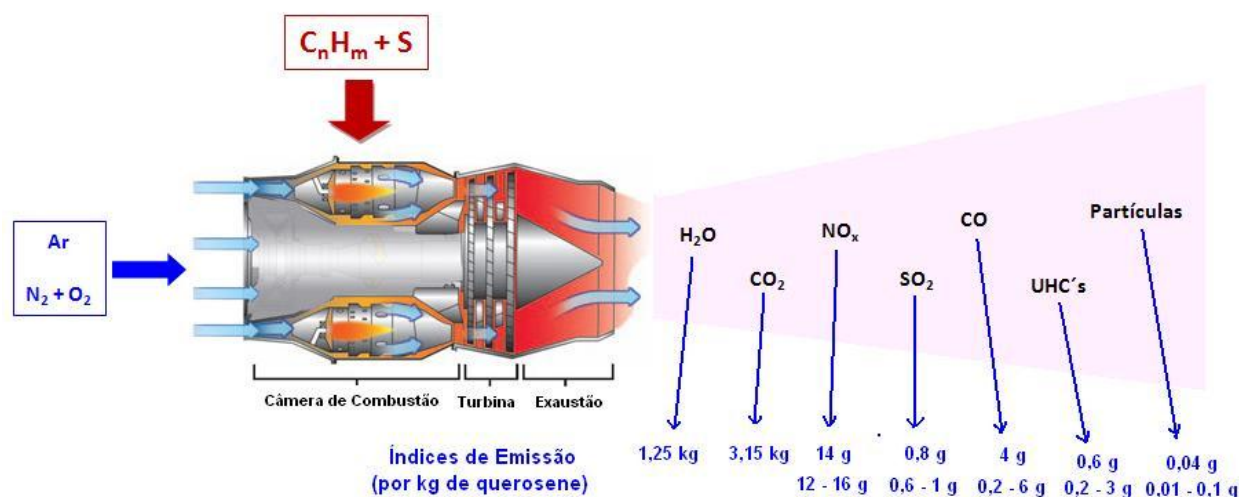


Figura 1 – Produtos da combustão emitidos por motores a jato.

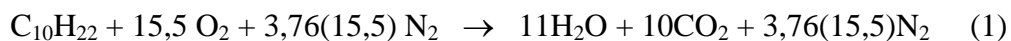
Fonte: Adaptado de Döpelheuer (2002), citado por Kugele (2005).

Um alto grau de incerteza caracteriza o atual conhecimento sobre o impacto das emissões das aeronaves sobre a atmosfera global. Isso ocorre principalmente em função da dificuldade em se caracterizar a intensidade da forçante radiativa devido a essas emissões e da impossibilidade de caracterizar fielmente o perfil de emissão de cada tipo de aeronave. O IPCC (1990) estima que aproximadamente 2% das emissões totais de CO_2 antropogênicas vêm da emissão das aeronaves. Assim, o CO_2 derivado dos motores das aeronaves pode contribuir em torno de 1% do total do aquecimento global provocado pelo homem.

Segundo Sweriduk (2011), baixas concentrações de CO₂ não são capazes de prejudicar a saúde humana, mas sua relação com as mudanças climáticas tem tornado tal composto uma séria preocupação. Altos níveis de CO₂ na baixa atmosfera altera o perfil ácido dos corpos de água, provocando efeitos adversos sobre o ecossistema. Também neste caso, potenciais problemas de saúde, tais como dores de cabeça, sonolência, diminuição da atenção, etc, podem estar relacionados a esta condição.

Segundo a ANAC (2012), o tráfego aéreo pode ser dividido em três categorias, em função de suas características: aviação civil, aviação geral e aviação militar. A preocupação com o transporte de passageiros e carga está relacionado à aviação civil. As forças armadas empregam a aviação militar. Atividades aéreas relacionadas ao turismo, agricultura e comerciais, que empregam aeronaves de pequeno porte, estão vinculadas à aviação geral. A aviação civil tem sido a que mais cresce em quantidade e rapidez, nos anos recentes. Romano (1997) afirma que a demanda pelo transporte aéreo tem crescido mais rapidamente que a demanda por outras formas de transporte e em relação a outras fontes de consumo de energia. Dessa forma, é provável que haja um aumento das emissões globais totais por aeronaves, mesmo considerando a melhoria na tecnologia embarcada e procedimentos operacionais das empresas aéreas.

De acordo com Flack (2005), o combustível de aviação a jato é a querosene (n-decano – C₁₀H₂₂) e a reação química balanceada, na forma de combustão completa, pode ser representada por:



O n-decano, descrito na equação (1), está representado sem a presença de enxofre, e a reação representa uma combustão completa. Contudo, na realidade, o processo é bem mais complicado resultando em vários subprodutos, que não serão abordados neste artigo. Os principais são mostrados na Figura 1. Emissões típicas da aviação consistem de 71% de dióxido de carbono e 28% de vapor de água. A quantidade restante, aproximadamente 1%, é NO_x (PENNER et al., 1999). Para Janic (1999), os efeitos das emissões são classificados na literatura como aqueles que afetam a poluição do ar distante de sua fonte de origem, aqueles que modificam a camada de ozônio, e aqueles que alteram o efeito estufa natural presente na atmosfera. Quatro fatores principais influenciam essas emissões: a) a intensidade e o volume do fluxo de aeronaves numa região; b) o tipo, a concentração espacial e a distribuição dos poluentes dispersados; c) a eficiência energética e o consumo de combustível dos motores; e d) a razão da renovação da frota de aeronaves, com a introdução de aeronaves “limpas”.

Quando se consideram os tipos, a grande maioria das aeronaves utilizadas pela aviação civil possui duas ou mais turbinas. Aeronaves com somente um motor ou com dois motores e helicópteros são usados pela aviação geral. Uma ampla variedade de aeronaves é empregada na aviação militar, sendo possível encontrar quase todos os tipos neste setor. Uma enorme maioria das aeronaves é subsônica. Poucas são as que voam com velocidade acima da velocidade do som, dentre elas as mais comuns são empregadas na aviação militar (ROMANO, 1997).

