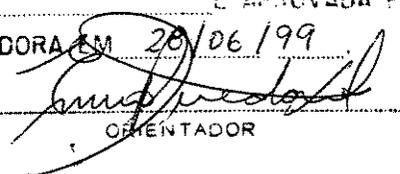


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR CRISTIANO DA SILVA

PINTO

E APROVADA PELA

COMISSÃO JULGADORA EM 20/06/99


ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Inventário de Emissões de Dióxido de Carbono
devido ao Uso de Energia: a Região de Campinas e
seu Setor Sucro-Alcooleiro**

Autor : **Cristiano da Silva Pinto**

Orientador: **Ennio Peres da Silva**

47/99

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

**Inventário de Emissões de Dióxido de Carbono
devido ao Uso de Energia: a Região de Campinas e
seu Setor Sucro-Alcooleiro**

Autor : **Cristiano da Silva Pinto**

Orientador: **Ennio Peres da Silva**

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1999

S.P. - Brasil

RADE BC
CHAMADA:
Ex.
NDO BC/ 39677
C. 229/99
C D
COO 25 14,00
TA 08-12-99
CPD

CM-00137485-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

P658i

Pinto, Cristiano da Silva

Inventário de emissões de dióxido de carbono devido ao uso de energia: a região de Campinas e seu setor sucro-alcooleiro. / Cristiano da Silva Pinto.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Ennio Peres da Silva

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Energia. 2. Efeito estufa (Atmosfera). 3. Aquecimento global. 4. Dióxido de carbono atmosférico.
I. Silva, Ennio Peres da. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

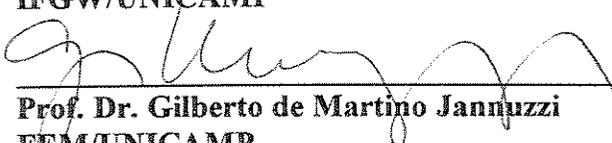
**Inventário de Emissões de Dióxido de Carbono
devido ao Uso de Energia: a Região de Campinas e
seu Setor Sucro-Alcooleiro**

Autor : Cristiano da Silva Pinto

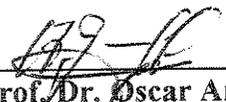
Orientador: Ennio Peres da Silva



Prof. Dr. Ennio Peres da Silva, Presidente
IFGW/UNICAMP



Prof. Dr. Gilberto de Martino Jannuzzi
FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Oscar Antonio Braunbeck
FEAGRI/UNICAMP

Campinas, 29 de junho de 1999

A todos que amo, em especial a meus pais, João e Santina.

E a você, Rosi.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Ennio Peres da Silva pela orientação imprescindível, pelo apoio constante e pela paciência inesgotável.

Agradeço muito a meus pais, João e Santina, cujo apoio e dedicação desde minha infância foram essenciais para que pudesse ter a oportunidade de chegar até aqui.

A Rosilene pelo amor, dedicação, apoio, sugestões e paciência.

A todos os amigos, colegas e funcionários que aqui encontrei e com os quais convivi constantemente durante estes anos e pude compartilhar bons e maus momentos, em especial, Sérgio, Cássia, Ricardo, Lourenço, Gisele, Rodrigues, Neusinha, Carla, Marcelo, Keyla, Thomas, Mônica, Barreda, Madureira, Edna, Cláudio, Manuel e Máximo.

Aos Profs. Luís Augusto Barbosa Cortez e Arnaldo César da Silva Walter pela colaboração inestimável durante a elaboração deste trabalho.

Agradeço à UNICAMP, à Faculdade de Engenharia Mecânica e, em especial, ao Departamento de Energia pela infra-estrutura, sem a qual este trabalho nunca seria realizado.

A todos os funcionários e professores da Faculdade de Engenharia Mecânica.

À CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro concedido.

A todos aqueles que me incentivaram e apoiaram, dando possibilidade para que este trabalho pudesse ser elaborado. Muito obrigado.

*“O homem branco parece não se lembrar do ar que respira.
O vento que deu a nosso avô seu primeiro fôlego,
recebeu, também, seu último suspiro.”*

Resumo

O meio ambiente e sua preservação têm sido alvo de constante atenção pública e científica durante a última década. O efeito estufa, suas causas e suas conseqüências, são tópicos muito abordados neste panorama. A tentativa de se determinar a colaboração humana para este efeito passa necessariamente por um processo de contabilização das emissões de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono, cujas concentrações atmosféricas aumentaram cerca de 30% desde a Revolução Industrial. Nesta dissertação desenvolve-se um inventário regional de emissões de CO₂ devido ao uso de energia, tendo por base a metodologia elaborada pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*, organização vinculada à ONU e à Organização Mundial de Meteorologia. Inicialmente se realiza um estudo sobre o que é o efeito estufa, mostrando como as atividades humanas podem afetar este fenômeno natural. Inicialmente se apresenta a metodologia original desenvolvida pelo *IPCC* e que tem sido adotada mundialmente para a elaboração de inventários nacionais de emissões de gases de efeito estufa. Modificações desta metodologia são sugeridas com o intuito de aplicá-la às regiões cujas fronteiras não coincidem com as divisões geopolíticas institucionais e que, portanto, não possuem dados energéticos consolidados. Tais dados são essenciais para a determinação das emissões de CO₂ originadas do uso de energia (combustíveis fósseis e biomassa). A região escolhida para a aplicação desta metodologia foi objeto de estudo de vários trabalhos nesta década, visto que está inserida em uma importante Região Administrativa do Estado de São Paulo, a de Campinas, e que é formada pelos municípios integrantes do Comitê das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, uma entidade que tem desenvolvido importantes trabalhos relativos ao meio ambiente local. Dentro desta região, o setor sucro-alcooleiro também tem suas emissões estimadas, por ser de grande importância econômica e por evitar taxas de emissão superiores às atuais. Como resultados, concluiu-se por exemplo que a região emite atualmente cerca de 6.841GgCO₂ e a absorção de CO₂ com o uso do álcool e do bagaço chega a 517GgCO₂. O potencial energético de palhas e pontas e suas respectivas emissões também foram considerados. Determinou-se que a emissão de aproximadamente 1.160GgCO₂ pode ser evitada.

Palavras-chave:

Inventário, Emissões, Dióxido de Carbono, Energia, Efeito Estufa, Mudança Climática, Campinas.

Abstract

The environment and its conservation have been the focus of public and scientific attention since the last decade. The greenhouse effect, its causes and consequences are topics of current interest. The attempt to determine the human contribution to this effect demands the accounting of greenhouse gas emissions, mainly CO₂, the atmospheric concentration of which has increased about 30% since the Industrial Revolution. In this dissertation a regional inventory of CO₂ emissions due to energy use is developed. This inventory is based on the guidelines developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Initially the greenhouse effect is reviewed, showing how human activities can affect this natural phenomenon. Then the original IPCC methodology, which has been adopted worldwide for compiling national greenhouse gas emission inventories, is presented. Modifications to this methodology are suggested intending to apply it to regions whose borders do not match institutional geopolitical divisions. It may cause a lack of energy consumption data, which are essential for determining CO₂ emissions originated from fossil fuels and biomass combustion. The region selected for applying the modified methodology has been studied since the beginning of this decade as it is inside the Região Administrativa de Campinas and it is composed of many of the Comitê das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari cities. The latter is a regional organisation responsible for the development of many reports and studies about the local environment. Emissions from the sugarcane agro-industrial sector and the contribution from fuel alcohol and bagasse are also estimated, because this sector is economically important and may reduce the current CO₂ emission rate. The results indicate that the region emits approximately 6.841 GgCO₂, but the energetic use of fuel alcohol and sugarcane bagasse leads to the absorption of about 517GgCO₂. It is also considered the energetic potential of leaves and stalks and their respective emissions. As a result it was found that approximately 1.160GgCO₂ of CO₂ could be avoided.

Keywords:

Inventory, Emissions, Carbon Dioxide, Energy, Greenhouse Effect, Climate Change, Campinas.

Sumário

Agradecimentos.....	v
Resumo	viii
Abstract.....	ix
Lista de Figuras.....	xii
Lista de Tabelas.....	xiii
Nomenclatura.....	xiv
1. Introdução	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo Geral.....	2
1.1.2. Objetivo Específico.....	3
1.2. Estrutura da dissertação	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
3. O Efeito Estufa.....	11
3.1. Definição.....	11
3.2. Relações entre o Efeito Estufa e o Uso de Energia	16
3.3. Outras Causas de Mudança.....	20
4. O Método de Contabilização de Gases de Efeito Estufa do IPCC.....	22
4.1. Descrição Básica.....	23
4.2. A Metodologia IPCC de Contabilização de Emissões de Gases de Efeito Estufa decorrentes do Uso de Energia	25
4.2.1. Considerações e Recomendações	25

4.2.2. Métodos Sugeridos pelo IPCC para Contabilizar as Emissões de CO ₂	26
4.3. A Abordagem Top-Down	28
4.3.1. Estimando o Consumo de Combustíveis por Tipo de Combustível.....	28
4.3.2. Conversão dos Dados Energéticos para uma Única Unidade de Energia.....	29
4.3.3. O Fator de Emissão e o Conteúdo de Carbono dos Combustíveis	30
4.3.4. Carbono Seqüestrado em Produtos	31
4.3.5. Carbono não Oxidado Durante os Processos de Combustão	32
4.3.6. As Emissões Totais Líquidas de CO ₂ do Setor de Energia	34
4.4. A Abordagem Bottom-Up.....	35
5. Aplicação do modelo IPCC para inventários regionais de CO ₂	38
5.1. O consumo de combustíveis.....	38
5.2. O Fator de Emissão e o Conteúdo de Carbono dos Combustíveis.....	41
5.3. Carbono Seqüestrado em Produtos e Carbono não Oxidado	41
6. Aplicação da Metodologia IPCC à Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari	43
6.1. Características Gerais da RBPC	43
6.2. Características Energéticas da RBPC	46
6.3. Contabilização das Emissões de CO ₂ devido ao Uso de Energia na RBPC.....	52
7. Emissões e absorções de gás carbônico devido ao setor sucro-alcooleiro na RBPC....	59
7.1. Emissões e Absorções.....	59
7.2. Perspectivas.....	63
8. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	67
8.1. Sugestões para Trabalhos Futuros	69
9. Referências Bibliográficas.....	71
10. Anexo I	77
11. Anexo II.....	78
12. Anexo III.....	79

Lista de Figuras

Figura 3.1- Comparação entre o espectro solar na superfície terrestre e no espaço, mostrando a absorção de radiação na atmosfera.	12
Figura 3.2- Espectro de radiação da superfície terrestre.	13
Figura 3.3- Transmissividade da atmosfera, mostrando as faixas de absorção de alguns gases de efeito estufa.	13
Figura 3.4- Esquema do efeito estufa global.....	14
Figura 3.5- O balanço energético na atmosfera terrestre e seus fluxos de energia.....	15
Figura 4.1- Diagrama para a determinação das emissões de CO ₂ pela metodologia IPCC	35
Figura 6.1- Localização geográfica da RBPC no Estado de São Paulo.	44
Figura 6.2- Divisão política da RBPC.....	45
Figura 6.3- Distribuição do consumo regional de energéticos em 1995.....	51
Figura 6.4- Emissões de CO ₂ originadas de combustíveis fósseis e renováveis na RBPC.....	54
Figura 6.5- Distribuição do consumo de combustíveis fósseis (94.885 TJ) na RBPC em 1995	55
Figura 6.6- Distribuição das emissões de CO ₂ (6.841 GgCO ₂) por tipo de combustível fóssil na RBPC em 1995.....	55
Figura 6.7- Emissões de CO ₂ originárias de combustíveis fósseis por setor de consumo (1995).....	56

Lista de Tabelas

Tabela 3.1- Concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera antes e após a Revolução Industrial.....	17
Tabela 3.2- Potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa.....	18
Tabela 3.3- Contribuição relativa dos gases de efeito estufa para o aumento da força radiativa da atmosfera.....	19
Tabela 4.1- Fatores de emissão de CO ₂ para combustíveis primários e secundários.....	31
Tabela 4.2- Fração de carbono seqüestrado em produtos não energéticos derivados de combustíveis.....	32
Tabela 4.3- Fração de carbono oxidada para diversos combustíveis.....	33
Tabela 6.1- Consumo de energéticos na RBPC para o ano de 1995.....	47
Tabela 6.2- Consumo de combustíveis fósseis por setor em 1995.....	52
Tabela 6.3- Inventário de emissões de CO ₂ devido ao uso de energia na RBPC em 1995.....	53
Tabela 6.4- Emissões de CO ₂ por setores e por tipo de combustível fóssil em 1995.....	56
Tabela 7.1- Emissões e absorções de CO ₂ no setor sucro-alcooleiro da RBPC (1995).....	62
Tabela 7.2- Potencial energético líquido de palhas e pontas (1995).....	64
Tabela 7.3- Emissões evitadas pelo uso de palhas e pontas comparadas com o óleo combustível.....	65

Nomenclatura

Abreviaturas

CFCs	clorofluorcarbonos (CFC-11, CFC-12, entre outros)
COVNM	compostos orgânicos voláteis exceto metano
GEE	gás de efeito estufa
GLP	gás liquefeito do petróleo
PCI	poder calorífico inferior
PCS	poder calorífico superior
ppmv	parte por milhão em volume
ppbv	parte por bilhão em volume
RBPC	Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari
VTI	Valor de Transformação Industrial

Siglas

CCP	<i>Cities for Climate Protection</i> (Cidades para a Proteção do Clima)
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DNC	Departamento Nacional de Combustíveis
ICLEI	<i>International Council for Local Environmental Initiatives</i> (Conselho Internacional para Iniciativas Ambientais Locais)

IEA	<i>International Energy Agency</i> (Agência Internacional de Energia)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Grupo Intergovernamental sobre Mudança Climática)
NEPAM	Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais da Universidade Estadual de Campinas
OECD	<i>Organisation for Economic Cooperation and Development</i> (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômicos)
ONU	Organização das Nações Unidas
REPLAN	Refinaria de Paulínia
SEADE	Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados
UNCED	<i>United Nations Conference on Environment and Development</i> (Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento)
UNEP	<i>United Nations Environmental Program</i> (Programa Ambiental das Nações Unidas)
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática)
U.S. EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)
WG1	<i>IPCC Working Group 1</i> (Grupo de Trabalho 1 do IPCC)
WG2	<i>IPCC Working Group 2</i> (Grupo de Trabalho 2 do IPCC)
WG3	<i>IPCC Working Group 3</i> (Grupo de Trabalho 3 do IPCC)
WMO	<i>World Meteorological Organisation</i> (Organização Meteorológica Mundial)

Símbolos

CH₄ metano

CO	monóxido de carbono
CO ₂	dióxido de carbono ou gás carbônico
N ₂ O	óxido nitroso
NO _x	óxidos de nitrogênio (NO e NO ₂)
O ₃	ozônio
GgC	gigagrama de carbono
GgCO ₂	gigagrama de dióxido de carbono
tC	tonelada equivalente de carbono
tCO ₂	tonelada equivalente de dióxido de carbono
kcal	quilocaloria
kJ	quilojoules
TJ	terajoules

1. Introdução

Com a crescente valorização do meio ambiente durante as últimas décadas e a preocupação em se cumprir as normas estabelecidas pela Agenda 21, muitas nações têm trabalhado com o objetivo de identificar os fatores de degradação ambiental em seus territórios e estudado medidas para reduzir estes impactos nocivos no planeta. Um dos principais fatores de preocupação da atualidade é o efeito estufa global, suas causas e conseqüências.

Apesar de haver incertezas a respeito da conexão entre as mudanças climáticas globais e o efeito estufa, existe um consenso geral a respeito do aumento das concentrações de gases estufa na atmosfera desde a Revolução Industrial. Muitos acordos internacionais têm sido ratificados com o objetivo de se controlar e mitigar as emissões destes gases.

Os gases de efeito estufa alteram os fluxos de radiação solar e terrestre na atmosfera, sendo portanto considerados responsáveis pelo efeito estufa. Os principais gases estufa antropogênicos são: CO₂, CH₄, N₂O, NO_x (NO e NO₂), CFCs, COVNM's (compostos orgânicos voláteis excetuando-se o metano) e CO. Dentre estes gases o CO₂ teve sua concentração atmosférica aumentada cerca de 30% desde a Revolução Industrial e é aquele emitido em maiores proporções, sendo considerado o principal contribuinte para o efeito estufa global.

O consumo e a geração de energia é a principal fonte de gases de efeito estufa antropogênicos. Gases como o CO₂, CH₄ e CO são gerados principalmente pelo consumo de combustíveis fósseis nos setores de transporte e industrial. A decomposição da matéria orgânica em áreas inundadas por reservatórios de grandes hidrelétricas também gera gases como o CO₂ e

o CH₄, cuja quantidade depende da temperatura ambiente, do tipo de vegetação submersa, entre outros. A emissão de gases de efeito estufa está intimamente relacionada com o uso de energia pela sociedade, e se faz necessária uma análise das relações, em cada região, entre o consumo e a geração de energéticos, e as emissões destes gases.

Para que esta análise seja possível é necessário fazer uso de métodos e modelos para contabilização das emissões de gases de efeito estufa. Tais modelos baseiam-se essencialmente em dados energéticos, em fatores de emissão de gases estufa para cada tipo de combustível e tecnologia, e no potencial de aquecimento global de cada gás. As conseqüências econômicas da mitigação das emissões, as mudanças tecnológicas e outros fatores de interesse podem ser analisados por outros modelos multi-objetivo mais complexos.

A maioria dos inventários realizados para se determinar as emissões de efeito estufa são nacionais, negligenciando, em muitos casos, aspectos energéticos regionais importantes. No caso do Brasil, ou mesmo do Estado de São Paulo, as diferenças regionais são acentuadas e, portanto, tais particularidades devem ser levadas em consideração.

A determinação das emissões de gases de efeito estufa, nos diferentes setores econômicos e regiões, é essencial para se estabelecer políticas energéticas eficientes e que levem em consideração normas e leis ambientais. A tendência atual de se estabelecer limites e taxas internacionais sobre as emissões de gases de efeito estufa acentua a necessidade de um planejamento energético regional.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Neste trabalho são contabilizadas as emissões de dióxido de carbono (CO₂) devido ao uso de energia na Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari (RBPC). O setor sucro-alcooleiro

desta região terá suas emissões/absorções contabilizadas detalhadamente, pois se trata de um setor que pode apresentar vantagens, como por exemplo, evitar emissões de CO₂ através da substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis como o álcool.

1.1.2. Objetivo Específico

Além do objetivo central desta dissertação procurou-se atingir algumas metas específicas: coletar informações a respeito do efeito estufa global possibilitando uma maior compreensão deste fenômeno, aprimorar o perfil de uso de energia na Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari já levantado em outros trabalhos, estudar os procedimentos da metodologia de contabilização de gases de efeito estufa antropogênicos proposta pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), propor e realizar modificações necessárias à aplicação da metodologia IPCC em escala regional.

1.2. Estrutura da dissertação

O Capítulo 2 consta de uma revisão bibliográfica a respeito dos inventários e metodologias para contabilização de emissões de gases de efeito estufa. No Capítulo 3 é discutido o efeito estufa, dando ao leitor as informações básicas para a compreensão deste fenômeno.

O modelo de contabilização de emissões antropogênicas de gases de efeito estufa é apresentado no Capítulo 4. Neste capítulo são analisadas cada uma das etapas da metodologia IPCC, dando-se ênfase a sua aplicação num contexto nacional, que é o objetivo do modelo original.

No Capítulo 5 são implementadas as alterações necessárias para a aplicação da metodologia IPCC em escala regional. Em seguida, no Capítulo 6, o modelo IPCC modificado é

aplicado à Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, cujas características energéticas são devidamente determinadas. Neste capítulo é feito o inventário regional de emissões.

Uma avaliação do balanço das emissões de CO₂ específica para o setor sucro-alcooleiro é apresentada no Capítulo 7. Tal avaliação justifica-se pela importância econômica deste setor para a região e também pela sua contribuição quando se consideram as emissões e absorções de CO₂ no inventário regional.

Finalmente, no Capítulo 8, são feitas as conclusões desta dissertação e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Em 1992 foram realizadas duas importantes convenções sobre meio ambiente organizadas pela ONU. A primeira, conhecida como Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC), realizou-se em maio daquele ano em Nova York [ONU, 1992a] e a segunda, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), em junho do mesmo ano no Rio de Janeiro [ONU, 1992b]. Nestas conferências foi estabelecido que as nações participantes deveriam estabilizar as emissões de gases de efeito estufa na atmosfera.

O artigo 4 da UNFCCC [ONU, 1992a] rege que “todas as nações participantes da Convenção devem elaborar, atualizar periodicamente, publicar e por à disposição da Conferência das Partes¹ inventários nacionais de emissões antrópicas por fontes e das remoções por sumidouros de todos os gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal², empregando metodologias comparáveis a serem adotadas pela Conferência das Partes.”

¹ A Conferência das Partes é o órgão supremo da UNFCCC e é formado pelas nações signatárias desta convenção. Seu objetivo é tomar as decisões necessárias para promover a efetiva implementação da UNFCCC ou qualquer outro instrumento jurídico, com esta finalidade, adotado pela Conferência das Partes.

² O Protocolo de Montreal controla a emissão dos gases que ameaçam a camada de ozônio CFC, HFC, entre outros.

A partir de então os primeiros países, membros do Anexo I da UNFCCC³, passaram a disponibilizar seus inventários de emissões. Hoje, todos os países que compõe a Conferência das Partes seguem as determinações da convenção e, portanto, devem elaborar seus inventários de emissões de gases de efeito estufa⁴.

Os inventários de emissões são uma ferramenta básica para se determinar as relações entre as atividades humanas e seus efeitos sobre o meio ambiente [PACZYNA & GRAEDEL, 1995]. Esta ferramenta é essencial para a investigação científica da poluição atmosférica e para se planejar e implementar políticas de controle. No artigo destes autores também são abordados os tipos de inventários de emissões e alguns dos modelos utilizados para esta finalidade. Um inventário de emissões de gases de efeito estufa deve determinar e quantificar todas as fontes e sumidouros destes gases originários de uma atividade humana.

GRAEDEL *et al.* [1993] analisaram uma série de inventários de emissões de gases de efeito estufa, que foram compilados por vários autores utilizando metodologias diversas. Os inventários apresentados referem-se às emissões globais, nacionais ou específicas, como por exemplo para o setor de transportes ou industrial de um país.

MARLAND & ROTTY [1984] e DE VRIES *et al.* [1994] sugerem algumas metodologias para a realização de inventários específicos de emissões decorrentes da queima de combustíveis fósseis ou biomassa não renovável. Ambos estimam as emissões globais de gases de efeito estufa a partir de dados energéticos de vários países, disponíveis nos anuários estatísticos da IEA (*International Energy Agency*).

³ O Anexo I da UNFCCC lista os países desenvolvidos ou com economia em transição que devem estipular medidas para mitigar emissões de gases de efeito estufa [Anexo I].

⁴ Para um detalhamento maior a respeito dos tratados e convenções internacionais sobre mudança climática, consulte a dissertação de mestrado “Redução das Emissões de CO₂ do Segmento Siderúrgico Nacional e do Estado de São Paulo através da Injeção de Combustível Auxiliar em Alto Forno: Estudo de Casos na ACESITA e COSIPA” de Carla Kazue Nakao Cavaliero [Cavaliero, 1998].

Em 1994 foi desenvolvido, pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change*, o primeiro esboço de uma metodologia para a inventariação de gases de efeito estufa que fosse amplamente utilizada por todos os países integrantes da UNFCCC. Tal metodologia foi aperfeiçoada em 1995 [HOUGHTON *et al.*, 1995] e passou a ser um padrão internacional para a inventariação de gases de efeito estufa. Hoje, a metodologia IPCC é empregada por todos os países participantes da UNFCCC.

Nos Estados Unidos a *Environmental Protection Agency* (U.S. EPA) é o órgão responsável por executar e publicar o inventário de emissões de gases de efeito estufa do país. O inventário referente ao período de 1990 a 1993 baseia-se fundamentalmente na metodologia IPCC e apresenta as emissões para todos os setores definidos na metodologia calculadas pelos métodos *top-down* e *bottom-up* [U.S. EPA, 1994].

Outros países como o Canadá e a Finlândia também têm publicado seus inventários de emissões. O Canadá, através da *Environment Canada*, publicou em 1997 o segundo relatório sobre mudança climática que inclui os inventários de emissões para os anos de 1990 a 1995 [ENVIRONMENT CANADA, 1997]. Os inventários usam principalmente a metodologia IPCC ou, em alguns casos, metodologias similares, cujas diferenças são devidamente explicadas e justificadas no relatório. O Canadá utilizou alguns modelos específicos para certos setores como agricultura, aterros sanitários e tratamento de esgotos

O relatório finlandês de emissões [MINISTRY OF THE ENVIRONMENT - FINLAND, 1997], publicado pelo Ministério do Meio Ambiente em 1997, foi compilado utilizando-se metodologias próprias para emissões provenientes do uso de energia. Foram utilizados o modelo LIISA para emissões do transporte rodoviário e o modelo ILMARI para emissões decorrentes da queima de combustíveis fósseis. Este último modelo apresenta algumas diferenças em relação à metodologia IPCC. Para as outras fontes de gases de efeito estufa o Ministério do Meio Ambiente da Finlândia adota o modelo IPCC como padrão.

Estes são apenas alguns dos inventários de emissões de gases de efeito estufa dos 36 países incluídos no Anexo I da UNFCCC em 1992 e referem-se exclusivamente às emissões nacionais. Nenhum destes inventários abordou a questão das emissões de efeito estufa em escala regional, isto é, considerando as emissões de gases de efeito estufa originadas de cidades ou conjuntos de cidades.

Inventários regionais de emissões estão sendo compilados por algumas cidades participantes da campanha internacional *Cities for Climate Protection* (CCP) patrocinada pelo *International Council for Local Environmental Initiatives* (ICLEI). Segundo o relatório parcial de 1997 [JESSUP, 1997] algumas cidades estão utilizando um modelo de contabilização de emissões desenvolvido pela companhia *Torrie Smith & Associates* do Canadá. Apesar deste modelo não ser descrito no relatório, alguns estudos de caso são apresentados para as cidades de Portland (EUA), Saarbrücken (Alemanha) e Toronto (Canadá), assim como seus respectivos inventários de emissões.

No Brasil, um dos primeiros trabalhos referentes à inventariação de emissões de gases de efeito estufa no setor de energia foi realizado como um seminário na COPPE em 1995 [ROSA & SANTOS, 1996]. Neste seminário foram discutidas as emissões de gases de efeito estufa e o setor energético no Brasil e em outros países latino-americanos. Destacam-se os artigos que dizem respeito à preparação do inventário de emissões brasileiro [MIGUEZ, 1996], que descreve em detalhes como seria preparado tal inventário segundo a metodologia IPCC, e aos motivos pelos quais este inventário deveria ser realizado pelo país, dados necessários e possíveis impactos econômicos para se mitigar as emissões [MOREIRA, 1996].

Em 1995 foi publicado na internet o primeiro e único inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa (http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/inventar.htm). Este inventário baseia-se totalmente na metodologia IPCC, foi coordenado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia e executado por diversos órgãos, como por exemplo, o Instituto Alberto Luiz

Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). O inventário de emissões de dióxido de carbono decorrente do uso de energia foi executado pela COPPE e refere-se aos anos de 1990 a 1994, não havendo dados para os últimos anos.

A Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo publicou, em 1997, o inventário estadual de emissões de gases de efeito estufa [SMA, 1996]. O modelo IPCC foi utilizado, sem muitas alterações, para a realização do inventário. Tal trabalho de inventariação pode ser realizado de modo relativamente simples, pois o Estado dispõe de um balanço e dados energéticos bastante detalhados.

Também a Secretaria de Estado de Energia de São Paulo publicou um inventário de emissões dentro do Balanço Energético do Estado [SEE, 1997]. Este inventário apresenta apenas os resultados finais das emissões por fontes e por setores

A inventariação de emissões em regiões cujas fronteiras geográficas não correspondem às fronteiras políticas é relativamente complexa, pois não estão disponíveis dados energéticos diretos a respeito. Neste caso se faz necessário coletar dados para a elaboração da matriz energética regional e estabelecer hipóteses para se determinar os fluxos energéticos e de emissões na região.

Em sua tese de doutorado, CANAVARROS [1998] propõe uma metodologia para se determinar o consumo regional de energéticos no Brasil. O autor mostra como é feita a correlação entre os setores de consumo considerados pelo extinto DNC (atual ANP) e os setores considerados nos balanços energéticos estaduais e nacional. Também são apresentadas considerações para a correção dos dados de consumo de energéticos para cada tipo de combustível em cada setor.

JANNUZZI & QUEIROZ [1996] realizaram um inventário de emissões para a RBPC, cujos dados energéticos foram estimados a partir da média de crescimento no período de 1989 a 1991, e baseados em estudos anteriores. Isto se deveu basicamente a dificuldades em se obter dados municipais detalhados de produção e consumo de energéticos.

A metodologia empregada por estes autores constituiu em se aplicar os fatores de emissão de CO₂ de cada tipo de combustível, fornecidos pelo IPCC, aos dados disponíveis do consumo energético. Não foram levadas em conta outras etapas da metodologia IPCC, necessárias ao processo de inventariação de emissões de CO₂. Portanto, este trabalho faz uma estimativa das emissões de CO₂ e não um inventário completo de emissões.

Neste contexto, este trabalho visa elaborar um inventário regional de emissões de CO₂, utilizando como base a metodologia de inventariação sugerida pelo IPCC, que é o padrão internacional para a elaboração de inventários, e realizando modificações estruturais nesta metodologia quando necessário. Tal análise serve de modelo para a elaboração de inventários de emissões de gases de efeito estufa em outras regiões e também pode auxiliar futuros projetos de gestão ambiental aplicados à RBPC.

3. O Efeito Estufa

Nas últimas décadas tem-se verificado dois fatos concretos: o primeiro consiste no aumento da temperatura média global da biosfera e o segundo no aumento crescente das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera. Entretanto ainda não foi comprovada, de forma definitiva, se existe uma correlação entre estes dois fatos. Estudos climáticos complexos ainda estão sendo desenvolvidos, ampliando-se o conhecimento sobre este assunto.

Atualmente, o efeito estufa global, e mais especificamente suas alterações antropogênicas, é o fenômeno que tem sido analisado mais cuidadosamente devido a possibilidade dele ser o grande responsável por tais mudanças climáticas. Neste ponto serão definidos o efeito estufa e suas causas antropogênicas, entre outros possíveis fenômenos capazes de alterar o clima global.

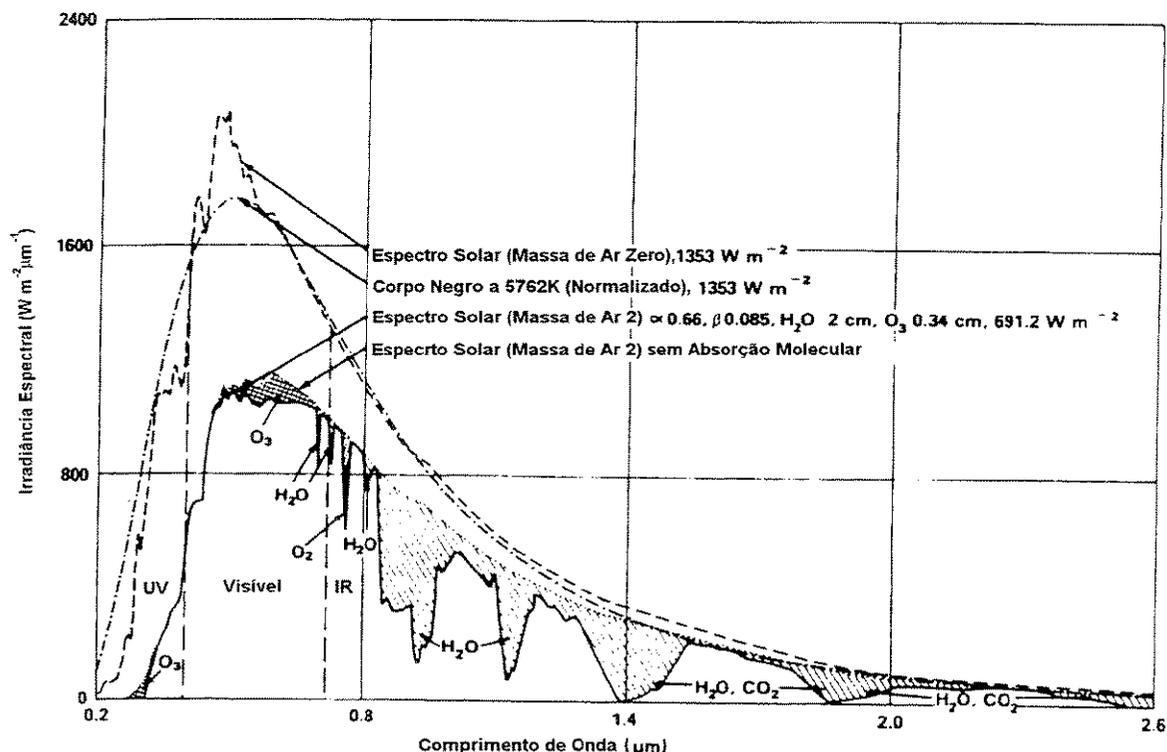
3.1. Definição

Os fenômenos climáticos são regidos basicamente pelos fluxos de entrada e de saída de energia na Terra. A atmosfera exerce um papel crucial no balanço destes fluxos de energia, servindo como agente regulador e estabilizador da temperatura no planeta. Estima-se que, se não houvesse atmosfera, a temperatura média seria cerca de 30°C inferior às temperaturas médias atuais, com grandes variações entre as temperaturas diurna e noturna, como acontece na Lua [GOLDEMBERG, 1995].

Portanto a atmosfera atua como uma estufa, evitando que parte da energia recebida do Sol se perca de imediato para o espaço. Este fenômeno é conhecido como efeito estufa global, ou

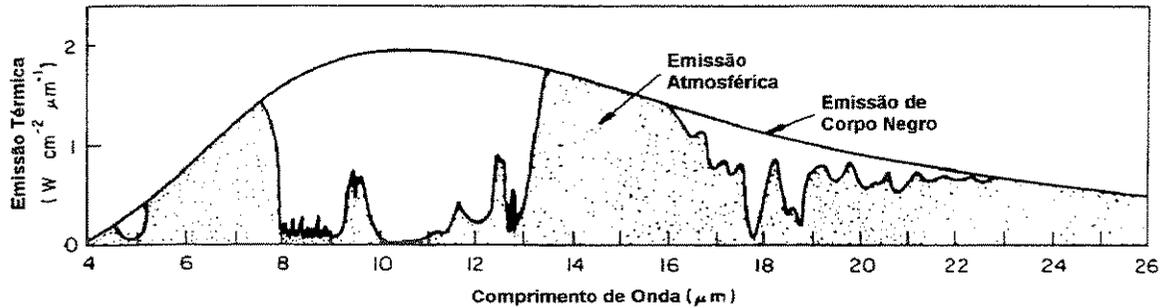
simplesmente efeito estufa, e sua existência é conhecida desde o século passado, sendo proposto primeiramente por Arrhenius. Entretanto seus mecanismos de funcionamento são bastante complexos.

A atmosfera é quase totalmente transparente à radiação solar, cuja faixa de comprimentos de onda está concentrada entre 0,2 e 3,2 μm , refletindo e absorvendo apenas uma parte da radiação visível e ultravioleta (Figura 3.1). Portanto, a superfície do planeta recebe e absorve grande parte da radiação solar, sendo assim aquecida. Em seguida parte desta energia é reemitida na forma de radiação infravermelha (Figura 3.2), cujos comprimentos de onda situam-se acima de 0,8 μm , como está definido na Figura 3.1. Um detalhamento maior deste balanço energético é apresentado mais adiante.



FONTE: FAHRENBACH & BUBE, 1983

Figura 3.1- Comparação entre o espectro solar na superfície terrestre e no espaço, mostrando a absorção de radiação na atmosfera.

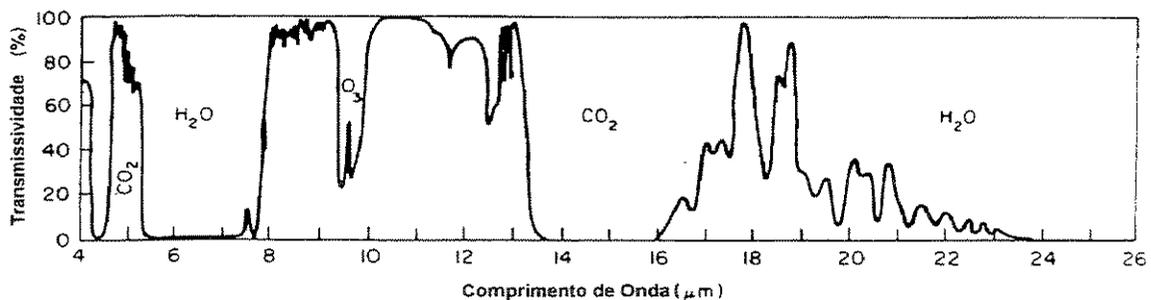


FONTE: COULSON, 1975

Figura 3.2- Espectro de radiação da superfície terrestre.