Durante vários anos, a maior preocupação ambiental estava relacionada às emissões das aeronaves realizadas próximas à superfície ou na porção das emissões que eram dispersas na coluna vertical que se entende do solo até o topo da camada limite. Isso ocorre, pois nesta região os motores das aeronaves são menos eficiente, já que eles operam na maior parte do tempo em modo de espera (*idle*) ou próximo dele. As operações das aeronaves que ocorrem dentro dessa faixa rasa da atmosfera são classificadas como ciclo LTO ou “*landing and takeoff cycle*”. Este ciclo inicia quando a aeronave se aproxima do aeroporto durante o procedimento para pouso, a partir da altitude média de 3.000 pés, efetua o pouso e taxia até o portão de desembarque. Ele continua durante o taxi realizado pela aeronave para a decolagem, durante a realização da decolagem, e posterior subida até a altitude média de 3.000 pés (IPCC, 1999). A Figura 2 ilustra tal ciclo.

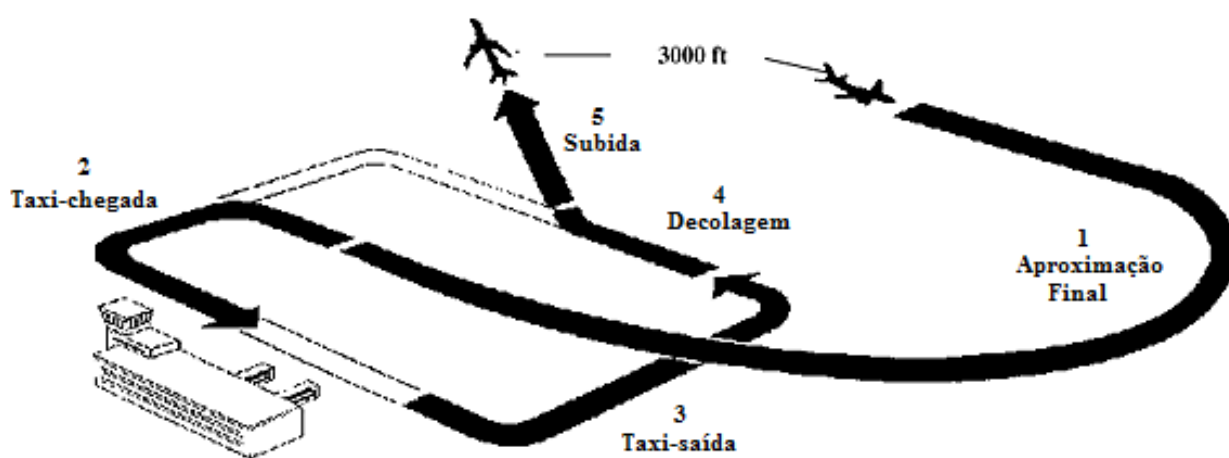


Figura 2 – Ciclo LTO.

Fonte: Adaptado do IPCC (1999).

Cada tipo de aeronave com sua respectiva combinação de motor tem um perfil de emissão característico, definido de acordo com o ciclo LTO de um aeroporto considerado. Elas empregam fatores ou índices de emissões específicos (gramas de poluentes por quilogramas de combustível) para cada fase do voo deste ciclo. Essas fases do voo também são chamadas de modos de operação. Para fins de cálculo, cada avião de uma categoria de aeronaves gasta uma quantidade de tempo em cada um dos cinco modos de operação, apresentados na Tabela 1, e seus motores operam numa

configuração de empuxo pré-definida e padrão para cada modo. As diversas quantidades de emissões calculadas para cada poluente em cada modo de operação podem, então, ser calculadas para produzir emissões típicas por ciclo LTO. A Tabela 1, obtida da AFCEE (2009), mostra a relação existente entre o modo de operação no Ciclo LTO, a configuração de Empuxo utilizada pela aeronave em percentagem, e o tempo gasto em cada modo de operação, por tipo de aeronave. Ela é considerada na condição padrão.

Tabela 1 – Relação existente entre o modo de operação no Ciclo LTO x Configuração de Empuxo x Tempo em cada modo de operação x tipo de aeronave. Condição padrão.

Tipo de Aeronave	Duração Estimada Típica para o Modo LTO de Operação (minutos) - Potência estimada -				
	Taxi e modo de espera para decolagem (Taxi / Idle-out) - 7% -	Decolagem (Take Off) - 100% -	Subida (Climb Out) - 85% -	Aproximação (Approach) - 30% -	Taxi e modo de espera após o pouso (Taxi / Idle-in) - 7% -
Jatos de médio e longo alcance	19,0	0,7	2,2	4,0	7,0
Jatos pequenos e Jatos para Negócios	6,5	0,4	0,5	1,6	6,5
Turboélices	19,0	0,5	2,5	4,5	7,0

Fonte: Adaptado de AFCEE (2009), citado por Rocha (2012).

As características dos voos realizado em rota variam muito, de acordo com a distância percorrida pelas aeronaves. Voos de curta distância, ou seja, de até 400 km, duram aproximadamente 30 minutos e consomem 40% do total de combustível, quantidade comparável ao consumo durante a decolagem. As velocidades dos voos em rota para aeronaves subsônicas mais modernas estão na faixa de 750 a 870 km/h, dependendo do tipo e de sua autonomia. A altitude voada em rota também varia bastante de acordo com o tipo de aeronave, e cada uma delas possui um nível ótimo para o voo de acordo com seu perfil aerodinâmico e peso. As aeronaves civis voam principalmente entre 24.000 e 40.000 pés de altitude. A aviação geral tende a voar em níveis mais baixos, acima de 4.500 até 24.000 pés. Já as aeronaves militares voam em todas as altitudes. O voo realizado em rota é o modo de operação com menor gasto operacional em termos de consumo de combustível, mas normalmente é o que se mantém por um tempo maior nesta condição (ROMANO, 1997).

Para Pham et al. (2010), há duas principais abordagens na literatura para o desenvolvimento de inventários de emissões por aeronaves. Uma está em base global, relacionada à determinação do impacto sobre as mudanças climáticas, e a outra está em base local, que trata do nível de qualidade do ar nas proximidades dos aeroportos. É neste contexto, que este trabalho apresentará as estimativas das quantidades de CO₂ da aviação civil regular nacional, em um dia específico do mês de agosto de 2010, que é dia representativo da média dos voos realizados em uma semana, obtidas por Rocha (2012).

2 - MATERIAL E MÉTODOS

Para quantificar as emissões de CO₂, em um dia específico da aviação civil regular nacional, foram utilizados os dados dos voos nacionais e internacionais retirados de uma planilha de voos repetitivos do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA, 2010). Com objetivo de se calcular as emissões próximas ao solo, durante o ciclo LTO, nos 32 principais aeroportos do Brasil definidos na Tabela 2, e aquelas realizadas quando o voo é realizado em rota, foram adotados dois procedimentos distintos. O primeiro, relacionado ao ciclo LTO, empregou o *ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank – Subsonic Engines* (ICAO, 2010) para calcular o consumo de combustível nos seguintes modos de operação: descida/aproximação do topo médio da camada de mistura (aprox. 3.000 pés) até o solo (*Approach*); toque no solo, rolamento no pouso, taxi após o pouso, condição neutra, e desligamento dos motores (*Taxi/idle in*); partida e condição neutra, verificação para a saída, e taxi para a decolagem (*Taxi/idle out*); decolagem (*Takeoff*); e subida até o topo médio (aprox. 3.000 pés) da camada de mistura (*Climb out*). O segundo utilizou de simulação realizada no *Total Airspace and Airport Modeler* (TAAM), um modelador de espaço aéreo reconhecido internacionalmente, adquirido junto à Jeppesen, subsidiária da *Boeing Company*, pelo Instituto de Controle do Espaço Aéreo (ICEA). No TAAM foi simulado o consumo de combustível em rota dos voos regulares das aeronaves civis, do dia de referência, entre todos os aeroportos citados na Tabela 2. A Figura 3 mostra de modo esquemático as fases de voo (modos de operação) no qual foram feitos os cálculos simulados do consumo de combustível. Com os dados do consumo de combustível durante o ciclo LTO e durante o voo em rota, e com o índice de emissão das aeronaves, definido por Sutkus et al. (2001) como 3.155 g/kg de combustível consumido, valor que independe do modo de operação empregado, foi estimada a quantidade de emissão de CO₂ nos 32 principais aeroportos brasileiros e nas rotas que os interligam (ROCHA,2012).

Tabela 2 – Aeroportos escolhidos para o cálculo das emissões.

Indicador	Aeroporto	Indicador	Aeroporto	Indicador	Aeroporto
SBAR	Aracaju - SE	SBFL	Florianópolis - SC	SBPJ	Palmas - TO
SBBE	Belém - PA	SBFZ	Fortaleza - CE	SBPV	Porto Velho - RO
SBBH	Belo Horizonte - MG	SBGL	Galeão/Rio - RJ	SBRB	Rio Branco - AC
SBBR	Brasília - DF	SBGO	Goiânia - GO	SBRF	Recife - PE
SBBV	Boa Vista - RR	SBGR	Guarulhos - SP	SBRJ	Rio de Janeiro/Santos Dumont - RJ
SBCF	Confins - MG	SBJP	João Pessoa - PB	SBSL	São Luis - MA
SBCG	Campo Grande - MS	SBKP	Campinas - SP	Sbsp	São Paulo - SP
SBCT	Curitiba - PR	SBMQ	Macapá - AP	SBSV	Salvador - BA
SBCY	Cuiabá - MT	SBMO	Maceió - AL	SBTE	Teresina - PI
SBEG	Eduardo Gomes/Manaus - AM	SBNT	Natal - RN	SBVT	Vitória - ES
SBFI	Foz do Iguaçu - PR	SBPA	Porto Alegre - RS		

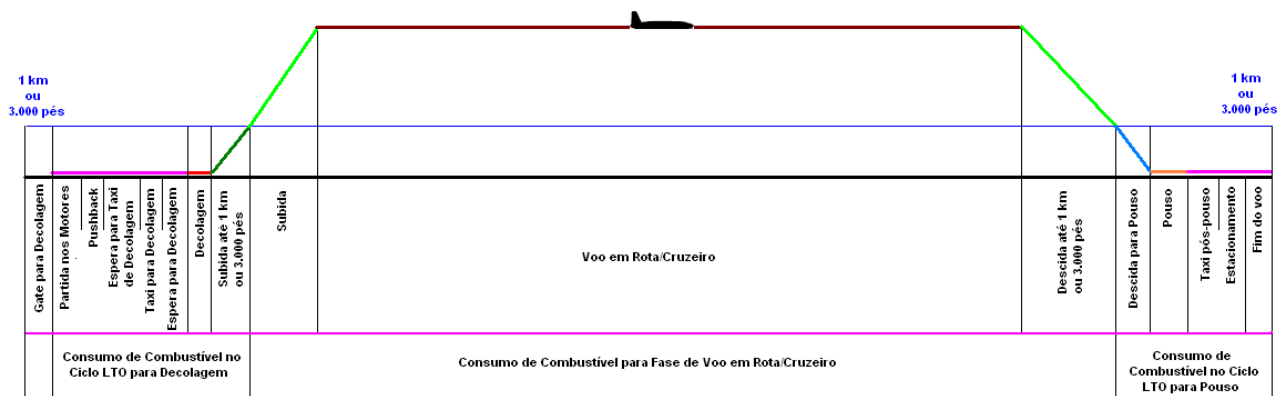


Figura 3 – Esquema do cálculo de combustível em relação às fases de voo.

Fonte: Adaptado de Jepessen (2008).