Por sua vez, alguns gases presentes na atmosfera, cuja origem é natural ou antropogênica, possuem linhas de absorção que se concentram principalmente na mesma faixa de emissão do espectro radiativo terrestre, isto é, no infravermelho. Tais gases são: vapor de água, CO_2 , CH_4 , CO , O_3 , N_2O e NO_x . A capacidade destes gases em absorver radiação infravermelha na atmosfera é conhecida como força radiativa.

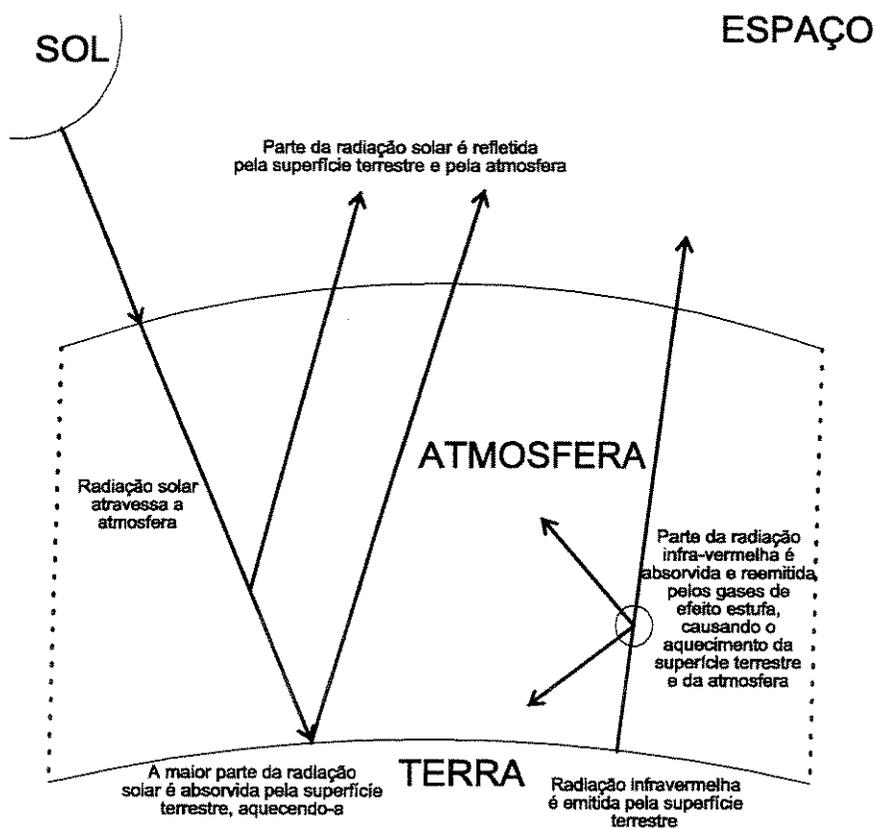
A transmissividade da atmosfera aos diferentes comprimentos de onda emitidos pela superfície terrestre depende da concentração dos gases de efeito estufa. Na Figura 3.3 é apresentado o índice de transmissividade da atmosfera, correlacionando-se cada faixa de absorção aos diferentes gases de efeito estufa.



FONTE: COULSON, 1975

Figura 3.3- Transmissividade da atmosfera, mostrando as faixas de absorção de alguns gases de efeito estufa.

Portanto, parte da energia emitida pela superfície do planeta é absorvida pelos gases de efeito estufa, que reemite esta radiação infravermelha em todas as direções. Uma fração desta radiação é emitida para o espaço e outra é emitida para a superfície terrestre, sendo novamente absorvida, e assim o ciclo se repete. Desta forma uma parte da energia recebida do Sol fica retida na atmosfera. Este é o fenômeno que permite a estabilização e regulação da temperatura. Na Figura 3.4 é apresentado um esquema do efeito estufa global.

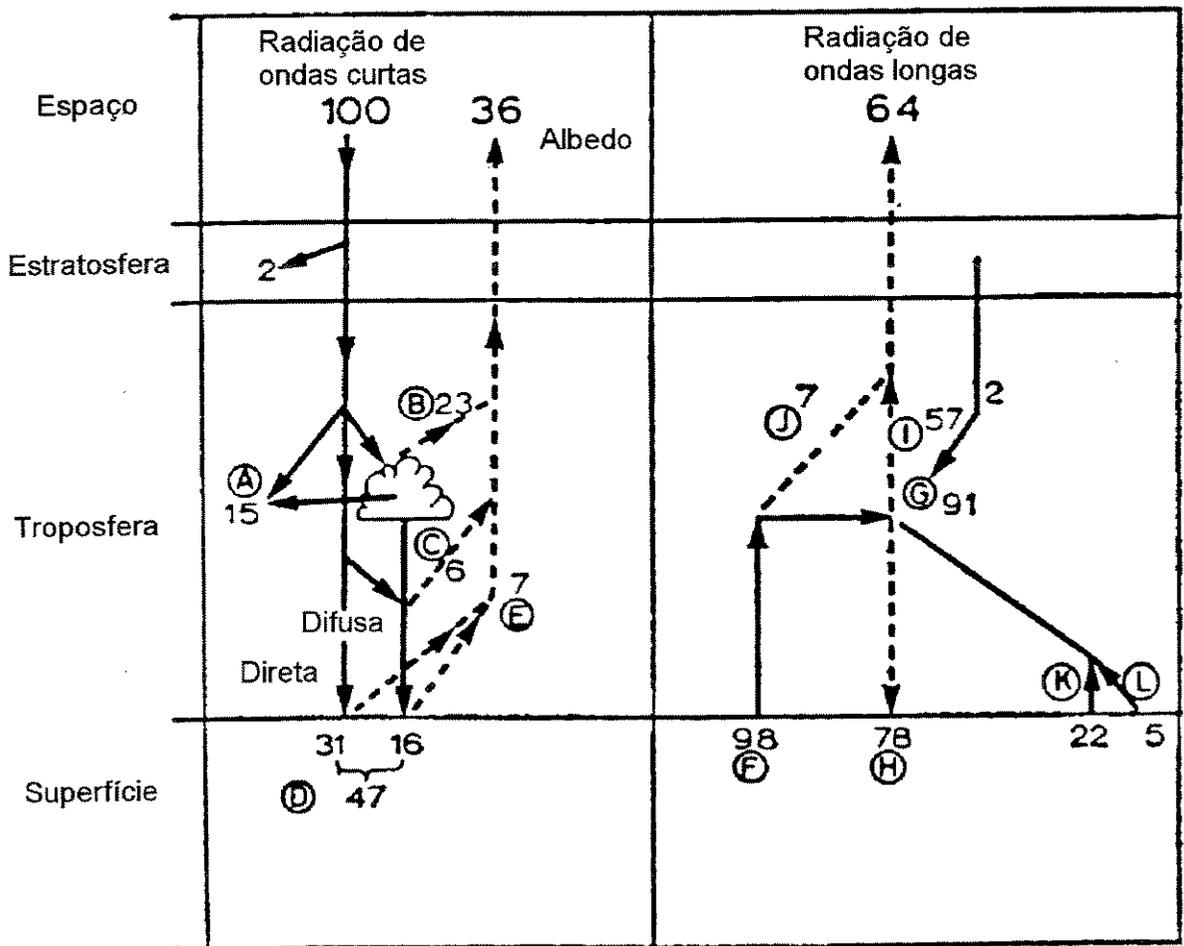


FONTE: Compilação de informações [HOUGHTONet al., 1992].

Figura 3.4- Esquema do efeito estufa global.

Na Figura 3.5 é apresentado o balanço energético na atmosfera, com os fluxos de energia representados por linhas e letras maiúsculas [BARRY & CHORLEY, 1968]. Neste esquema os efeitos de latitude, altitude e nebulosidade não são considerados, pois são responsáveis por

variações regionais nos fluxos de energia. De toda a radiação emitida pelo Sol (valor considerado de 100 unidades de energia), 2% são absorvidos pela estratosfera, principalmente pelo ozônio. Outros 15% são absorvidos na troposfera pelo O₃ e pelas nuvens (linha A no esquema da Figura 3.5). As nuvens também são responsáveis pela reflexão de 23% da radiação solar, a superfície terrestre reflete 7% e as partículas de poeira e gotículas de água refletem 6% (respectivamente, linhas B, E, C). Cerca de 47% da radiação solar atinge a superfície, diretamente (31%) ou por difusão e espalhamento (16%), aquecendo-a (linha D).



FONTE: BARRY & CHORLEY, 1968.

Figura 3.5- O balanço energético na atmosfera terrestre e seus fluxos de energia.

A radiação emitida pela Terra (98 unidades de energia, linha F na Figura 3.5) é composta por comprimentos de onda longo (infravermelho). Do total emitido, cerca de 7% são perdidos através de "janelas de radiação", que são faixas de comprimentos de onda para os quais não há absorção (linha J), restando 91 unidades de energia. A troposfera também recebe calor latente devido à condensação de vapor de água (22%, linha K), calor sensível devido à transferência turbulenta (5%, linha L) e radiação infravermelho da estratosfera (2%, linha G). A reemissão de energia pela troposfera para a superfície corresponde a cerca de 78 unidades de energia (linha H) e para o espaço corresponde a 57 unidades (linha I). Portanto, da energia total irradiada pelo Sol (100 unidades), cerca de 36% são reemitidas pela Terra na forma de radiação ultravioleta ou visível e outros 64% como radiação infravermelho.

Neste complexo fluxo de energia, o aquecimento da superfície terrestre e da atmosfera são os responsáveis por grande parte da caracterização climática do planeta. Fatores como umidade do ar e dos solos, pluviosidade, evaporação, cobertura de neve e gelo, pressão barométrica, nebulosidade, nível dos oceanos e temperatura são basicamente influenciados por este mecanismo. Portanto, alterações na composição da atmosfera levam a uma modificação no regime dos fluxos de energia no planeta, e, conseqüentemente, devem levar a uma alteração do clima global:

3.2. Relações entre o Efeito Estufa e o Uso de Energia

A partir da Revolução Industrial as atividades humanas passaram a se basear no consumo crescente de energia, principalmente de combustíveis fósseis, como carvão e petróleo. A combustão destes energéticos gera gases de efeito estufa, por exemplo, CO₂, CH₄, CO, N₂O, NO_x, entre outros, cuja participação na composição da atmosfera estava estabilizada ou era insignificante (CFCs) antes da Revolução Industrial.

Dados referentes ao aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera estão amplamente divulgados por vários autores. Segundo o IPCC [HOUGHTON *et al.*, 1992] as concentrações de CO₂ cresceram cerca de 30% no último século e as de CH₄ aumentaram em 115%. Na Tabela 3.1 são apresentados estes dados.

Tabela 3.1- Concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera antes e após a Revolução Industrial

Gás de efeito estufa	Concentração atmosférica (ppbv)		Aumento percentual (%)
	Pré-industrial	Atual	
CO ₂	280.000	353.000	26
CH ₄	800	1720	115
N ₂ O	288	310	8
CFC-11	0	0,28	-----
CFC-12	0	0,48	-----

FONTE: HOUGHTON *et al.*, 1992.

O aquecimento global verificado durante o último século tem sido relacionado por muitos cientistas ao aumento da concentração dos gases estufa na atmosfera. Estes gases antropogênicos podem estar levando o planeta a um agravamento do efeito estufa, isto é, a um aumento da força radiativa da atmosfera. Este fenômeno é conhecido como efeito estufa antropogênico.

RAVAL & RAMANATHAN [1989] concluem, através de medidas experimentais a partir de observações realizadas por satélite, que o efeito estufa devido às emissões de gases estufa antropogênicos, podem elevar a força radiativa da atmosfera em 0,5Wm⁻² por década. Isto pode implicar num aumento de temperatura de 2 a 4°C nos próximos 50 anos.

Os gases de efeito estufa possuem diferentes capacidades de absorver e reemitir radiação, e seus tempos médios de vida na atmosfera podem variar de poucos dias a séculos. Portanto, a estimativa do aquecimento global, resultante do aumento da concentração atmosférica de cada

gás, deve ser baseada num cálculo ponderado sobre o poder radiativo e o tempo de vida destes gases na atmosfera.

LASHOF & AHUJA [1990] e RODHE [1990] definem um índice chamado de potencial de aquecimento global (*global warming potential* - GWP). Este índice reflete a capacidade de aquecimento global relativa ao CO₂ de 1 quilograma de um determinado gás de efeito estufa, devida ao aumento da concentração deste gás na atmosfera num determinado período de tempo.

Na Tabela 3.2 são apresentados os potenciais de aquecimento global dos principais gases de efeito estufa num período de 100 anos, segundo os autores acima e os índices adotados pelo IPCC [HOUGHTON *et al.*, 1995]. Tomando-se como exemplo o CH₄ no período de um século, seu poder de aquecimento global estimado é 11 vezes superior ao do CO₂, considerando-se as atuais concentrações destes gases na atmosfera. Entretanto, devido à alta concentração do CO₂ na atmosfera sua força radiativa é superior a do CH₄, como será visto adiante.

Tabela 3.2- Potencial de aquecimento global dos gases de efeito estufa

Gás de efeito estufa	Potencial de aquecimento global		
	LASHOF & AHUJA	RODHE	IPCC
CO ₂	1	1	1
CO	2.2	---	---
CH ₄	10	15*	11
N ₂ O	180	300	270
O ₃	---	3	---
CFC-11	1300	4000	3400
CFC-12	3700	8000	7100
HCFC-22	410	---	1600

FONTE: Compilação própria.

* Considerando-se apenas os efeitos diretos deste gás.

O aumento das emissões de gases de efeito estufa pode estar levando a um desequilíbrio nos fluxos de radiação na atmosfera terrestre. Neste cenário o CO₂ se destaca dentre os gases de

efeito estufa devido à sua grande concentração na atmosfera (353 ppmv). Este fato, mesmo quando combinado ao seu baixo potencial de aquecimento global, implica que o CO₂ é o maior responsável pelo aumento da força radiativa da atmosfera. Portanto, o dióxido de carbono é o principal agente causador do efeito estufa antropogênico. Na Tabela 3.3 é apresentada a contribuição de cada gás de efeito estufa para o aumento da força radiativa da atmosfera.

Tabela 3.3- Contribuição relativa dos gases de efeito estufa para o aumento da força radiativa da atmosfera

Gás de efeito estufa	Aumento da força radiativa (%)	
	[a]	[b]
CO ₂	60	71,5
CO	---	6,6
CH ₄	15	9,2
N ₂ O	5	3,1
O ₃	8	---
CFC-11	4	---
CFC-12	8	---
CFCs*	---	9,5

FONTE: coluna a- RODHE, 1990; coluna b- LASHOF & AHUJA, 1990.
*Incluindo-se aqui os CFCs 11, 12, 14 e 113.

A maior fonte antropogênica de CO₂ é a queima de combustíveis fósseis [HOUGHTON *et al.*, 1992; U.S. EPA, 1994], contribuindo com 70 a 90% das emissões totais deste gás. Portanto o enfoque deste trabalho será a inventariação das emissões de CO₂ devido ao uso energético de combustíveis fósseis na RBPC.

Para contabilizar as emissões de dióxido de carbono será utilizada a metodologia do IPCC [HOUGHTON *et al.*, 1995] com algumas modificações. Esta metodologia, como já mencionado anteriormente, tem sido considerada um padrão mundial para se estimar as emissões de CO₂ de cada nação e é descrita no capítulo seguinte.

3.3. Outras Causas de Mudança

Além do efeito estufa antropogênico, existem vários outros fenômenos que podem ser responsáveis pelas atuais mudanças climáticas, incluindo-se o aumento da temperatura global. Neste tópico são brevemente citadas apenas alguns dos processos mais importantes que podem ser as causas deste aumento de temperatura global, pois aprofundar esta discussão não é o objetivo deste trabalho.

A primeira hipótese para o atual aumento da temperatura global refere-se aos ciclos climáticos naturais. Dados climáticos, como temperatura, umidade, entre outros, tomados ao longo do tempo em diferentes regiões do planeta, indicam que podem haver ciclos de aumento e redução da temperatura terrestre. Estes ciclos naturais da temperatura global ainda não são muito conhecidos, havendo muita controvérsia sobre seus períodos de duração, sobre o número de ciclos existentes e suas causas. [WIGLEY & RAPER, 1990; GHIL & VAUTARD, 1991; SCHLESINGER & RAMANKUTTY, 1992; KELLY & WIGLEY, 1992; STOUFFER *et al.*, 1994; SCHLESINGER & RAMANKUTTY, 1994].

Dentro deste comportamento do clima do planeta, o momento atual estaria localizado na parte ascendente destes ciclos de temperatura. Isto poderia explicar os atuais aumentos da temperatura e levar a crer que podem ser verificados aumentos ainda maiores nos próximos anos. Também existe uma correlação entre os ciclos de temperatura e os ciclos solares apontados por alguns dos autores citados acima.

Uma crítica aos estudos dos ciclos naturais provém do fato de que as bases de dados de temperatura não representam uma fração temporal significativa, isto é, não existem dados de temperaturas globais anteriores a um ou dois séculos. Para que se possa identificar padrões de comportamento da temperatura global bem definidos as bases de dados devem compreender períodos de tempo muito superiores a alguns séculos. Portanto são necessárias estimativas para

se abranger períodos maiores de tempo, e tais estimativas são apenas aproximações, muitas vezes pobres, da realidade.

Deve-se destacar ainda que os ciclos de temperatura por si só não são suficientes para explicar a amplitude de aumento da temperatura global nas últimas décadas. Muitos defensores desta idéia afirmam que além destes ciclos deve haver uma contribuição devido ao efeito estufa causado por fontes antropogênicas. Portanto, as duas hipóteses para se justificar o aumento da temperatura global, o efeito estufa e os ciclos naturais, são de certa forma complementares.

Existem também outros fenômenos, naturais e antropogênicos, que contribuem para a mudança climática, mas atuando como redutores da temperatura global e/ou local. Exemplos destes casos são a emissão antropogênica de aerossóis e o vulcanismo [HANSEN *et al.*, 1997, BRIFFA *et al.*, 1998, MCCORMICK *et al.*, 1995]. Entretanto, como já foi fixado anteriormente, não é objetivo deste trabalho aprofundar análises sobre o aquecimento global, mas apenas ressaltar a importância dos gases de efeito estufa neste fenômeno, o que justifica as atuais preocupações mundiais e também os objetivos desta dissertação.

4. O Método de Contabilização de Gases de Efeito Estufa do IPCC

Em 1988 o Grupo Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) foi criado em conjunto com a Organização Meteorológica Mundial (WMO) e o Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP). Seu objetivo principal é avaliar as informações científicas, técnicas e socio-econômicas da mudança climática. Por sua vez, o IPCC está dividido em três subgrupos de trabalho que cobrem, respectivamente, as seguintes áreas: o sistema climático (*Working Group 1 - WG1*); os impactos e opções de resposta à mudança climática (*Working Group 2 - WG2*); e as dimensões econômicas e sociais do problema (*Working Group 3 - WG3*).

Como já foi mencionado, durante a realização da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC) em 1992 em Nova York [ONU, 1992a] e, em seguida, com a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) no Rio de Janeiro [ONU, 1992b], foi estabelecido que as nações participantes deveriam desenvolver métodos para contabilizar suas emissões antropogênicas de gases de efeito estufa. Os inventários deveriam ser desenvolvidos, atualizados periodicamente e publicados.

Visando auxiliar as nações em atingir estes objetivos e tornar os inventários nacionais comparáveis, o IPCC/WG1 em colaboração com a Agência Internacional de Energia (IEA) e com a Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômicos (OECD) estabeleceram um programa para elaboração de inventários de gases de efeito estufa [HOUGHTON *et al.*, 1995]. Os objetivos básicos deste programa são:

- desenvolver e refinar uma metodologia para calcular e reportar as emissões nacionais, que seja internacionalmente reconhecida;
- encorajar o uso desta metodologia por todas as nações participantes da UNFCCC;
- estabelecer uma base de dados internacional para coletar, revisar e reportar as informações referentes a cada nação.

A segunda versão da metodologia do IPCC, *The IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [HOUGHTON *et al.*, 1995], ou simplesmente metodologia IPCC (*IPCC Guidelines*), foi lançada em 1995 e é um aprimoramento da versão preliminar de 1994. Recentemente foi publicada a segunda versão desta metodologia conhecida como *The Revised 1996 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [OECD, 1997]. A metodologia IPCC tem sido utilizada internacionalmente e tende a se tornar a ferramenta básica para a contabilização de gases de efeito estufa em todos os países participantes da UNFCCC. Portanto a metodologia IPCC⁵ será utilizada neste trabalho.

4.1. Descrição Básica

A publicação da metodologia IPCC é composta de três volumes: *The Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions*, *The Greenhouse Gas Inventory Workbook* e *The Greenhouse Gas Inventory Reference Manual*. O primeiro volume fornece instruções passo a passo sobre como compilar, documentar e transmitir dados para a realização de inventários nacionais, visando garantir sua comparabilidade e consistência. O segundo volume contém sugestões sobre como planejar e iniciar a montagem do inventário, fornecendo instruções sobre como calcular emissões de CO₂, CH₄ e outros gases, a partir de 6 principais categorias de fontes ou setores. O terceiro

⁵ A metodologia utilizada neste trabalho, *The IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* [HOUGHTON *et al.*, 1995], é uma versão anterior à nova versão de 1996 [OECD, 1997]. A versão mais recente do método IPCC só tornou-se disponível em meados de setembro de 1998 e, portanto, não houve tempo para utilizá-la.

volume fornece uma série de informações sobre métodos de estimativa de emissões de vários gases de efeito estufa e sobre suas diversas fontes, consistindo numa base de referências e informações gerais sobre todo o processo de contabilização da metodologia.

O modelo padrão do IPCC consiste basicamente de um método *top-down* de contabilização de gases de efeito estufa baseado nas quantidades de energia primária produzida no país e de energia, primária e secundária, importada e exportada pelo país. São computadas também as variações de estoque dos combustíveis e o consumo de energéticos devido ao transporte internacional (*bunkers* internacionais).

O IPCC define seis diferentes categorias de fontes e sorvedouros de gases de efeito estufa, baseadas em setores de atividade econômica: Energia, Processos Industriais, Solventes e Outros Produtos, Mudanças do Uso da Terra e Manejo Florestal, Agricultura e Resíduos. Neste trabalho o enfoque principal dirige-se às emissões de CO₂ devidas ao uso de energia e, portanto, os outros setores definidos pelo IPCC não serão abordados. Esta restrição deve-se a dois fatos: o setor energético é o maior responsável pelas emissões antropogênicas de gases de efeito estufa, principalmente CO₂ que é, por sua vez, o principal gás de efeito estufa antropogênico, com grandes taxas de emissão, como foi observado no Capítulo 3.

As emissões de CO₂ a partir do setor de energia são estimadas para todas as fontes de combustão, utilizando-se um balanço do carbono agregado para contabilizar todo o carbono para todas as categorias de energia. Estas emissões são quantificadas através do produto da quantidade de energia fornecida à economia por um fator de emissão, que indica a quantidade de carbono estocada em uma unidade de energia de um dado combustível.

Outro ponto fundamental considerado pelo IPCC é que a estimativa das taxas de emissão de CO₂ pode ser determinada com razoável precisão quando se trata de combustão. Tais taxas dependem principalmente da quantidade de carbono estocado no combustível e, portanto, o CO₂

originário de atividades energéticas pode ser estimado a partir de dados da oferta de energia com alguns ajustes, por exemplo a porcentagem de carbono não oxidada.

Outros ajustes dependem de características específicas de cada país ou sistema energético considerado. Por exemplo, a qualidade dos combustíveis varia regionalmente e, portanto, o conteúdo de carbono também varia, implicando em diferentes fatores de emissão para um mesmo combustível.

Para se calcular as emissões de outros gases de efeito estufa é necessário levar em conta diversos fatores interdependentes, por exemplo, tecnologia de combustão, condições da combustão e tecnologia de controle. Portanto o tipo de abordagem para se contabilizar as emissões de outros gases de efeito estufa deve ser diferente da utilizada para o CO₂ e é invariavelmente mais complexa. Esta abordagem pode, entretanto, ser utilizada também para se calcular as emissões de CO₂ em um nível mais detalhado.

4.2. A Metodologia IPCC de Contabilização de Emissões de Gases de Efeito Estufa decorrentes do Uso de Energia

A metodologia IPCC apresenta dois métodos distintos para se contabilizar as emissões de CO₂ que serão analisados a seguir. Mas antes é necessário apresentar e esclarecer alguns pontos básicos.

4.2.1. Considerações e Recomendações

Visando esclarecer fatores de complicação que podem ser encontrados durante a aplicação da metodologia e que precisam ser tratados cuidadosamente, o IPCC considera e recomenda que:

1. parte do carbono contido nos combustíveis não é emitido como CO₂, mas sim como CO, CH₄ e COVNM's, que se oxidam na atmosfera em CO₂ num período de tempo que varia de alguns dias a 10-11 anos. O IPCC leva em conta todas estas emissões, podendo haver uma dupla contabilização de emissões em alguns casos;
2. o uso de uma única unidade energia para facilitar a comparabilidade entre resultados internacionais. Adota-se, portanto, o terajoule (TJ);
3. deve-se ter em mente que existem variações, por vezes muito significativas como no caso do carvão mineral, no conteúdo de carbono nos combustíveis. Esta variação por unidade de energia útil varia nos diversos tipos e qualidades de combustíveis;
4. a oxidação incompleta do carbono pode ocorrer devido à ineficiência dos processos de combustão, gerando fuligem ou cinza (carbono não queimado ou parcialmente oxidado);
5. nem todo o combustível fornecido à economia é queimado para a geração de energia, parte é utilizada como matéria-prima para manufatura de outros produtos. Em alguns casos este carbono é rapidamente oxidado, mas em outros o carbono pode ficar estocado (ou seqüestrado) em produtos por períodos de tempo bastante grandes (séculos). Portanto o carbono estocado deve ser deduzido do cálculo das emissões;
6. as emissões originadas do consumo de combustíveis utilizados no transporte (marinho e aéreo) internacional, conhecidos como *bunkers* internacionais, não devem ser incluídas no total nacional, devendo constar em separado no inventário nacional;
7. as emissões decorrentes do uso energético de biomassa não deve ser incluída nas emissões nacionais de CO₂ do setor de energia. Se a biomassa tem sido replantada na mesma razão em que tem sido consumida o fluxo de CO₂ para a atmosfera é nulo. Entretanto se alguma variação levar a uma diminuição na quantidade de carbono englobada pela biomassa, o CO₂ emitido pode ser e será contabilizado no setor de Mudança no Uso do Solo e Florestas.

4.2.2. Métodos Sugeridos pelo IPCC para Contabilizar as Emissões de CO₂

O conceito teórico básico necessário para se estimar as emissões de CO₂ são diretos e necessitam das seguintes etapas:

1. estimar o consumo de combustíveis por tipo de combustível;
2. converter todos os dados para uma única unidade de energia (TJ);
3. selecionar o fator de emissão de carbono para cada tipo de combustível e estimar o conteúdo de carbono presente nestes combustíveis;
4. estimar a quantidade de carbono seqüestrada em produtos em longos períodos de tempo;
5. contabilizar a quantidade de carbono não oxidada durante a combustão;
6. converter as emissões de carbono para CO₂.

Existem duas abordagens para a contabilização das emissões de CO₂ consideradas pelo IPCC, que diferem pelo grau de detalhamento necessário. São elas:

- **Abordagem *Top-Down*:** é a abordagem de referência adotada pelo IPCC e necessita de informações sobre diferentes produtos energéticos. Neste método é necessário saber apenas a quantidade de combustível produzida no país e os fluxos de combustível devidos à exportação, importação e mudanças no estoque. É possível obter uma estimativa precisa das emissões nacionais de CO₂ através do carbono contido nos energéticos fornecidos a economia. Isto se deve ao fato de que as emissões de CO₂ dependem principalmente das características básicas do combustível e dependem muito pouco da tecnologia ou dos controles de emissão.
- **Abordagem *Bottom-Up*:** fornece uma estimativa mais detalhada das emissões de CO₂ em cada categoria relacionada pelo IPCC. Este tipo de informação é essencial para se avaliar políticas de redução de emissões de GEEs e para se determinar emissões de outros GEEs que não o CO₂. Os cálculos básicos podem ser aplicados em um nível bastante detalhado de tecnologia e de uso final de energia, por setor e por tipo de combustível. Este método necessita de informações extremamente detalhadas, sendo portanto complexo quando comparado ao método anterior aplicado a países. A determinação da quantidade de cada tipo de combustível consumido em cada atividade de uso final é uma tarefa bastante árdua e de difícil obtenção, que muitas nações ainda não puderam realizar.

A seguir será descrita a abordagem *top-down*, pois esta serve de referência para o modelo *bottom-up*. Neste trabalho será empregada uma metodologia semelhante a abordagem *bottom-up*, pois os dados necessários para a aplicação da abordagem *top-down* não são disponíveis para a região considerada. Este assunto será discutido detalhadamente no próximo capítulo.

4.3. A Abordagem Top-Down

A abordagem *top-down* é a abordagem metodológica padrão utilizada pelo IPCC para a contabilização das emissões de CO₂. A hipótese fundamental deste método baseia-se no fato de que uma vez que o carbono é entregue à economia na forma de combustíveis, ele é seqüestrado por algum processo ou então é liberado para a atmosfera.

Portanto, para se estimar as emissões de CO₂ é necessário contabilizar apenas a oferta total de combustíveis primários e as quantidades líquidas de combustíveis secundários para a economia. Deve-se levar em conta também alguns fatores de ajuste, como por exemplo a fração de carbono oxidada e a quantidade de carbono seqüestrado.

Esta abordagem segue o conceito teórico para se estimar as emissões de CO₂ apresentados na seção 4.2.2. Nas próximas seções serão apresentados cada um dos tópicos mais detalhadamente.

4.3.1. Estimando o Consumo de Combustíveis por Tipo de Combustível

O primeiro passo na aplicação da metodologia IPCC é estimar o consumo aparente de combustíveis, isto é, fazer o balanço dos combustíveis fornecidos ao país. Para isto é necessário determinar a quantidade de combustíveis primários produzida, a quantidade de combustíveis primários e secundários importada, exportada e utilizada para o transporte (aéreo e naval)

internacional (*bunkers* internacionais), e as variações de estoque. Portanto, o consumo aparente de combustíveis primários é definido como:

$$\text{Consumo Aparente} = \text{Produção} + \text{Importação} - \text{Exportação} - \text{Bunkers} - \text{Variação de Estoques} \quad (1)$$

Para o consumo aparente de combustíveis secundários deve-se excluir o termo “produção”, porque o carbono contido nos combustíveis secundários já está contabilizado nas emissões decorrente do uso de combustíveis primários. Isto se deve ao fato de que a produção de combustíveis secundários deriva dos combustíveis primários explorados nos países.

4.3.2. Conversão dos Dados Energéticos para uma Única Unidade de Energia

Como já mencionado, o IPCC sugere que todos os dados sejam transformadas para uma única unidade de energia, terajoules (TJ). Assim evitam-se complicações que podem surgir com a utilização das unidades de energia usuais dos dados de consumo de cada tipo de combustível.

Quando os dados energéticos estiverem baseados em unidades de massa o IPCC sugere que se utilize o poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis utilizados localmente para a conversão em TJ. No caso de estarem disponíveis apenas dados energéticos em termos do poder calorífico superior (PCS) dos combustíveis, o IPCC recomenda que se faça a conversão das quantidades de energia consumida utilizando-se novamente o PCI destes combustíveis. Não havendo maiores informações a respeito deve-se aplicar um fator de correção. A IEA assume que o PCI para o óleo cru e o carvão é 5% menor que o PCS e para o gás natural o PCI é 10% inferior ao PCS.

4.3.3. O Fator de Emissão e o Conteúdo de Carbono dos Combustíveis

O conteúdo de carbono é definido pelo IPCC como a quantidade potencial de carbono a ser liberada pelo consumo de uma dada quantidade de combustível. Isto é:

$$\text{Conteúdo Total de Carbono (GgC)} = \text{Consumo Aparente (TJ)} \times \text{Fator de Emissão de Carbono (tC/TJ)} \times 10^{-3} \quad (2)$$

O consumo aparente é aquele definido na seção 4.3.1 e o fator de emissão é definido como a quantidade de carbono emitida (em toneladas de carbono) por unidade de energia (TJ) do combustível.

Os fatores de emissão utilizados pelo IPCC são baseados no trabalho de GRUBB [1989], acrescido de informações baseadas em outros autores [MARLAND & ROTTY, 1984; MARLAND & PIPPIN, 1990; OECD, 1991] e levando-se em conta o PCI dos energéticos. Entretanto o próprio IPCC reconhece que o fator de emissão pode variar muito entre os tipos e qualidades de combustíveis, principalmente para os combustíveis primários. Os fatores de emissão de carbono e de CO₂ sugeridos pelo IPCC para os combustíveis primários e secundários são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1- Fatores de emissão de CO₂ para combustíveis primários e secundários

Combustível	Fator de emissão de C (tC/TJ)	Fator de emissão de CO₂ (tCO₂/TJ)
Óleo cru	20,0	73,3
Gás natural	15,3	56,1
Gasolina	18,9	69,3
Querosene de aviação	19,5	71,5
Querosene (outros)	19,6	71,9
Óleo diesel	20,2	74,1
GLP	17,2	63,1
Etano	16,8	61,6
Nafta	20,0	73,3
Betume	22,0	80,7
Lubrificantes	20,0	73,3
Coque de petróleo	27,5	100,8
Biomassa sólida	29,9	109,6
Biomassa líquida	20,0	73,3
Biomassa gasosa	30,6	112,2

FONTE: HOUGHTON *et al.*, 1995.

4.3.4. Carbono Seqüestrado em Produtos

No próximo passo da metodologia IPCC, a quantidade de carbono seqüestrada em produtos não energéticos originados de combustíveis deve ser estimada. Deve-se, então, estimar a fração deste carbono passível de ser oxidada em um longo período de tempo (maior que 20 anos, segundo o IPCC) e subtraí-la do conteúdo total de carbono definido na seção anterior. Isto leva a seguinte equação:

$$\text{Carbono Seqüestrado (GgC)} = \text{Uso Não Energético (10}^3\text{t)} \times \text{Fator de Conversão (TJ/10}^3\text{t)} \times \text{Fator de Emissão (tC/TJ)} \times \text{Fração de Carbono Seqüestrada} \times 10^{-3} \quad (3)$$

O “uso não energético” é a quantidade em massa dos combustíveis utilizados como matéria prima para a manufatura de produtos não energéticos (em toneladas). Este tipo de consumo ou uso deve ser cuidadosamente analisado, pois a quantidade de carbono seqüestrado

resultante será deduzida do conteúdo total de carbono. Na Tabela 4.2 são apresentadas as frações de carbono estocado para vários produtos.

Tabela 4.2- Fração de carbono seqüestrado em produtos não energéticos derivados de combustíveis

Produto/Combustível	Fração de carbono seqüestrado
Lubrificantes	0,50
Betume	1,00
Óleos e alcatrão*	0,75
Nafta	0,75
Óleo diesel	0,50
Gás natural	0,33
GLP	0,80

FONTE: HOUGHTON *et al.*, 1995.

* Óleos e alcatrão derivados de carvão mineral.

Portanto o “conteúdo líquido de carbono” nos combustíveis entregues à economia do país será:

$$\text{Conteúdo Líquido de Carbono (GgC)} = \text{Conteúdo Total de Carbono (GgC)} - \text{Carbono Seqüestrado (GgC)} \quad (4)$$

4.3.5. Carbono não Oxidado Durante os Processos de Combustão

Uma pequena parte do carbono contido nos energéticos não se oxida imediatamente em CO₂ durante o processo de combustão sendo emitido em diversas formas (CO, fuligem, hidrocarbonetos). Grande parte destas emissões secundárias se oxidam em CO₂ imediatamente após a combustão e, segundo o IPCC, o restante não oxidado é seqüestrado indefinidamente.