Em função da complexidade do trabalho, no desenvolvimento do cálculo do combustível foram feitas as seguintes simplificações sobre as condições nas quais as aeronaves operaram durante o ciclo LTO: a) os procedimentos de pouso e decolagem seguem os tempos gastos em cada fase de voo durante o ciclo LTO, definidos pela AFCEE (2009), b) os desempenhos das aeronaves e seus respectivos motores são considerados como se esses fossem equipamentos novos; c) durante o cálculo não foram considerados os atrasos nos voos decorrentes de procedimentos operacionais, possíveis mudanças nos tipos de aeronaves, em função de opções das empresas aéreas, ou cancelamentos dos voos previstos; d) o cálculo de combustível durante o ciclo LTO foi feito considerando o padrão estabelecido pela ICAO, independentemente da configuração dos aeroportos e da variação diária/sazonal da altura da Camada Limite Planetária; e) os motores reais utilizados nas aeronaves não foram efetivamente identificados e sim pré-definidos, por simples escolha, dentre daqueles que normalmente existem nesses equipamentos ou ainda por similaridade (Ver Tabela 2); f) a carga nominal embarcada considerada para os voos foi de 70% daquela máxima prevista em cada tipo de aeronave (SUTKUS et al., 2001). Essas simplificações produzem várias incertezas no resultado final que merecerão estudos posteriores a este para refinamento e ajustes nos resultados.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ciclo LTO

Os resultados obtidos do cálculo das emissões de CO₂, próximo aos aeroportos, durante o ciclo LTO, podem ser vistos na Tabela 4, obtida do trabalho de Rocha (2012). Nela é possível identificar os cinco principais aeroportos em quantidades de emissões. São eles: de Guarulhos – SP (SBGR), Congonhas – SP (SBSP), Brasília (SBBR); Galeão – RJ (SBGL), e Santos Dumont – RJ (SBRJ). Quando se considera a quantidade de emissão produzida pela aviação regular nacional nos dois principais aeroportos existentes nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro (quatro no total), verifica-se que a soma das emissões representam um valor aproximado de 39% das emissões totais. Já quando se avalia somente os dois principais aeroportos, ou seja, Guarulhos e Congonhas, tendo como base o número de voos, eles representam uma emissão de aproximadamente 25% do total. Isso representa uma emissão conjunta desses dois aeroportos de mais de 1.352 ton/dia de CO₂. Considerando a possibilidade de este valor ser a média diária anual, estima-se um total de emissão de dióxido de carbono de aproximadamente 4,9 x 10⁵ ton/ano, somente para os dois principais aeroportos existentes em São Paulo. O aeroporto de Brasília (SBBR) destaca-se por ser o terceiro em emissões nacionais de CO₂ com mais de 524 ton/dia e, também, por ser o único fora da região Sudeste. Para o somatório das emissões totais de CO₂, considerando somente os aeroportos investigados, a quantidade determinada ultrapassa 5.494 ton/dia ou 2,0 x 10⁶ ton/ano, se considerada a emissão diária como média do ano.

Tabela 4 – Estimativa das emissões de CO₂, para o ciclo LTO, em 32 (trinta e dois) dos principais aeroportos nacionais (em g/dia).

Principais Aeroportos Nacionais	SBSP	623.146.984	SBPA	248.167.631	SBSV	300.719.298	SBSL	60.157.805
	SBGR	729.355.516	SBFL	108.544.210	SBRF	198.395.897	SBBE	102.916.479
	SBKP	216.642.524	SBCT	289.250.842	SBFZ	156.327.821	SBEG	92.996.559
	SBGL	412.082.469	SBFI	36.638.069	SBMO	52.182.754	SBPV	34.220.487
	SBRJ	380.035.336	SBBR	524.713.761	SBAR	33.137.501	SBBV	5.269.039
	SBCF	325.260.844	SBCG	76.542.035	SBJP	23.540.086	SBPJ	10.817.012
	SBBH	22.045.279	SBCY	102.545.261	SBNT	68.054.549	SBRB	11.536.321
	SBVT	105.709.853	SBGO	86.667.219	SBTE	37.220.608	SBMQ	19.950.012

Fonte: Rocha (2012).

A Figura 4 mostra graficamente essa distribuição.