Baseado nos estudos de MARLAND & ROTTY [1984], o IPCC recomenda que a fração de 1% dos combustíveis fósseis não são oxidados durante os processos de combustão. Esta porcentagem é uma média baseada nos seguintes pontos:

- menos que 1,0% do carbono no gás natural não é oxidada, ficando na forma de fuligem;
- 1,5% ± 1,0% do carbono contido em derivados de petróleo permanece não oxidado;
- para o carvão mineral 1,0% ± 1,0% do carbono permanece não oxidado, principalmente sob a forma de cinzas.

Novamente o IPCC reconhece que, para alguns países e entre tipos de combustível, este parâmetro pode ser bastante variável. Observa-se que a fração não oxidada de carbono depende de fatores como o tipo de combustível utilizado, a tecnologia empregada, a idade do equipamento e as práticas de operação e manutenção destes equipamentos. Na Tabela 4.3 são apresentadas as frações de carbono oxidado utilizadas e recomendadas pelo IPCC.

Tabela 4.3- Fração de carbono oxidada para diversos combustíveis

Combustível	Fração de carbono oxidada
Carvão mineral	0,98
Petróleo e derivados	0,99
Gás natural	0,995

FONTE: HOUGHTON *et al.*, 1995.

Assim, tem-se que a quantidade de carbono passível de ser oxidada (“emissão líquida de carbono”) durante a combustão será dada por:

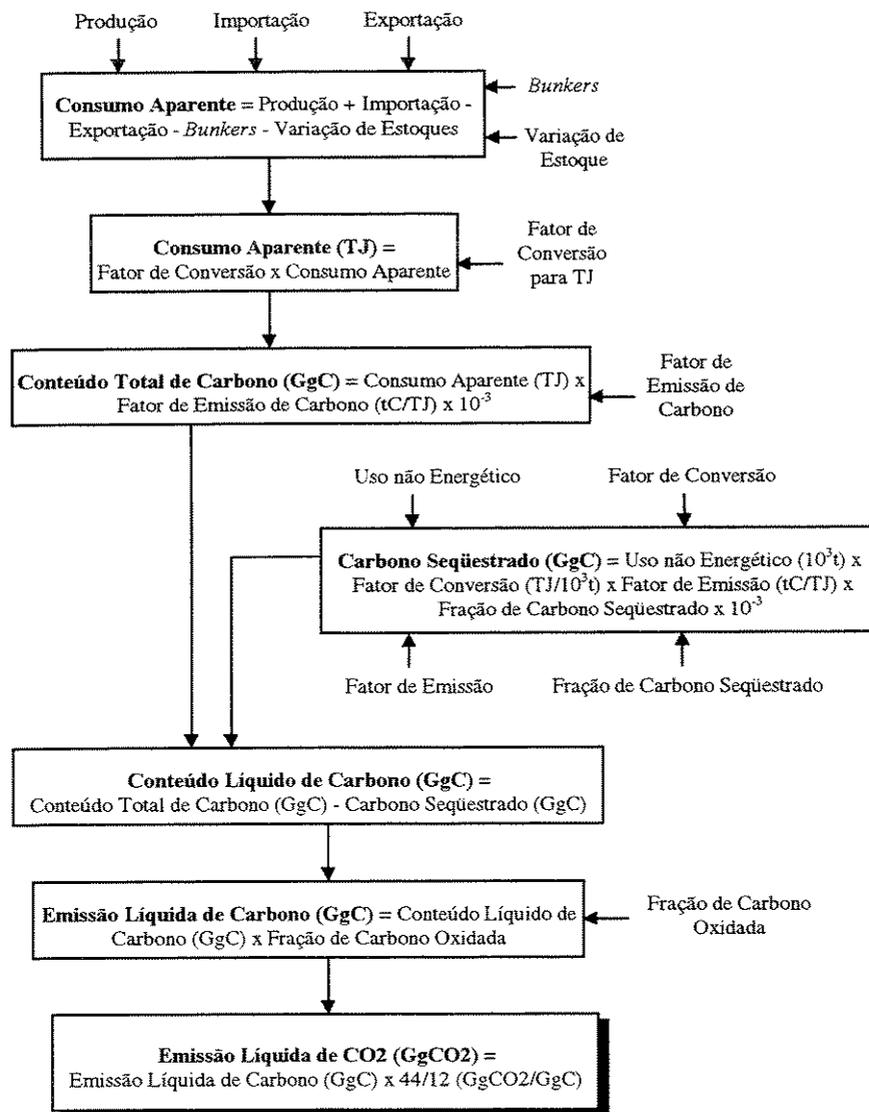
$$\text{Emissão Líquida de Carbono (GgC)} = \text{Conteúdo Líquido de Carbono (GgC)} \times \text{Fração de Carbono Oxidada} \quad (5)$$

4.3.6. As Emissões Totais Líquidas de CO₂ do Setor de Energia

Finalmente as emissões totais líquidas de CO₂ serão obtidas multiplicando-se o resultado da seção anterior pela razão entre pesos molecular do CO₂ e atômico do carbono (44/12). Isto é:

$$\text{Emissão Líquida de CO}_2 \text{ (GgCO}_2\text{)} = \text{Emissão Líquida de Carbono (GgC)} \times \frac{44}{12} \quad (6)$$
$$\text{(GgCO}_2\text{/GgC)}$$

A soma das emissões de cada tipo de combustível leva ao resultado final de todas as emissões antropogênicas líquidas de CO₂ devidas ao setor de energia definido pelo IPCC. O esquema abaixo (Figura 4.1) representa a seqüência final para o cálculo das emissões de CO₂.



FONTE: Adaptação a partir da metodologia IPCC.

Figura 4.1- Diagrama para a determinação das emissões de CO₂ pela metodologia IPCC

4.4. A Abordagem Bottom-Up

A abordagem *bottom-up* difere da apresentada anteriormente basicamente pelo fato de poder considerar as emissões referentes a cada setor da economia e/ou para cada tipo de combustível independentemente. Tal abordagem também é recomendada quando não se possui

dados agregados para o consumo aparente dos combustíveis primários em um país, apesar deste ser um caso bastante raro.

Algumas diferenças, principalmente conceituais, podem ser verificadas quando se comparam as duas abordagens do modelo IPCC. Estas diferenças são apresentadas a seguir.

A determinação do consumo de combustível segue o mesmo tipo de equação apresentada no tópico Estimando o Consumo de Combustíveis por Tipo de Combustível, porém o valor obtido refere-se a um consumo real de combustível ao invés de um consumo aparente. Os fatores de emissão de CO₂ sugeridos pelo IPCC são os mesmos para as duas abordagens e podem ser corrigidos para cada setor ou tipo de tecnologia apenas quando houver esta possibilidade.

O procedimento para se determinar as quantidades de carbono estocado em produtos também não se altera. O único cuidado que deve ser tomado refere-se ao ajuste das quantidades de carbono seqüestrado que devem ser obrigatoriamente debitadas do setor econômico considerado pelo IPCC. Neste caso os ajustes necessários podem ser encontrados na categoria de Emissões Industriais do modelo IPCC.

Quanto ao carbono não oxidado durante o processo de combustão, o IPCC recomenda que sejam utilizados os índices propostos no tópico 1.3.5, isto é, 2% de carbono não oxidado para o carvão, 1% para derivados de petróleo e 0,5% para o gás natural. O IPCC reconhece que ainda existe a necessidade de se elaborar maiores estudos neste ponto. Assim, também podem ser utilizados dados específicos para cada tipo de tecnologia e/ou combustível em países que possuam tais dados. Neste caso os índices utilizados devem ser devidamente documentados durante a elaboração do inventário.

Finalmente deve ser feita a conversão das quantidades de carbono liberado para dióxido de carbono, através da razão entre a massa molecular do CO₂ e a massa atômica do carbono

(44/12). Deve-se ressaltar que a soma geral das emissões contabilizadas pelos métodos *top-down* e *bottom-up* devem ser iguais ou diferir por valores pouco significativos.

5. Aplicação do modelo IPCC para inventários regionais de CO₂

Neste capítulo são sugeridas as alterações gerais necessárias para se compilar inventários regionais de emissões de CO₂, utilizando-se o modelo IPCC. Entretanto deve-se ressaltar que são necessárias uma série de alterações específicas para cada região. Tais alterações dependem de características particulares da região considerada e, em alguns casos, têm influência mais significativa sobre os resultados finais do que as alterações gerais efetuadas no modelo IPCC.

5.1. O consumo de combustíveis

Em regiões dentro de um país, a maneira de se determinar o consumo aparente ou real de combustíveis deve ser modificada de modo a se ajustar aos dados energéticos disponíveis e às características específicas. Aqui serão apresentados métodos para se determinar o consumo de combustíveis em uma região, cujas fronteiras não coincidem com divisões geopolíticas institucionais, para as quais normalmente se dispõe de dados energéticos consolidados.

O consumo aparente de combustíveis definido pelo modelo IPCC (Equação 1) aplica-se de forma distinta aos combustíveis primários e secundários em um país. Como foi apresentado no capítulo anterior, os combustíveis secundários produzidos derivam dos primários e, portanto, quando se contabiliza as emissões decorrentes da produção dos últimos, contabiliza-se automaticamente as emissões de seus derivados produzidos no país.

Na Equação 1 são considerados 5 termos distintos: “produção”, “importação”, “exportação”, “*bunkers*” e “variação de estoque”. Inicialmente serão analisados os dois últimos termos desta equação.

Em escala regional, os *bunkers* podem ser abordados da maneira original proposta pelo modelo IPCC. Isto significa que os combustíveis utilizados no setor de transporte aéreo e marítimo devem ser contabilizados na planilha de consumo energético da região na qual aviões, navios e similares foram abastecidos. Um inventário exclusivo para as emissões originárias dos *bunkers* deve ser anexado ao inventário final de emissões da região. Desta forma pode-se estimar a participação relativa dos *bunkers* nas emissões totais referentes à região de estudo.

Em regiões pequenas, o consumo de combustíveis referentes aos *bunkers* deve se refletir apenas em alguns tipos de combustíveis. Isto se verifica por exemplo em regiões que possuem grandes aeroportos internacionais ou em áreas portuárias importantes, casos em que se espera um elevado consumo de querosene de aviação e óleos diesel e combustível no setor de transportes.

A variação de estoque dos combustíveis deve ser considerada com cuidado, pois depende bastante da região em questão. No Brasil, quando são considerados os Estados ou conjunto de Estados, e nestes estiver disponível o balanço energético estadual, dados referentes a variação de estoque dos combustíveis são facilmente acessíveis. Quando se trata de outras regiões não institucionais, além de possivelmente não haver dados diretos a respeito, o termo variação de estoque deixa de fazer sentido prático e não pode ser empregado. Isto decorre do fato dos estoques considerados serem simplesmente a quantidade de combustível presente nos estoques dos revendedores, e que são muito variáveis.

Os termos “produção”, “importação” e “exportação” da Equação 1 devem ser empregados de forma tal, que se possa levar em conta a totalidade das emissões de CO₂ geradas pelo uso da energia numa região. Em regiões como as definidas inicialmente neste tópico e que

são produtoras de petróleo ou que possuem refinarias, por exemplo, estes termos podem ser redefinidos para se alcançar aquele objetivo.

Exemplificando melhor o caso acima, considere um região não produtora de petróleo, mas que possui uma grande refinaria e que atenda toda a sua demanda de combustíveis, exportando o restante dos combustíveis refinados. A aplicação direta do modelo IPCC nesta região faria os termos “exportação” e “produção” nulos, e apenas o termo “importação” de combustíveis primários seria utilizado, caso este dado estivesse disponível. Para os combustíveis secundários o único termo utilizado seria “exportação”. O primeiro dado, “importação”, pode ser obtido na refinaria, pois é a quantidade de petróleo recebido pela mesma. Entretanto, o segundo dado, “exportação”, refere-se à quantidade de combustíveis secundários vendidos pela refinaria especificamente para consumo em outras regiões e, portanto, determinar o total consumido na região não estaria facilmente disponível.

O trânsito livre de veículos (meios de transporte em geral) pela região em estudo e por suas fronteiras também passa a ser um ponto significativo quando se trata de emissões. Se por um lado um automóvel abastecido fora da região e trafegando pela mesma implica na não contabilização de suas emissões para a região, um outro veículo pode ter sido abastecido na região e consumido seu combustível em outra. Para este tipo de fonte é muito difícil se precisar as emissões de CO₂. A solução mais simples para o problema, e adotada neste trabalho, é considerar que os fluxos de entrada e de saída de veículos na região são iguais e que, portanto, a diferença entre estas duas situações é nula, quando se considera as emissões de CO₂.

A hipótese acima não é válida em alguns casos específicos, isto é, em regiões que servem de entreposto comercial ou rotas de transporte. CANAVARROS [1998] apresenta um estudo no qual pode ser verificada esta situação. Entretanto, na região abordada nesta dissertação a hipótese considerada é uma boa aproximação de primeira ordem e será aplicada.

5.2. O Fator de Emissão e o Conteúdo de Carbono dos Combustíveis

O fator de emissão de carbono definido pelo IPCC é a quantidade de carbono emitida por unidade de energia do combustível. Como a qualidade dos combustíveis pode variar bastante, é interessante determinar os fatores de emissão e os poderes caloríficos dos combustíveis utilizados na região de estudo. Entretanto os métodos para se determinar o fator de emissão de carbono de CO₂ dos combustíveis não fazem parte do escopo deste trabalho.

Uma sugestão apresentada é considerar a composição química dos combustíveis e determinar o fator de emissão estequiométrico de dióxido de carbono. Desta forma, considerando-se um processo de combustão completa, pode-se estimar a massa de CO₂ emitido por unidade de massa de combustível.

5.3. Carbono Seqüestrado em Produtos e Carbono não Oxidado

No caso de não haver estudos e dados referentes às quantidades de carbono estocadas em produtos não energéticos derivados de combustíveis fósseis e da fração de carbono não oxidado durante a combustão, o IPCC recomenda que sejam utilizados os dados fornecidos em sua metodologia. Estes dados estão disponíveis no capítulo anterior e serão empregados neste trabalho.

Um problema de difícil resolução em regiões como as consideradas aqui, é a determinação das quantidades de carbono seqüestrado a partir de combustíveis utilizados para fins não energéticos. Tais dados podem ser estimados quando se trabalha em nível nacional, porém estudos de campo devem ser feitos para se avaliar a maneira como os combustíveis são empregados nos diversos setores econômicos de uma região.

Caso não existam estudos como este para a região em questão, deve-se considerar que não há carbono seqüestrado. Desta forma as emissões de CO₂ serão superestimadas. A título de exemplo, o inventário de emissões realizado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente de São Paulo [SMA, 1996] mostra que a quantidade de carbono seqüestrado equivale a cerca de 12% do total de carbono emitido no estado. No país este valor é de aproximadamente 10%.

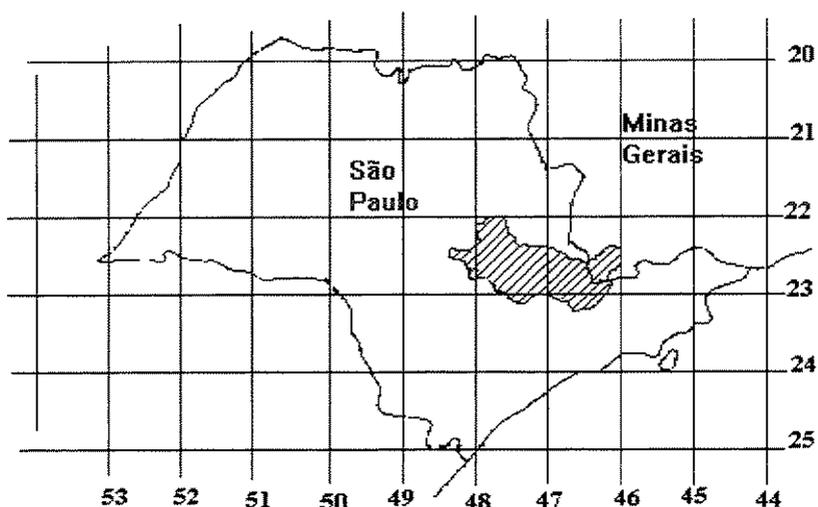
6. Aplicação da Metodologia IPCC à Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari

Como já foi apresentado anteriormente, a metodologia IPCC foi desenvolvida para quantificação de emissões de gases de efeito estufa em âmbito nacional. Portanto, tal modelo se aplica a regiões cujos limites geopolíticos são muito bem definidos e, que possuem dados precisos e consolidados para se determinar o consumo aparente ou real de combustíveis como definido nos capítulos anteriores.

O que se pretende neste capítulo é aplicar a metodologia IPCC, acrescida das modificações e considerações efetuadas no capítulo anterior, à Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari. Para isto é necessário, inicialmente, definir as características gerais e energéticas da RBPC. Ao final apresenta-se o inventário das emissões de CO₂ na região.

6.1. Características Gerais da RBPC

A Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari é composta por 56 municípios [Anexo II], sendo 52 pertencentes a Região Administrativa de Campinas e 4 municípios do sul de Minas Gerais. A localização geográfica e a composição da região são apresentadas nas Figura 6.1 e Figura 6.2. Sua população estimada é de 3.334.892 habitantes [SEADE, 1998], distribuída por uma área de 14.312 km², perfazendo uma densidade populacional média de 233,01 habitantes/km², que entretanto apresenta uma grande dispersão [PROCEL, 1997; NEPAM, 1997].



Fonte: PROCEL, 1997.

Figura 6.1- Localização geográfica da RBPC no Estado de São Paulo.

Esta região foi escolhida por ter sido alvo de uma série de estudos anteriores [PROCEL, 1997; NEPAM, 1997] e por ter sido agregada pelos governos municipais que formam o comitê de proteção das bacias dos rios Piracicaba e Capivari. Este comitê tem a responsabilidade de estabelecer a política de utilização e gerenciamento dos recursos hídricos, visando o desenvolvimento sustentável na região destas bacias hidrográficas, e a sua preservação ambiental.

Economicamente a RBPC é considerada uma região altamente desenvolvida, o que pode ser verificado através do Valor de Transformação Industrial (VTI) [NEPAM, 1997]. Este índice mostra que a região é o terceiro maior polo industrial do país, atrás apenas da Região Metropolitana de São Paulo e do Estado do Rio de Janeiro. Em 1990 apenas o VTI dos municípios da bacia do Piracicaba correspondia à 6,7% do VTI nacional, enquanto que a indústria do Rio de Janeiro participou com 9,3%, a de Minas Gerais com 8,9%, a do Rio Grande do Sul com 7,1%, a do Paraná e a de Santa Catarina com 4,2% cada.