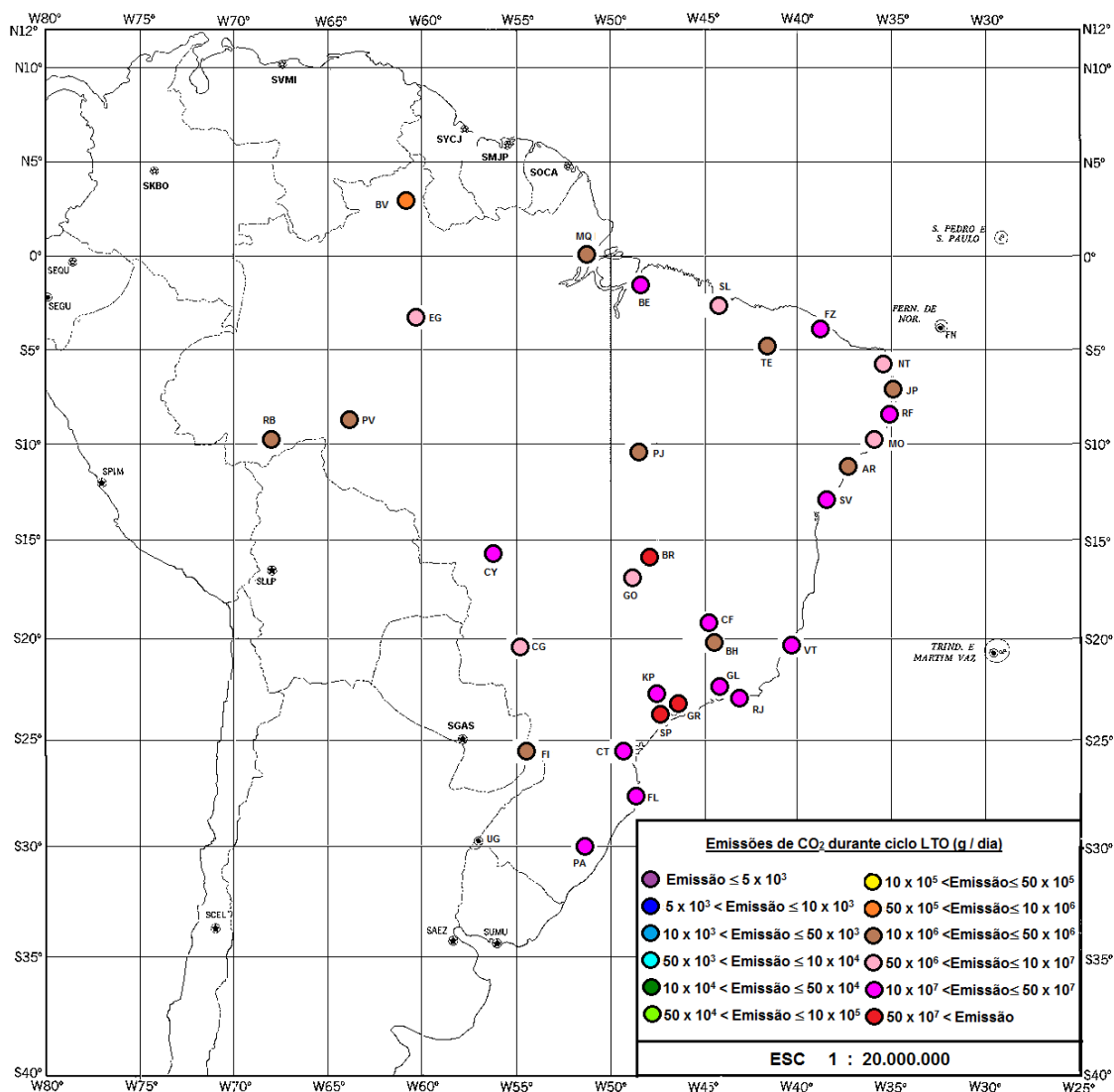


Figura 4 – Emissões de dióxido de carbono durante ciclo LTO (Sup/3.000 pés), em g/dia.

Fonte: Rocha (2012).

3.2 Voo em Rota

Em função das características da aviação civil, que possui rotas voadas de longo curso e rotas voadas regionalmente (estas com distâncias relativamente próximas e realizadas em níveis de voos mais baixos), este trabalho dividiu os resultados obtidos em duas faixas da atmosfera. São elas: entre 3.000 e 30.000 pés e entre 30.000 e 40.000 pés.

A distribuição detalhada das quantidades de CO₂ emitidas por trecho de rota voada, bem como a quantidade total dispersada pelas aeronaves, pode ser encontrada em Rocha (2012).

A Figura 5 apresenta graficamente o resultado obtido, entre 3.000 e 30.000 pés, em g/dia NM⁻¹.