Outro índice representativo é o valor adicionado regional. Compilando-se os dados fornecidos pelo SEADE [1998] obtém-se um valor adicionado na região de aproximadamente 20 bilhões de reais, que perfaz uma participação de 12,3% no Estado de São Paulo.

6.2. Características Energéticas da RBPC

O levantamento dos dados energéticos utilizados nesta dissertação baseou-se principalmente no relatório intitulado Qualidade Ambiental e Desenvolvimento Regional nas Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, que foi produzido pelo Núcleo de Estudos e Pesquisas Ambientais da UNICAMP [NEPAM, 1997]. Devido ao fato da RBPC não ser uma região com fronteiras geopolíticas institucionais, os dados energéticos obtidos para a mesma não são diretos, a exceção do consumo de eletricidade que pode ser obtido diretamente nas concessionárias de cada município.

Uma característica marcante da RBPC é que esta apresenta um elevado grau de industrialização, o que leva a um grande consumo de todos os energéticos. Entretanto, apenas o álcool e o bagaço de cana são produzidos em larga escala na região. O petróleo é importado de outras regiões, refinado na REPLAN⁶ e, em seguida, seus derivados são exportados ou distribuídos e consumidos nesta região. A eletricidade é quase totalmente importada de outras regiões. A produção regional é inferior a 10% do consumo e baseia-se principalmente na geração hidráulica. Na Tabela 6.1 apresentam-se os dados de consumo energético na RBPC.

⁶ A REPLAN, ou Refinaria do Planalto na cidade de Paulínia, é a maior refinaria de petróleo do país e é a responsável pelo abastecimento de combustíveis na região.

Tabela 6.1- Consumo de energéticos na RBPC para o ano de 1995

Energético	Consumo ^(#)	Consumo (TJ)
Óleo Diesel	864.736.883 (l)	31.344
Gasolina Automotiva	552.090.072 (l) ^(&)	17.995
Gasolina Aviação	1.412.837 (l)	46
GLP	225.087.591 (kg)	10.384
Óleo Combustível	736.088.176 (l)	29.373
Querosene Aviação	160.002.384 (l)	5.477
Querosene Geral	7.756.524 (l)	266
Eletricidade	8.818.701 (MWh) ^(\$)	31.732
Álcool Anidro	115.717.712 (l)	2.451
Álcool Hidratado	351.344.042 (l)	7.076
Bagaço	4.269.904.000 (kg)	31.747
TOTAL	----	167.891

Fonte: Compilação própria.

(#) NEPAM, 1997

(&) Excluindo-se o álcool anidro

(\$) SEADE, 1998

Estes dados seguem a orientação da metodologia IPCC para contabilização de CO₂, que utiliza dados energéticos baseados no poder calorífico inferior dos combustíveis. Assim, o consumo energético em TJ foi obtido a partir dos dados do NEPAM expressos em suas unidades originais e do poder calorífico inferior de cada energético [Anexo III].

Dados referentes ao consumo de combustíveis nos anos de 1996 e 1997 foram pesquisados junto à Secretaria de Estado de Energia de São Paulo. Entretanto esta base de dados mostrou-se bastante incompleta, não fazendo referência à combustíveis como o GLP, o querosene e a gasolina de aviação. Várias cidades pertencentes à região não estavam presentes nesta base, que deveria incluir todas as cidades do estado. Tais dados também apresentavam grandes divergências quando comparados com o Balanço Energético Estadual publicado pela própria Secretaria de Energia. Portanto, os dados de consumo de combustíveis na região não pôde ser atualizada e foram utilizados os dados referentes a 1995.

Inicialmente os dados obtidos a partir do NEPAM [1997] foram avaliados e corrigidos de acordo com as orientações expressas pela metodologia IPCC [HOUGHTON *et al.*, 1995]. Outras correções foram necessárias, como por exemplo, considerar a mistura de 22% de álcool anidro em volume à gasolina automotiva, distinguir os consumos de álcool anidro e hidratado, e recuperar os dados de consumo de eletricidade a partir do anuário estatístico do SEDAE [1998], que divide o consumo por setores e recebe os dados diretamente das concessionárias.

Esta base de dados também foi analisada por setores da economia de maneira mais criteriosa, levando-se em consideração as tabelas de alocação das vendas setoriais das distribuidoras de derivados de petróleo aos setores consumidores do Balanço Energético Nacional [CANAVARROS, 1998]. Desta forma, a divisão de consumo de combustíveis por setor se ajusta melhor às classificações do Balanço Energético Nacional, possibilitando comparar dados energéticos regionais com dados nacionais e estaduais, e as emissões de CO₂ em cada setor.

Tendo as considerações acima em mente, os dados apresentados aqui representam uma melhoria substancial na qualidade dos dados apresentados inicialmente no relatório do NEPAM [1997]. Isto permite uma melhor avaliação do consumo energético na região e, conseqüentemente, das emissões de CO₂.

Os dados da Tabela 6.1 indicam que a região consumiu cerca de 167.891 TJ, dos quais 94.885 TJ são de origem fóssil e 73.006 TJ são de origem renovável. Dos energéticos renováveis, apenas a eletricidade não é totalmente produzida na região e sua origem é quase toda hidráulica.

Como não existem dados a respeito da produção e do consumo de lenha e carvão vegetal nesta região ou nas regiões administrativas do Estado de São Paulo, estes energéticos não são tratados nesta dissertação. Entretanto, sabe-se que grande parte destes energéticos são importados de outras áreas do Estado ou do país, e que a lenha explorada regionalmente tem origem clandestina, isto é, provém de matas nativas que não poderiam ser exploradas legalmente.

A RBPC também não se caracteriza como consumidora de carvão mineral, que é normalmente utilizado em larga escala em setores energo-intensivos, como indústrias siderúrgicas e de cimento.

O consumo de energia elétrica na região no ano de 1995 foi de 31.732 TJ. Entretanto devido a sua origem hidráulica (renovável), como apresentado anteriormente, este energético não será considerado para fins de cálculo das emissões de CO₂, apresentadas no tópico seguinte. Verifica-se que a expressiva participação da energia elétrica na região é de 18,9%, sendo que os setores industrial e residencial são os maiores consumidores com 63,8% e 23,2% respectivamente.

O óleo diesel é consumido principalmente no setor de transportes e em parte no setor rural, respectivamente 74,7% e 22,2%. Sua participação na matriz energética da região também é bastante significativa (18,6%).

A gasolina automotiva é totalmente consumida no setor de transportes. Os dados originais indicam um consumo de 707.807.784 l, que correspondem à mistura de álcool anidro à gasolina na proporção de 22% em volume. Corrigindo-se este dado chega-se a um consumo de 552.090.072 l ou 17.995 TJ, correspondente a 10,7% do consumo total de energéticos.

A gasolina de aviação não é misturada com álcool anidro e é consumida apenas no setor de transporte aéreo. Sua participação regional é pouco significativa (0,03%).

O querosene de aviação também é exclusivamente utilizado no setor de transporte aéreo, porém sua participação no consumo é muito mais significativa (3,3%), fato decorrente da localização de um importante aeroporto internacional na região (Viracopos).

O querosene de iluminação e uso geral apresenta um peso de apenas 0,16% na matriz energética regional e seu consumo está distribuído principalmente entre os setores residencial (42,6%) e industrial (38,1%).

Um energético que possui importante participação no consumo regional, cerca de 17,5%, é o óleo combustível. Este fato se deve principalmente ao grande desenvolvimento industrial da RBPC, setor que apresenta 93,4% do consumo total.

Quanto ao gás liquefeito do petróleo (GLP) seu consumo dividiu-se entre os setores residencial, industrial e comercial nas seguintes proporções: 53,9%, 32,6% e 10,5%, respectivamente. O total consumido na região corresponde a 6,2% da energia total utilizada em 1995.

Quanto aos combustíveis renováveis derivados da cana-de-açúcar, deve-se lembrar que a RBPC é exportadora de álcool e que o volume de álcool exportado atingiu o correspondente a 4.342 TJ. Um tratamento mais aprofundado dos potenciais energéticos e das emissões deste setor é apresentado no Capítulo 7.

No gráfico a seguir (Figura 6.3) apresenta-se a distribuição de consumo entre os vários energéticos utilizados na RBPC no ano de 1995.

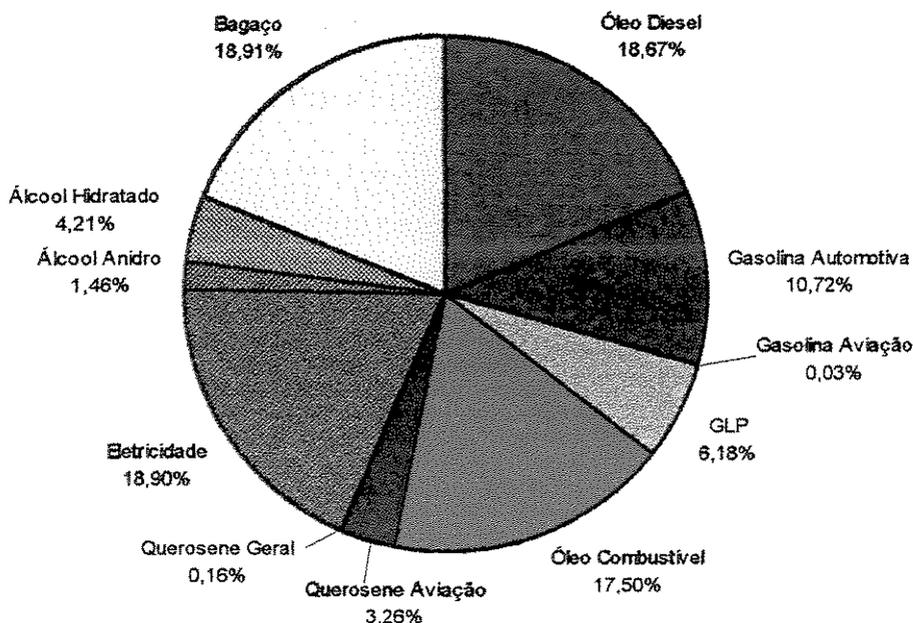


Figura 6.3- Distribuição do consumo regional de energéticos em 1995

Os dados de consumo de combustíveis obtidos junto ao NEPAM [1997] são referentes à venda de combustíveis em cada setor da economia regional, cuja classificação setorial segue as normas do extinto DNC. Tal classificação de setores não corresponde à classificação utilizada no Balanço Energético Nacional. Neste trabalho, os dados foram analisados por setores segundo as tabelas de alocação das vendas setoriais das distribuidoras de derivados de petróleo aos setores consumidores do Balanço Energético Nacional [CANAVARROS, 1998]. Nas tabelas de alocação, cada setor apresentado pelo Balanço Energético Nacional recebe um percentual específico do consumo de combustíveis nos setores apresentados pelo DNC.

Nesta dissertação, os setores apresentados pelo Balanço Energético Nacional foram apresentados simplificadaamente em seis grandes grupos: Residencial, Comercial, Industrial, Transportes, Rural e Demais. Na Tabela 6.2 apresenta-se o consumo de combustíveis fósseis por setor em 1995, seguindo-se a classificação acima.

Tabela 6.2- Consumo de combustíveis fósseis por setor em 1995

Setor	Residencial	Comercial	Industrial	Transportes	Rural	Demais
Combustível	(TJ)	(TJ)	(TJ)	(TJ)	(TJ)	(TJ)
Óleo Diesel	0	9	887	23.406	6.969	72
Gasolina Automotiva	0	0	0	17.995	0	0
Gasolina Aviação	0	0	0	46	0	0
GLP	5.593	1.102	3.387	0	0	302
Óleo Combustível	0	166	27.446	0	259	1.503
Querosene Aviação	0	0	0	5.477	0	0
Querosene Geral	113	10	101	0	1	40
TOTAL	5.706	1.287	31.821	46.924	7.229	1.917

6.3. Contabilização das Emissões de CO₂ devido ao Uso de Energia na RBPC

Através dos dados energéticos apresentados no tópico anterior e seguindo-se as orientações dos Capítulos 4 e 5, que descrevem respectivamente a metodologia IPCC e as alterações propostas para a mesma, obtém-se o inventário apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3- Inventário de emissões de CO₂ devido ao uso de energia na RBPC em 1995

Combustível	Consumo Aparente (unid.)	Fator de Conversão (TJ/unid.)	Consumo Aparente (TJ)	Fator Emissão C (tC/TJ)
Óleo Diesel	864.736.883 l	3,625E-05	31.344	20,2
Gasolina Automotiva	552.090.072 l	3,259E-05	17.995	18,9
Gasolina Aviação	1.412.837 l	3,259E-05	46	18,9
GLP	225.087.591 kg	4,613E-05	10.384	17,2
Óleo Combustível	736.088.176 l	3,990E-05	29.373	21,1
Querosene Aviação	160.002.384 l	3,423E-05	5.477	19,5
Querosene Geral	7.756.524 l	3,423E-05	266	19,6
Alcool Anidro	115.717.712 l	2,118E-05	2.451	20,0
Alcool Hidratado	351.344.042 l	2,014E-05	7.076	20,0
Bagaçõ	4.269.904.000 kg	7,435E-06	31.747	29,9

Combustível	Conteúdo Total C (GgC)	Carbono Seqüestrado (GgC)	Conteúdo Líquido C (GgC)	Fração Oxidada
Óleo Diesel	633	0	633	0,99
Gasolina Automotiva	340	0	340	0,99
Gasolina Aviação	1	0	1	0,99
GLP	179	0	179	0,99
Óleo Combustível	620	0	620	0,99
Querosene Aviação	107	0	107	0,99
Querosene Geral	5	0	5	0,99
Alcool Anidro	49	0	49	0,99
Alcool Hidratado	142	0	142	0,99
Bagaçõ	949	0	949	0,87

Combustível	Emissão Líquida C (GgC)	Emissão Líquida CO ₂ (GgCO ₂)	Total (GgCO ₂)	Per Capita (tCO ₂)
Óleo Diesel	627	2.298		
Gasolina Automotiva	337	1.235		
Gasolina Aviação	1	3		
GLP	177	648		
Óleo Combustível	614	2.250		
Querosene Aviação	106	388		
Querosene Geral	5	19		
Total Fósseis	1.867	6.841		
Alcool Anidro	49	178		
Alcool Hidratado	140	514		
Bagaçõ	826	3.028		
Total Biomassa	1.015	3.720		
Total Geral	2.882	10.561	6.841	2,07

As emissões de CO₂ na RBPC em 1995 totalizaram um total geral de 10.560 GgCO₂, dos quais 6.841 GgCO₂ têm origem fóssil e são efetivamente emitidos para a atmosfera. O valor decorrente do uso da biomassa não deve ser considerado como emissão, pois o dióxido de carbono emitido já havia sido absorvido durante a safra. A proporção característica está ilustrada na Figura 6.4. Assim a análise das emissões é realizada apenas para os combustíveis fósseis.

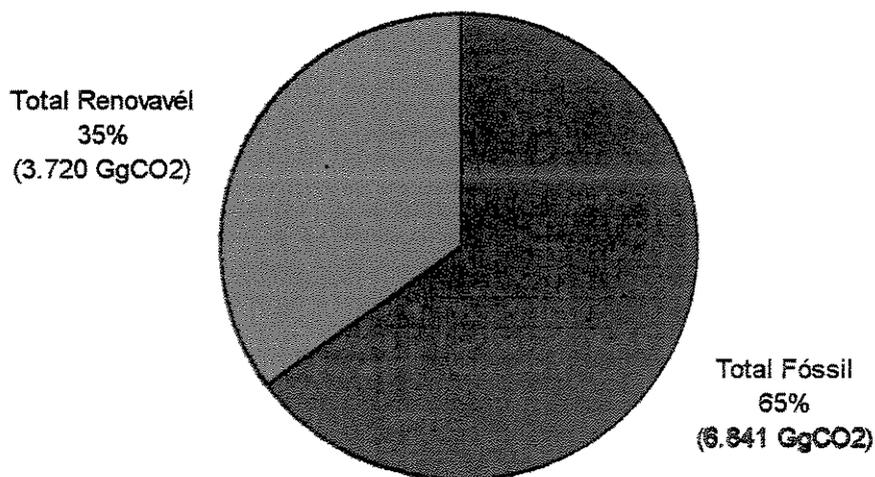


Figura 6.4- Emissões de CO₂ originadas de combustíveis fósseis e renováveis na RBPC

Deve-se observar também que as emissões originadas de fontes renováveis apresentadas neste gráfico referem-se apenas ao uso energético de bagaço de cana, álcool anidro e hidratado na região. A eletricidade gerada através de energia hidráulica é importada de outras regiões e seu consumo não emite gases de efeito estufa.

Comparando-se o consumo de combustíveis fósseis na região e suas respectivas emissões de CO₂ (Figura 6.5 e Figura 6.6), observa-se que, proporcionalmente, o óleo combustível apresenta uma taxa de emissão superior a do óleo diesel que foi o energético mais consumido em 1995. Isto se deve aos fatores de emissão de carbono de cada combustível. Nota-se também que o GLP pode ser considerado um combustível mais “limpo”, pois seu fator de emissão é relativamente pequeno.