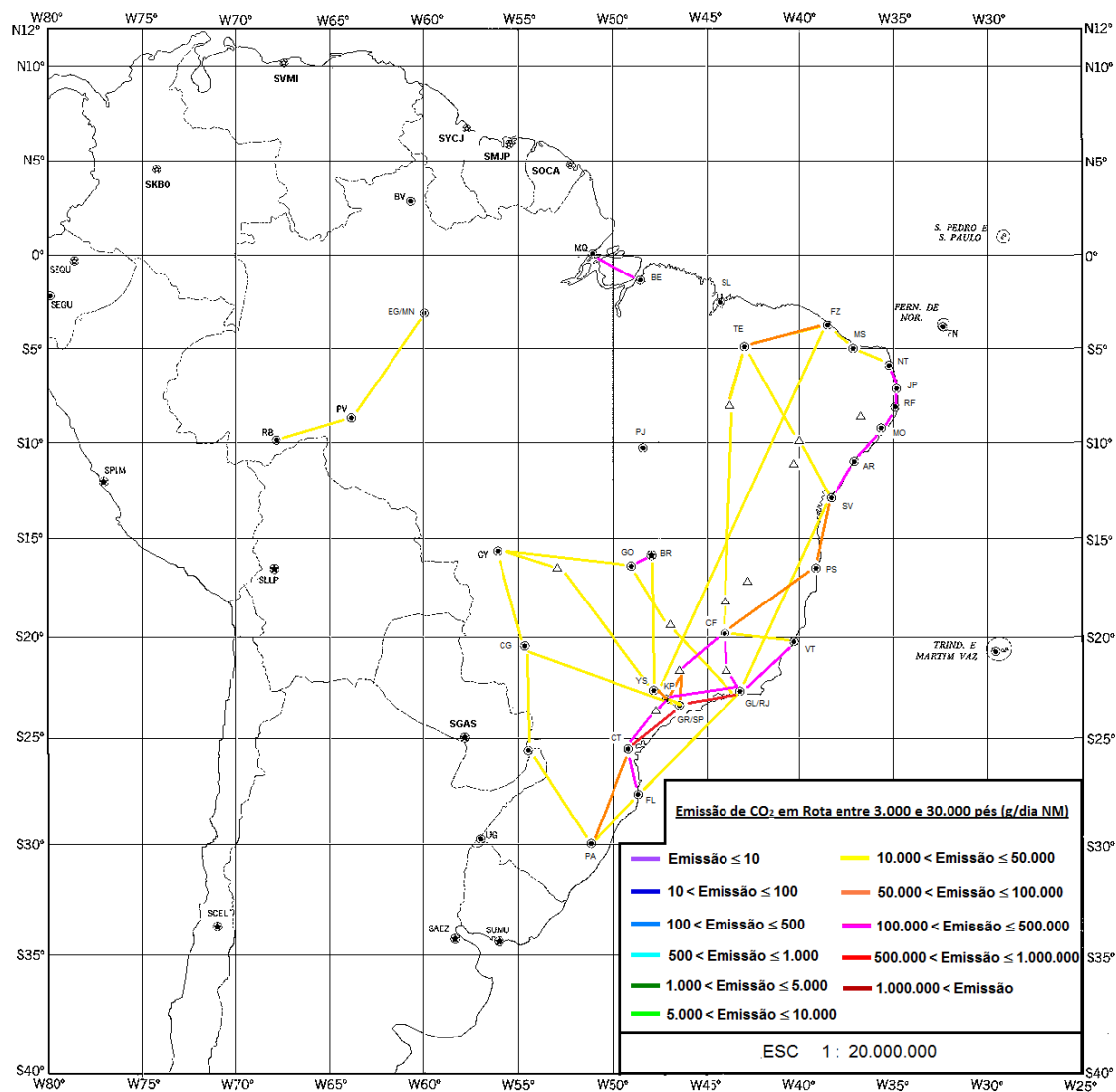


Figura 5 – Emissões de dióxido de carbono durante voo em rota entre 3.000 a 30.000 pés, em g/dia NM.

Fonte: Rocha (2012)

Rocha (2012) estimou a quantidade total diária de CO₂ emitida, na faixa da atmosfera entre 3.000 a 30.000 pés, de aproximadamente 1.275 ton/dia. Se considerarmos este valor como uma média diária anual, a quantidade de emissão estimada anual é superior a $4,6 \times 10^5$ ton/ano. Este valor é bem próximo aos estimados quando se considera as quantidades de emissões realizadas próximas aos aeroportos de Congonhas e Guarulhos, na cidade de São Paulo, juntas.

A Figura 6 apresenta graficamente o resultado obtido, entre 30.000 e 40.000 pés, em g/dia NM⁻¹.

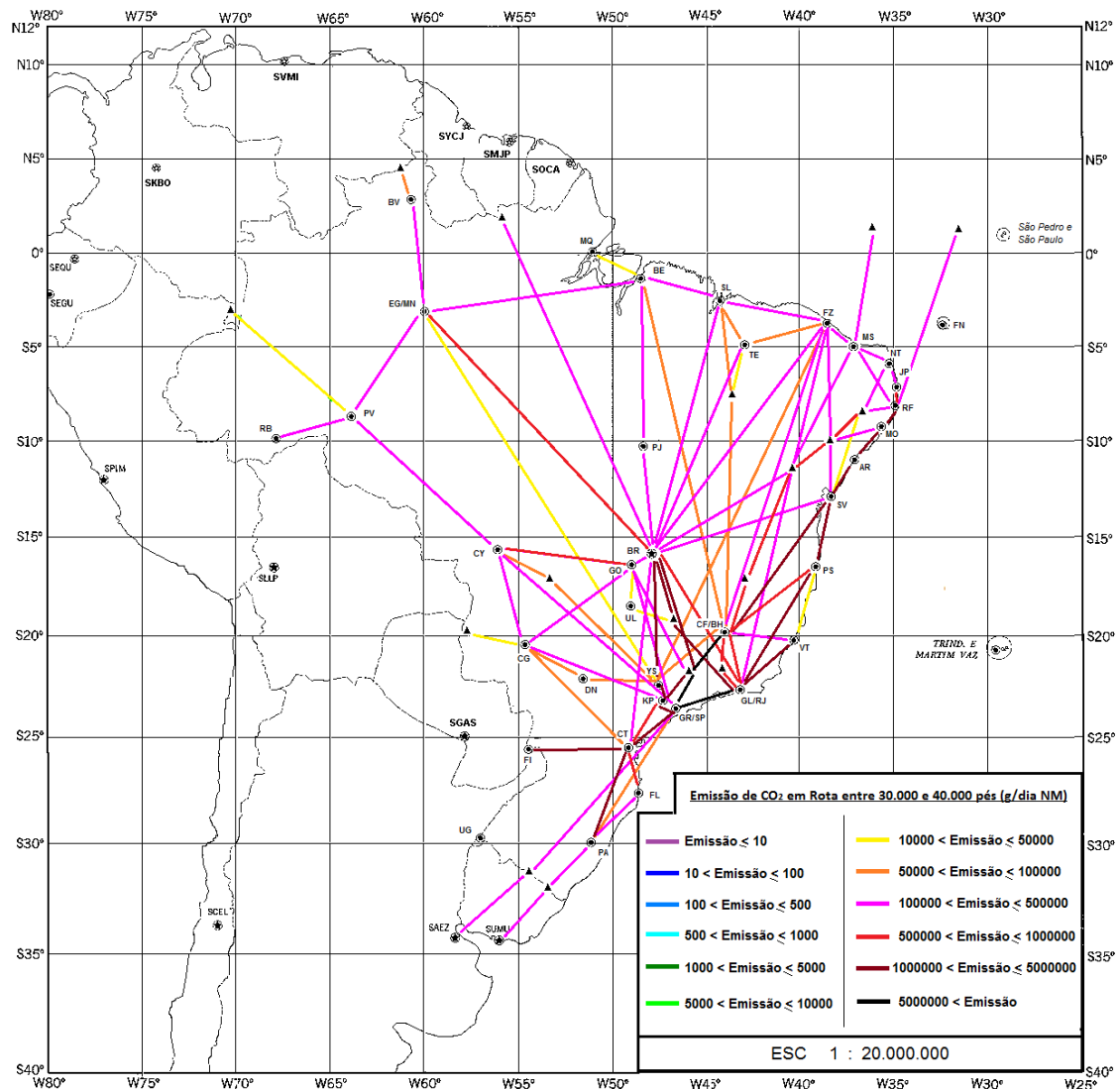


Figura 6 – Emissões de dióxido de carbono durante voo em rota entre 30.000 a 40.000 pés, em g/dia NM.

Fonte: Rocha (2012)

A quantidade total diária de CO₂ emitida estimada na faixa da atmosfera entre 30.000 a 40.000 pés é aproximadamente 18.598 ton/dia. Se considerarmos este valor como uma média diária anual, a quantidade de emissão estimada anual é superior a $6,7 \times 10^6$ ton/ano.

Com os resultados obtidos, observa-se que a relação entre a quantidade de emissões de CO₂ entre 30.000 a 40.000 pés de altitude e a quantidade de emissões entre 3.000 a 30.000 pés é de aproximadamente 1.458%. Ou seja, a quantidade de emissão realizada em níveis mais altos é muito mais significativa.

As Tabelas 5 e 6 identificam os cinco trechos de rotas de maiores emissões entre 3.000 e 30.000 pés, e entre 30.000 e 40.000 pés, respectivamente.

Tabela 5 – Cinco principais trechos de rotas com as maiores quantidades de emissões, no espaço aéreo nacional, entre 3.000 a 30.000 pés de altitude, em g/dia NM.

SEGMENTO DE ROTA	CO ₂
SBGL/SBRJ (S22 48 - W043 15) SBGR/SBSP (S27 37 - W046 39)	1.971.797
SBCT (S25 31 - W049 10) SBGR/SBSP (S27 37 - W046 39)	1.046.977
SBBR (S15 53 - W047 55) SBGO (S16 37 - W049 13)	367.561
TOKIM (S21 58 - W044 10) SBGL/SBRJ (S22 48 - W043 15)	297.959
SBCF/SBBH (S19 37 - W043 58) TOKIM (S21 58 - W044 10)	281.203

Fonte: Rocha (2012)

Tabela 6 – Cinco principais trechos de aerovias com as maiores quantidades de emissões, no espaço aéreo nacional, entre 30.000 a 40.000 pés de altitude, em g/dia NM.

SEGMENTO DE ROTA	CO ₂
SBGR/SBSP (S27 37 - W046 39) SBGL/SBRJ (S22 48 - W043 15)	5.195.786
SBGR/SBSP (S27 37 - W046 39) PCL (S21 50 - W046 30)	5.153.779
SBKP (S23 00 - W047 08) SBGR/SBSP (S27 37 - W046 39)	3.687.578
SBSV (S12 54 - W038 19) SBPS (S16 32 - W039 04)	3.157.192
SBSV (S12 54 - W038 19) SBAR (S10 59 - W037 04)	3.076.200

Fonte: Rocha (2012)

Com os valores apresentados na Figura 5 e Tabela 5 é possível de se observar que:

- entre São Paulo e Rio de Janeiro as emissões de CO₂ se aproximam de 2 ton/dia NM, enquanto que entre São Paulo e Curitiba as emissões ultrapassam 1 ton/dia NM de CO₂;
- o somatório das emissões dos cinco trechos de rotas que possuem as maiores emissões representa um valor próximo de 54% do total de emissões que ocorrem na região de responsabilidade do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB), na altitude entre 3.000 a 30.000 pés;
- existem poucas rotas na região Norte e ao norte da região Centro-Oeste, nesta faixa da atmosfera considerada, conseqüentemente, as emissões nessa faixa vertical da atmosfera são pouco significativas.

Já com os valores apresentados na Figura 6 e Tabela 6 é possível de se observar que:

- entre as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro as rotas existentes também apresentam as maiores quantidades de emissão. A segunda maior região de emissão pode ser percebida nas rotas entre as cidades de São Paulo e Poços de Caldas (PCL), em Minas Gerais. Entre São Paulo e Rio de Janeiro e entre São Paulo e Poços de Caldas as emissões de CO₂ se aproximam de 5,2 ton/dia NM;
- o somatório das emissões dos cinco trechos de rotas que possuem as maiores emissões representa um valor que gira em torno de 27% das emissões totais que ocorrem na região do Sistema de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro (SISCEAB). Os três primeiros trechos em quantidades emitidas pertencem ao polígono representado entre os aeroportos das cidades de Campinas (SBKP), São Paulo (SBGR/SBSP) e Rio de Janeiro (SBGL/SBRJ);
- as emissões feitas nas trajetórias de voos próximas aos aeroportos de Guarulhos/Congonhas e Campinas são concentradas em rotas específicas, o que não ocorre quando se observa as emissões nas rotas de chegada e saída nos aeroportos de Brasília, Confins e Galeão/Santos Dumont, que gera um perfil de “pé de galinha” nas emissões em rota.

Cabe registrar que todas as simplificações levadas a termos neste estudo dificultam a validação ou a comparação com possíveis resultados obtidos por outros pesquisadores, mas não invalidam o objetivo do trabalho.

3.3 Validação dos Resultados

A proposta de validação da estimativa de emissões de CO₂ por aeronaves, realizada neste trabalho, foi feita através de um cálculo relativamente simples. Somando-se as emissões totais do ciclo LTO com as emissões em rota, nas duas faixas da atmosfera estudadas, determina-se um valor de 25.537 ton/dia de CO₂ dispersado na atmosfera, para o dia considerado nesta pesquisa. Levando em conta a possibilidade de este valor ser uma média diária anual, obtemos um valor de emissão ao redor de 9.260 Gg/ano de CO₂ emitido pela aviação civil no Brasil.

Tendo em vista que o IPCC (1999) estima que o consumo de combustível da aviação esteja entre 2-3% de todo o consumo de combustível fóssil utilizado ao redor do mundo, é possível inferir, por exemplo, que a quantidade de CO₂ dispersada na atmosfera está dentro deste intervalo, em relação à emissão total de combustível fóssil utilizado.

Assim, tomando como referência as emissões de dióxido de carbono, em 2005, levantado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT (2009), de 333.077 Gg/ano, e o resultado obtido por esta pesquisa, que determinou uma emissão aproximada de 9.260 Gg/ano de CO₂, é possível identificar que a relação entre as emissões da aviação civil nacional e a mundial gira em torno 2,78%. Este valor está dentro do que prevê o IPCC (1999), validando o trabalho realizado.