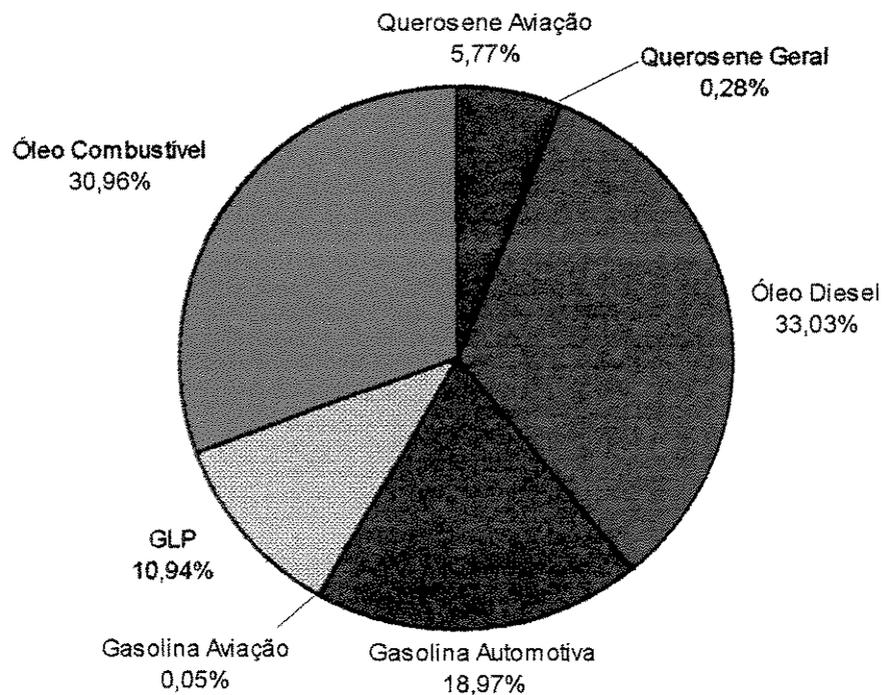


Figura 6.5- Distribuição do consumo de combustíveis fósseis (94.885 TJ) na RBPC em 1995

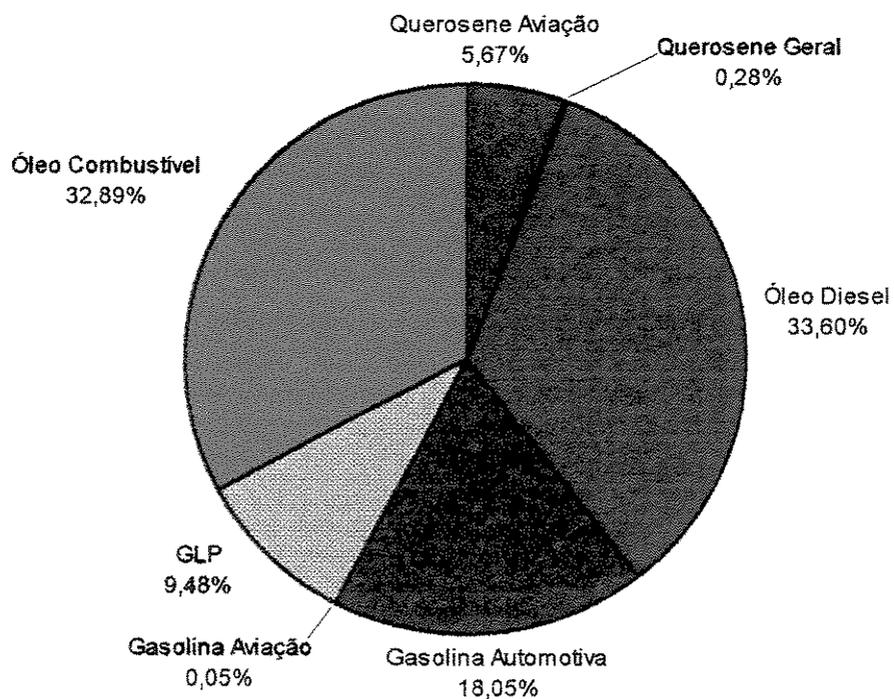


Figura 6.6- Distribuição das emissões de CO₂ (6.841 GgCO₂) por tipo de combustível fóssil na RBPC em 1995

Os dados referentes às emissões de dióxido de carbono originadas de combustíveis fósseis para cada setor de consumo da RBPC são apresentados na Tabela 6.4 e representados graficamente na Figura 6.7.

Tabela 6.4- Emissões de CO₂ por setores e por tipo de combustível fóssil em 1995

Setor Combustível	Residencial (GgCO ₂)	Comercial (GgCO ₂)	Industrial (GgCO ₂)	Transportes (GgCO ₂)	Rural (GgCO ₂)	Demais (GgCO ₂)	Total (GgCO ₂)
Óleo Diesel	0	1	65	1.716	511	5	2.298
Gasolina Automotiva	0	0	0	1.235	0	0	1.235
Gasolina Aviação	0	0	0	3	0	0	3
GLP	349	69	211	0	0	19	648
Óleo Combustível	0	13	2.102	0	20	115	2.250
Querosene Aviação	0	0	0	388	0	0	388
Querosene Geral	8	1	7	0	0	3	19
Total	357	84	2.385	3.342	531	142	6.841

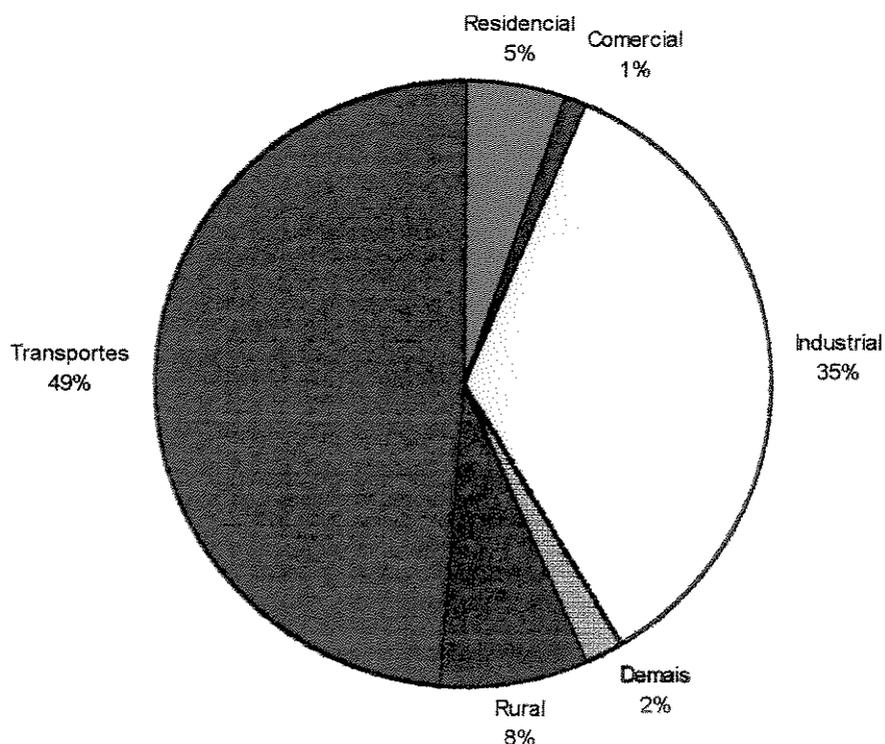


Figura 6.7- Emissões de CO₂ originárias de combustíveis fósseis por setor de consumo (1995)

Observa-se que o setor de transportes é responsável por 49% das emissões de CO₂ na região. Neste setor o consumo de óleo diesel representa 51% das emissões totais, como pode ser observado na Tabela 6.4.

O setor industrial também apresenta altas taxas de emissão, sendo responsável por 35% do total na RBPC. O óleo combustível contribui com 88% das emissões referentes a este setor. Além dos setores de transportes e industrial, os demais contribuem com apenas 16% das emissões na região.

Comparando-se as emissões da região com o inventário de emissões de CO₂ do Estado de São Paulo [SMA, 1996 e SEE, 1997], obtém-se que as emissões do setor industrial na RBPC têm uma contribuição relativa mais elevada, 35% contra 32%. O setor de transporte regional apresenta uma participação relativa menor quando comparado ao mesmo setor no Estado, 49% contra 52%. Quanto aos outros setores não há diferenças significativas.

Deve-se ressaltar que as matrizes de consumo energético do Estado e da RBPC diferem bastante. Na região não existem dados a respeito do consumo de carvão mineral, enquanto que no Estado de São Paulo este combustível representa 27% das emissões do setor industrial. Também não são conhecidos dados de consumo de gás natural e nafta nesta região, combustíveis que contribuem com pouco mais de 3% das emissões de CO₂ no Estado. Nesta região também não há consumo de óleo combustível no setor de transportes.

No Estado de São Paulo, a RBPC é responsável por pouco mais de 11% das emissões de CO₂, isto é, o Estado todo emitiu 61.886 GgCO₂ em 1994 [SMA, 1996] e a região emitiu 6.841 GgCO₂ em 1995. Não existem dados referentes ao ano de 1995 para o Estado. Em 1994 o Brasil emitiu 215.134 GgCO₂ devido ao uso de energia e neste panorama a região participa com 3,2% das emissões.

Considerando-se as emissões *per capita* de CO₂ na RBPC, no Estado e no Brasil [SEE, 1997], obtém-se respectivamente os valores 2,07, 1,87 e 1,39 tCO₂/habitante. Isto é, a média regional é cerca de 10% superior à média estadual e 50% superior à média nacional. Entretanto deve-se lembrar que a região possui o terceiro maior parque industrial brasileiro, concentrando cerca de 7% do VTI nacional (ver tópico 6.1) e seu setor de transportes é bastante desenvolvido. Neste aspecto é importante notar que as emissões por VTI se invertem: a média regional é aproximadamente 10% inferior à média estadual e apenas metade da média nacional.

7. Emissões e absorções de gás carbônico devido ao setor sucroalcooleiro na RBPC

Medidas para mitigação das emissões de CO₂, bem como de outros GEEs, têm sido estudadas e aplicadas, como por exemplo o uso de fontes renováveis de energia para substituição de combustíveis fósseis [UNEP, 1992]. Métodos de absorção e seqüestro de CO₂ da atmosfera também têm sido sugeridos. Neste capítulo são estimadas as emissões e absorções de CO₂ pelo uso de cana-de-açúcar e seus produtos na RBPC, baseando-se em dados do consumo de energéticos durante a produção desta biomassa.

No Brasil, e mais especificamente no Estado de São Paulo [SEE, 1997, SMA, 1996], a utilização energética dos produtos da cana-de-açúcar (álcool, bagaço, palhas e pontas) contribuem de maneira bastante significativa para se evitar taxas de emissões maiores do que as atuais. Segundo MACEDO [1998a & 1998b] as emissões líquidas anuais de gases de efeito estufa evitadas no país com a produção e a utilização de cana-de-açúcar correspondem a cerca de 46,7 milhões de toneladas equivalentes de CO₂. Este total representa aproximadamente 20% de todas as emissões de CO₂ derivadas dos combustíveis fósseis no Brasil.

7.1. Emissões e Absorções

As etapas que contribuem para o ciclo do carbono na agro-indústria da cana-de-açúcar podem ser representadas nos seguintes tópicos [MACEDO, 1992]:

- Aumento das emissões de CO₂ devido ao uso de combustíveis fósseis nas etapas de produção, tanto de cana como do beneficiamento de seus produtos;
- Redução das taxas de emissão pela substituição da gasolina pelo álcool (hidratado e anidro);
- Redução das taxas de emissão de CO₂ pela substituição de óleo combustível pelo bagaço de cana na produção de açúcar e em outros processos industriais;
- Mudança nos níveis de CO₂ atmosférico devido às mudanças no solo durante a etapa de plantio da cana-de-açúcar, cuja quantificação é bastante difícil, pois depende da condição dos solos utilizados e da cultura existente antes do plantio da cana.

Dados da safra de 89/90 indicam que a quantidade de cana produzida pelas 15 usinas localizadas na RBPC [NEPAM, 1997] equivalem a 15.077×10^3 toneladas. Em 1995 estima-se que foram processadas 15.088×10^3 toneladas de cana-de-açúcar na região, perfazendo uma área colhida de 201.173 ha, com uma produtividade média de 75t/ha. Deste total cerca de 7.825×10^3 toneladas de cana se destinaram à produção de álcool e 7.263×10^3 toneladas à produção de açúcar. A produção regional de álcool (hidratado e anidro) foi de 13.869 TJ, o consumo de álcool hidratado foi de 7.076 TJ e de álcool anidro (adicionado à gasolina automotiva) foi de 2.451 TJ. A produção de bagaço, que é totalmente consumida na região, foi de 31.747 TJ.

O IPCC [HOUGHTON, 1996] considera que as emissões líquidas de CO₂ devido à combustão de biomassa é nula, pois o carbono liberado pelo consumo energético em uma colheita foi absorvido anteriormente. As contribuições líquidas para as emissões devem-se ao consumo de combustíveis fósseis durante as etapas de produção e às mudanças no solo.

Outro ponto importante que deve ser considerado neste caso específico é a fração oxidada da biomassa. Se considerarmos para o álcool uma fração de oxidação de 0,99% e para o bagaço uma fração de 0,87% como sugere o IPCC, espera-se que o balanço das absorções e emissões para uma safra seja negativo, fato este decorrente da não oxidação de todo o carbono contido nestes combustíveis.

Segundo MACEDO [1998b], o consumo de combustíveis fósseis é de 236 MJ por tonelada de cana, levando a um consumo energético de 3.561 TJ na RBPC em 1995, durante as etapas agrícola e industrial de produção da cana e seus derivados. Considerando que a maior parte deste consumo se verifica no uso de óleo diesel [FERREIRA, 1992], que a metodologia IPCC [HOUGHTON *et al.*, 1995] utiliza um coeficiente de emissão de 74,1 tCO₂/TJ e que a fração de oxidação para o óleo diesel é de 0,99%, tem-se uma taxa de emissão da ordem de 0,261 MtCO₂ na região no ano de 1995.

Segundo FERREIRA [1992], o consumo de óleo diesel é estimado em 195,3 l/ha na etapa agrícola de produção da cana-de-açúcar e seus subprodutos, isto é, considerando-se todas as etapas de preparo do solo, plantio, tratos culturais e colheita. A partir deste dado obtém-se que o consumo total de óleo diesel no setor sucro-alcooleiro da RBPC em 1995 foi de 39.289 m³ ou 1.425 TJ, considerando o poder calorífico inferior de 42.593,12 kJ/kg (8.663,18 kcal/l) para o diesel. Portanto as emissões referentes a este combustível na etapa agrícola perfazem um total de 0,104 MtCO₂, e a diferença entre este valor e o anterior deve-se à etapa industrial do processo.

Como os dados apresentados por MACEDO [1998b] também levam em conta a fase industrial de beneficiamento da cana-de-açúcar, estes foram adotados para os cálculos apresentados aqui.

Quanto às emissões com origem nas mudanças no solo, sabe-se que estas são difíceis de se determinar, pois dependem de fatores como o tipo de solo onde é feito o cultivo da cana, as técnicas de manejo do solo e de plantio, entre outros. Entretanto estima-se que as taxas de emissões sejam pouco significativas quando comparadas ao total emitido devido ao consumo de combustíveis fósseis [MACEDO, 1998b].

Na Tabela 7.1 é mostrado o balanço de emissões de CO₂ na RBPC em 1995 devido a produção e consumo da cana-de-açúcar e seus subprodutos, considerando que todo o bagaço produzido é utilizado como combustível na própria região. Considera-se também que o fator de emissão para biomassa sólida é de 109,6 tCO₂/TJ e para biomassa líquida de 73,3 tCO₂/TJ, a fração de carbono oxidado para o álcool e o diesel é de 0,99% e para o bagaço esta fração é de 0,87%.

Tabela 7.1- Emissões e absorções de CO₂ no setor sucro-alcooleiro da RBPC (1995).

	CO₂ emitido (tCO₂)	CO₂ fixado (tCO₂)	Balanço (tCO₂)
Bagaço	3.028.022,4	-3.480.419,8	-452.397,4
Álcool	691.664,4	-1.017.060,0	-325.395,6
Óleo diesel	261.113,9	ZERO	+261.113,9
Total	3.980.800,7	-4.497.479,8	-516.679,1

Assim, tem-se que cerca de 517 GgCO₂ são absorvidas na região. Isto ocorre devido a três fatores: a produção de álcool é superior ao consumo na região, isto é, há exportação de álcool para outras regiões; o volume de carbono não oxidado com o uso de bagaço é muito significativo; e as emissões referentes ao óleo diesel consumido são razoavelmente pequenas. É importante observar que a absorção de CO₂ no setor é equivalente a 7,6% das emissões totais de combustíveis fósseis na RBPC. Considerando-se que em 1995, a taxa de mistura de álcool anidro à gasolina automotiva era de 22% em volume⁷ (a atual taxa é de 24% e espera-se um aumento para 26%) e que foram consumidos 707.807.784 l de gasolina automotiva na região, tem-se que foram evitadas a emissão de 61,7 GgCO₂ naquela época.

⁷ Considerou-se para a gasolina automotiva um PCI de 10.180 kcal/kg e uma massa específica de 738 kg/m³ e para o álcool anidro um PCI de 6.400 kcal/kg e uma massa específica de 791 kg/m³.

7.2. Perspectivas

O aprimoramento das etapas de produção da cana-de-açúcar e seus derivados, que levem a um maior aproveitamento de seus potenciais esbarra em muitos problemas [FERREIRA, 1992; WALTER, 1994; CANAVARROS, 1994]. Entretanto as perspectivas futuras indicam um maior aproveitamento do potencial energético da cana-de-açúcar. Isto é, fatores como as leis de proteção ambiental e o desenvolvimento tecnológico devem levar à implementação da colheita mecanizada. Conseqüentemente palhas e pontas poderão ser utilizadas para produção de energia. Esta possibilidade e seus benefícios para se evitar emissões de CO₂ são abordados aqui.

O vinhoto é outro possível energético originado deste setor, que não será abordado neste trabalho. A geração de biogás a partir deste produto pode levar a um potencial energético de 2.557 TJ [NEPAM, 1997]. Entretanto, devido às etapas intermediárias existentes neste processo, a contabilização das emissões decorrentes é bastante complexa. Na região o vinhoto tem sido aproveitado principalmente como fertilizante ou ração animal.

Neste trabalho considerou-se que a produção média de palhas e pontas é de cerca de 180 kg ou 3.460 MJ (base seca, baseando-se no PCI desta biomassa) por tonelada de cana [GOLDEMBERG, 1986]. Portanto a produção de palhas e pontas na RBPC é de cerca de 2.716×10^3 t em 1995, cujo potencial energético bruto equivale a 52.204 TJ.

O conteúdo energético de palhas e pontas pode variar ligeiramente de acordo com a variedade e a produtividade da cana cultivada, como mostra o trabalho de RIPOLI *et al.* [1990].

Naquele trabalho também são apresentados os PCI e PCS de pontas, folhas verdes e palhas para as três diferentes variedades estudadas. Em média os valores apresentados por GOLDEMBERG [1986] e RIPOLI *et al.* [1990] são bastante semelhantes.

Devido a algumas limitações tecnológicas das colhedoras, que não podem operar em terrenos cuja declividade seja superior a 15%, estima-se que apenas 50%⁸ da cana possa ser colhida mecanicamente [MACEDO, 1998b]. Para fins de cálculo este índice foi adotado para a colheita mecânica na RBPC. Alguns trabalhos [PINTO, 1992] também recomendam que se deixe no campo cerca de 50% das palhas com a finalidade de fertilizar e proteger o solo. Isto significa que há um aproveitamento efetivo de somente 25% do total de palhas e pontas disponível.