Deve-se levar também em conta a limitação existente nesta conclusão, pois nela foi utilizado um valor de emissões de CO₂, calculado no inventário do MCT de 2005, comparativamente a um valor determinado em uma situação específica de 2010 (valores disponíveis ao término da pesquisa). Além disso, a quantidade total estimada de CO₂ não inclui os voos das empresas aéreas internacionais, da aviação geral, militar e helicópteros, e também não foram consideradas emissões em várias outras rotas ligando aeroportos de menores fluxos de tráfego aéreo.

Com essas considerações é possível perceber a necessidade de se iniciar vários estudos na linha de pesquisa relacionada às emissões por aeronaves. Dessa forma, sugere-se que sejam realizadas outras pesquisas que possam melhorar os resultados obtidos, além de desenvolver valores de emissões para os principais aeroportos nacionais. Isso permitirá a identificação dos possíveis impactos locais das emissões, sendo isso uma ação indispensável para a adoção de ações concretas para a melhoria da qualidade do ar.

4 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou as estimativas das emissões de CO₂ advindas de aeronaves. Estas emissões, feitas por este tipo de transporte, vêm se tornando cada vez mais importante, em função do crescimento gradativo e constante no volume de tráfego aéreo no Brasil.

Nos resultados encontrados é possível identificar que dentre os cinco aeroportos com as maiores emissões de CO₂ somente um está fora do eixo Rio-São Paulo, o aeroporto de Brasília, sendo que as emissões ocorridas no aeroporto de Guarulhos atinge um valor próximo a 730 ton/dia. Quando se observa as emissões entre 3.000 e 30.000 pés, duas rotas são destacadas em quantidade de emissões: entre Rio e São Paulo e entre São Paulo e Curitiba, com valores superiores a 1,9 e 1,0 ton/dia de CO₂, respectivamente. A quantidade estimada total emitida nesta faixa vertical da atmosfera é superior a $4,6 \times 10^5$ ton/ano. Para as emissões realizadas entre 30.000 e 40.000 pés as duas principais rotas estão entre São Paulo e Rio de Janeiro e entre São Paulo e Poços de Caldas, com emissões superiores a 5,1 ton/dia. Nesta faixa vertical da atmosfera, no espaço aéreo nacional, a quantidade total de emissão de CO₂ foi estimada num valor superior a $6,7 \times 10^6$ ton/ano. Assim, identifica-se, ainda, que as emissões na faixa superior da atmosfera entre 30.000 e 40.000 pés as emissões são bem superiores àquelas realizadas entre 3.000 e 30.000 pés.

Neste contexto, e diante desses valores, infere-se a necessidade de se produzir um número maior de trabalhos sobre as emissões atmosféricas derivadas da aviação, e com maior detalhamento, no contexto nacional. Isso auxiliará aos órgãos responsáveis pelas ações de regulamentação e de controle adotarem medidas de acompanhamento sobre possíveis impactos climáticos ambientais e de saúde relativos às emissões de CO₂ pelas aeronaves, associados a outras fontes antrópicas existentes.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIR FORCE CENTER FOR ENGINEERING AND THE ENVIRONMENT (AFCEE). **Air emissions factor guide to air force mobile sources**. Methods for estimating emissions of air pollutants for mobile sources at U.S. Air Force installations. Environmental Consulting Division. San Antonio: HQ AFCEE/TDNQ, 2009. Texas. USA. Disponível em: <<http://www.aqhelp.com/files/AF%20Mobile%20Guide%202010.pdf>>. Acesso em 18 dez. 2011.

AGENCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Notícias**. Brasília, 2012a. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/Noticia.aspx?ttCD_CHAVE=429>. Acesso em: 21 fev. 2012.

CENTRO DE GERENCIAMENTO DA NAVEGAÇÃO AÉREA (CGNA). **Planos de voo repetitivo**. Disponível em: <http://www.cgna.gov.br/?page_id=148>. Acesso em 02 set. 2010.

FLACK, R. D. **Fundamentals of jet propulsion with applications**. Cambridge, U.K., 2005.

INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION (ICAO). **ICAO engine emissions databank - aircraft engine emissions**. Quebec: ICAO, 2010. Disponível em <<http://www.caa.co.uk/default.aspx?catid=702>>. Acesso: 25 jan. 2012.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **IPCC first assessment report**. Volume 3: WG III Formulation of response Option Strategies. Geneva: IPCC, 1990.

KUGELE, A. et al. **Aircraft particulate matter emission estimation through all phases of flight**. Centre de Bois des Bordes: EUROCONTROL Experimental Centre, 2008. European Organization for the Safety of Air Navigation EUROCONTROL. Note No. EEC/SEE/2005/0014. Disponível em: <http://www.eurocontrol.int/eec/gallery/content/public/document/eec/report/2005/034_Aircraft_Partitulate_Matter_Emission_Estimation.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2011.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Inventário brasileiro das emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**. Informações Gerais e Valores Preliminares. Brasília: Governo Federal, 2009. Disponível em: <http://pagina22.com.br/wp-content/uploads/2009/11/inventario1.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2012.

PENNER, J. E. et al. **Aviation and the global atmosphere**. New York: Cambridge University Press. 1999. p. 373. IPCC. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/index.php?idp=0>>. Acesso em: 23 fev. 2011.

ROCHA, A. C. **Estimativa Simulada das Emissões Atmosféricas Diárias da Aviação Civil Regular no Brasil em um Dia Específico**. São José dos Campos: INPE, 2012. Dissertação de Mestrado.

SUTKUS, D. J. et al. **Scheduled civil aircraft emission inventories for 1999**: database development and analysis. Washington, D.C.: NASA. 2001. Tech. Rep. NASA/CR-2001-211216. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/>>.

SWERIDUK, G. D. et al. Models for Aircraft Surface Operations Environmental Analysis. In: AIAA AVIATION TECHNOLOGY, INTEGRATION, AND OPERATIONS (ATIO) CONFERENCE, 11., 2011, Virginia Beach. **Proceedings...** [S.l]: AIAA, 2011. VA. USA. Disponível em: <<http://human-factors.arc.nasa.gov/publications/ATIO-2011-OSI.pdf>>. Acesso em 05 fev. 2012.