Portanto o potencial energético líquido de palhas e pontas é de aproximadamente 13.051 TJ. Na Tabela 7.2 é apresentada uma comparação entre os potenciais energéticos líquidos do bagaço e das palhas e pontas na RBPC em 1995.

Tabela 7.2- Potencial energético líquido de palhas e pontas (1995).

	Produção (kg/t cana colhida)	Conteúdo energético (MJ/t cana colhida)	Potencial energético (TJ)
Bagaço	283 ^(50% umidade)	2.104	31.747
Palhas e pontas	180 ^(seca)	3.460	13.051

Com o uso energético de palhas e pontas, as emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa são reduzidas devido à possibilidade de substituição de energéticos. Entretanto com a mecanização da colheita, necessária para o aproveitamento de palhas e pontas, e o aumento da massa de cana transportada, deve haver um aumento no consumo de combustíveis fósseis. Conseqüentemente as emissões também aumentam durante o processo agro-industrial de produção da cana-de-açúcar e seus subprodutos.

⁸ Espera-se que na região de Piracicaba esta porcentagem seja inferior a 50%.

Segundo dados compilados por FURLANI NETO [1998], o consumo de óleo diesel na colheita mecanizada e com o aproveitamento das palhas é de 1,21 litros por tonelada de cana. Como já foi visto anteriormente, apenas 50% da área cultivada pode ser colhida mecanicamente, o que leva a um consumo de 330,9 TJ de óleo diesel na RBPC para o ano de 1995, levando a um aumento de 24.263,6 tCO₂ nas emissões. Mas por outro lado, a energia gerada com o aproveitamento de palhas e pontas é capaz de suprir, pelo menos em parte, a crescente demanda por energia elétrica na RBPC, evitando a instalação de plantas termelétricas baseadas em combustíveis fósseis.

Supondo duas plantas termelétricas de mesmo potencial energético líquido, cujos combustíveis fossem palhas e pontas, e óleo combustível respectivamente, tem-se como resultado as emissões apresentadas na Tabela 7.3. Aqui se considera novamente um fator de emissão para biomassa sólida de 109,6 tCO₂/TJ, e uma fração de carbono oxidado para o álcool, o diesel e o óleo combustível de 0,99% e para a biomassa sólida uma fração de 0,87%.

Tabela 7.3- Emissões evitadas pelo uso de palhas e pontas comparadas com o óleo combustível.

	Potencial energético (TJ)	CO ₂ emitido (tCO ₂)	CO ₂ fixado (tCO ₂)	Balanco de emissões (tCO ₂)
Palhas e pontas	13.051	#1.269.081,0	-1.430.824,6	-161.743,6
Óleo combustível*	13.051	999.615,2	ZERO	+999.615,2

* Fator de emissão de 77,4 tCO₂/TJ para o óleo combustível e 74,1 tCO₂/TJ para o óleo diesel.

Este valor já leva em conta as emissões referentes à colheita de palhas e pontas.

Portanto, neste tipo de comparação, as emissões evitadas totalizaram 1.161 GgCO₂, que correspondem a 16,9% das emissões totais de CO₂ originadas do consumo de combustíveis fósseis na região.

O potencial de geração energética atual na RBPC a partir da cana-de-açúcar e seus subprodutos (álcool e bagaço) é de 41.274 TJ, que corresponde a cerca de 44% de todo o consumo regional de combustíveis fósseis (94.885 TJ) para o ano de 1995.

As perspectivas de aproveitamento energético de palhas e pontas através da colheita mecanizada elevam o potencial da cana-de-açúcar e seus subprodutos em aproximadamente 13.051 TJ. Esta possibilidade reduziria a dependência regional da importação de eletricidade, apontada no capítulo anterior.

O balanço das emissões de CO₂ indica que há uma absorção de 517 GgCO₂ neste setor da RBPC. Este valor é equivalente a 7,6% das emissões totais originadas do consumo de combustíveis fósseis na região, e pode representar um bônus em projetos de implementação conjunta. As emissões evitadas com a utilização do álcool anidro adicionado à gasolina automotiva equivalem a 61,7 GgCO₂ e o uso do bagaço como substituto do óleo combustível eleva este potencial para cerca de 2.500 GgCO₂.

Com o aproveitamento de palhas e pontas as emissões evitadas aumentariam em 1.161 GgCO₂. Também não haveria um aumento substancial nas emissões de CO₂ decorrentes do consumo de combustíveis fósseis nas etapas de produção da cana e seus subprodutos. Isto se deve principalmente ao aumento da produtividade e eficiência nas etapas de produção. A implementação da colheita mecanizada e o conseqüente aproveitamento de palhas e pontas, também podem contribuir com o aumento da disponibilidade energética na região, porém mantendo o mesmo nível de emissão de CO₂ atual.

8. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Além das conclusões específicas já apresentadas nos capítulos anteriores, algumas conclusões de caráter geral podem ser acrescentadas.

A metodologia IPCC, reconhecida mundialmente, vem de encontro a este objetivo e permite que se possa contabilizar emissões decorrentes do uso de energia, que é a principal fonte de gases de efeito estufa. Entretanto, sua aplicação limita-se à países ou regiões que possuem dados energéticos consolidados. Para que se possa aplicá-la a regiões cujas fronteiras não coincidam com as fronteiras geopolíticas institucionais, uma série de modificações e hipóteses devem ser estabelecidas.

Nesta dissertação mostrou-se que é possível utilizar a metodologia IPCC com adaptações. As correções e hipóteses necessárias à correta aplicação da metodologia e à elaboração do inventário de emissões de gases de efeito estufa dependem intrinsecamente das características particulares de cada região avaliada. Portanto é essencial que se estude as características energéticas da região. Nesta dissertação abordou-se a Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari.

O estudo da Região das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari apresenta as modificações necessárias e específicas para que a metodologia IPCC possa ser aplicada a mesma. Também são apresentados os dados de consumo energético adaptados às necessidades da metodologia de inventariação de emissões de CO₂. Percebe-se através deste estudo que a região em questão

apresenta um elevado índice de consumo de todos os energéticos, o que se deve ao grande desenvolvimento de seu parque industrial e de seu sistema de transportes.

O inventário de emissões de CO₂ mostra que a região emitiu efetivamente 6.841 GgCO₂ em 1995. Estas emissões referem-se exclusivamente ao uso de combustíveis fósseis, porém quando se consideram as emissões brutas que incluem o CO₂ originário do uso da biomassa este número atinge 10.560 GgCO₂.

A análise das emissões através do modelo *bottom-up* mostra que os setores de transportes e industrial concentram 84% de todas as emissões regionais de CO₂. Portanto, qualquer medida que vise reduzir as taxas de emissão na região deve incluir obrigatoriamente estes setores. Observa-se também que apesar da participação substancial da biomassa na matriz energética regional, o índice de emissão *per capita* de 2,07 tCO₂/habitante é bastante superior às médias estadual e nacional, respectivamente 1,87 e 1,39 tCO₂/habitante.

Deve-se notar que a RBPC apresenta um grande desenvolvimento econômico, sendo o terceiro maior parque industrial brasileiro e concentrando cerca de 7% do VTI nacional. Assim, quando se considera as emissões de CO₂ em função do VTI, obtém-se que a média regional é aproximadamente 10% inferior à média estadual e metade da média nacional.

O estudo do setor sucro-alcooleiro na RBPC mostra que o uso energético do bagaço de cana, do álcool anidro e do álcool hidratado contribuem significativamente para se evitar maiores taxas de emissão. O potencial energético destes combustíveis é de 41.274 TJ, o que representa 26% do consumo energético da região em 1995, e as emissões deste setor, que não devem ser consideradas como emissões líquidas, representam 35% do total regional. Na verdade o setor é responsável pela absorção de cerca de 500 GgCO₂, fato devido à exportação de álcool e ao carbono não oxidado na combustão do bagaço.

Com o advento da colheita mecanizada no setor sucro-alcooleiro, as palhas e pontas também podem e devem ser aproveitadas como fontes energéticas, o que reduziria a dependência regional de eletricidade. O potencial energético de palhas e pontas na região atinge 13.051 TJ e as emissões evitadas com seu aproveitamento seriam da ordem de 1,16 GgCO₂. Portanto este é um potencial muito significativo que deve ser considerado para o futuro. Sob este ponto de vista, conclui-se que o Proálcool tem importância estratégica para a região, como é demonstrado nesta dissertação, que contribui para um debate mais amplo a respeito do Programa Nacional do Alcool.

8.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Um dos maiores problemas encontrados na elaboração deste trabalho refere-se a falta de dados energéticos desagregados e confiáveis. Além da falta de disposição dos órgãos governamentais existentes em ajudar, não há um sistema que agregue as informações energéticas de maneira satisfatória. Portanto seria muito interessante que se compilassem os dados regionais já disponíveis em alguma publicação.

Quanto à metodologia IPCC, ainda existem inúmeras alterações e correções que se fazem necessárias, especialmente quando se faz uma análise regional. Dentre estas possíveis alterações, cita-se o fator de emissão de carbono, o índice de carbono seqüestrado e o índice de carbono não oxidado para cada um dos combustíveis utilizados regionalmente.

Outros refinamentos podem ser acrescentados, como por exemplo elaborar um estudo dos fluxos de veículos na região correlacionado com as emissões causadas por este e, no caso específico da RBPC, considerar separadamente as emissões da Refinaria de Paulínia, que podem levar a resultados mais completos.

Outras metodologias podem ser desenvolvidas para se considerar características regionais. Porém este trabalho deve ser realizado em âmbito nacional para que as taxas de emissão de cada região possam ser comparadas entre si e a soma destas com o inventário de emissões nacional elaborado através da metodologia IPCC.

Além do uso de energia, a metodologia IPCC permite que se estime as emissões de outros gases de efeito estufa originados de processos industriais, do uso e manejo dos solos e florestas, de solventes, da agricultura e de resíduos. Tais inventários necessitam de um volume bastante grande de informações, porém não existem estudos regionais a respeito.

9. Referências Bibliográficas

- BARRY, R.G., CHORLEY, R.J. **Atmosphere, weather and climate.** London: Methuen & Co Ltd, 1968. 319p.
- BRIFFA, K.R., JONES, P.D., SCHWEINGRUBER, F.H., *et al.* Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years. **Nature**, London, v.393, n.6684, p.450-455, Jun, 1998.
- CANAVARROS, O.B. **O consumo e o potencial de energia da Região Administrativa de Campinas - Possibilidades de substituição de energéticos.** Campinas: FEM, UNICAMP, 1994. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1994.
- CANAVARROS, O.B. **Uma metodologia para a análise da consistência de dados de consumo de energia na elaboração de matrizes energéticas, aplicada à mesoregião 01 de Mato Grosso.** Campinas: FEM, UNICAMP, 1998. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- CAVALIERO, C.K.N. **Redução das emissões de CO₂ do segmento siderúrgico nacional e do Estado de São Paulo através da injeção de combustível auxiliar em alto forno: Estudo de casos na ACESITA e COSIPA.** Campinas: FEM, UNICAMP, 1998. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- COULSON, K.L. **Solar and terrestrial radiation.** New York: Academic Press, 322p., 1975.

- DE VRIES, H.J.M.; OLIVIER, J.G.J., VAN DEN WIJNGAART, R.A., *et al.* Model for calculating regional energy use, industrial production and greenhouse gas emissions for evaluating global climate scenarios. **Water, Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v.76, n.1-2, p.79-131, Jul, 1994.
- ENVIRONMENT CANADA. **Canada's Second National Report on Climate Change: Actions to Meet Commitments under the UNFCCC.** Ottawa: Environment Canada, 142p., May, 1997.
- FAHRENBRUCH, A.L., BUBE, R.H. **Fundamentals of solar cells: photovoltaic solar energy conversion.** New York: Academic Press, 559p., 1983.
- FERREIRA, A.L. **Demanda e conservação de óleo diesel na fase agrícola do Proálcool.** Campinas: FEM, UNICAMP, 1992. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1992.
- FURLANI NETO, V.L. Inovações tecnológicas na colheita mecanizada. In: Agroindústria Canavieira e o Novo Ambiente Institucional, 1998, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP/Instituto de Economia, 1998.
- GHIL, M., VAUTARD, R. Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series. **Nature**, London, v.350, n.6316, p.324-327, Mar, 1991.
- GOLDEMBERG, J., MONACO, L.C., MACEDO, I.C. The Brazilian fuel-alcohol program. In: JOHANSSON, T.B., KELLY, H., REDDY, A.K.N., *et al.* **Renewable energy: Sources for fuels and electricity.** USA, Island Press. 1986.
- GOLDEMBERG, J. **Energy, environment and development.** Geneva: International Academy of the Environment, 195p., 1995.
- GRAEDEL, T.E., BATES, T.S., BOUWMAN, A.F., *et al.* A combination of inventories of emissions to the atmosphere. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v.7, n.1, p.1-26, 1993.

- GRUBB, M.J. **On Coefficients for Determining Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuel Production and Consumption.** Energy and Environmental Programme. London: Royal Institute of International Affairs, 322p., Apr., 1989.
- HANSEN, J., SATO, M., RUEDY, R. Radiative forcing and climate response. **Journal of Geophysical Research - Atmospheres**, Washington, v.102, n.D6, p.6831-6864, Mar, 1997.
- HOUGHTON, J.T., CALLANDER, B.A., VARNEY, S.K. **Climate Change 1992 : The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment.** Cambridge: Cambridge University Press. 212p.
- HOUGHTON, J.T., MEIRA FILHO, L.G., LIM, B., *et al.* **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Bracknell: IPCC, 1995. v.3: Greenhouse Gas Inventory Reference Manual, cap.1: Energy. p.1-135.
- JANNUZZI, G.M., QUEIROZ, G.C. Inventário de emissões de gases estufa a nível regional: metodologia e resultados para a Bacia dos Rios Piracicaba e Capivari (São Paulo). **Revista de Tecnologia e Ambiente**, Criciúma, v.2, n.2, p.59-71, jul./dez., 1996.
- JESSUP, P. **Local Government Implementation of Climate Protection.** Toronto: International Council for Local Environmental Initiative (ICLEI)- Cities for Climate Protection (CCP), 48p., Jul, 1997. Interim Report.
- KELLY, P.M., WIGLEY, T.M.L. Solar cycle length, greenhouse forcing and global climate. **Nature**, London, v.360, n.6402, p.328-330, Nov., 1992.
- LASHOF, D.A., AHUJA, D.R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. **Nature**, London, v.344, n.6266, p.529-531, Apr., 1990.
- MACEDO, I.C. Greenhouse gas emissions and bio-ethanol production/utilisation in Brazil. **Biomass & Bioenergy**, Oxford, v.14, n.1, p. 77-81, 1998b.

- MACEDO, I.C. Greenhouse gases and bio-ethanol in Brazil. *International Sugar Journal*, West Glamorgan, v.100, n.1189, p. 2-5, Jan. 1998a.
- MACEDO, I.C. The sugar cane agro-industrial - Its contribution to reducing CO2 emissions in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, London, v.3, n.2, p. 77-80, June 1992.
- MARLAND, G., ROTTY, R.M. Carbon dioxide emissions from fossil fuels: a procedure for estimation and results for 1950-1982. **Tellus Series B**, Copenhagen, v.36, n.4, p.232-261, 1984.
- MARLAND, G., PIPPIN, A. United States emissions of carbon dioxide to the Earth's atmosphere by economic activity. **Energy Systems and Policy**, v.14, p.319-336, 1990.
- MCCORMICK, M.P., THOMASON, L.W., TREPTE, C.R. Atmospheric effects of the Mt. Pinatubo eruption. **Nature**, London, v.373, n.6513, p.399-404, 1995.
- MIGUEZ, J.D.G. Preparation of the Brazilian National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change. In: ROSA, L.P. & SANTOS, M.A.(Eds.) **Greenhouse Gas Emissions under Developing Countries Point of View**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1996. p.135-148.
- MINISTRY OF THE ENVIRONMENT - FINLAND. **Finland's Second Report Under the Framework Convention on Climate Change**. Helsinki: Helsinki University Printing House, 63p., 1997.
- MOREIRA, J.R. Inventory of GHG - A Brazilian Overview. In: ROSA, L.P. & SANTOS, M.A.(Eds.) **Greenhouse Gas Emissions under Developing Countries Point of View**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1996. p.149-162.
- NEPAM. **Qualidade ambiental e desenvolvimento regional nas bacias dos rios Piracicaba e Capivari** (5 volumes). Relatório final, NEPAM/UNICAMP - PADCT/CNPq, 1997.

- OECD. **Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks.** Final Report from OECD Experts Meeting 18-21 February 1991. Paris: IPCC, Aug., 1991.
- OECD. **The Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Bracknell: IPCC, 1997. 3 volumes.
- ONU. **United Nations Framework Conference on Climate Change.** New York: ONU-UNFCCC, 1992a.
- ONU. **Agenda 21: Earth Summit.** New York: ONU-UNCED, 1992. Cap.9,: Protection of the Atmosphere. 1992b.
- PACYNA, J.M., GRAEDEL, T.E. Atmospheric emissions inventories: status and prospects. **Annual Review of Energy and the Environment**, Kjeller, n.20, p.265-300, 1995.
- PINTO, L.A.R. Aproveitamento de bagaço e da palha de cana-de-açúcar em programas energéticos comunitários. **Açúcar & Alcool**, n.63, p.34-37, julho/agosto 1992.
- PROCEL. **Uso eficiente de energia e desenvolvimento regional.** Relatório final, 1997.
- RAVAL, A., RAMANATHAN, V. Observational determination of the greenhouse effect. **Nature**, London, v.342, n.6251, p.758-761, Dec., 1989.
- RIPOLI, T.C.C., MOLINA JR, W.F., NOGUEIRA, M.C.S., MATOS, J.R. Equivalente energético do palhico de cana-de-açúcar. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 19, 1990, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ/USP, 1990. v.1, p.249-262.
- RODHE, H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. **Science**, Washington, v.248, n.4960, p.1217-1219, Jun., 1990.
- ROSA, L.P. & SANTOS, M.A. **Greenhouse Gas Emissions under Developing Countries Point of View.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1996. 283p.

- SEE. **Balço Energético do Estado de São Paulo 1997: Ano base 1996.** Secretaria de Estado de Energia, São Paulo: CESP, 1997. 208p.
- SMA. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado de São Paulo.** Secretária de Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 1996.
- SCHLESINGER, M.E., RAMANKUTTY, N. Implications for global warming of intercycle solar irradiance variations. *Nature*, London, v.360, n.6402, p.330-333, Nov., 1992.
- SCHLESINGER, M.E., RAMANKUTTY, N. An oscillation in the global climate system of period 65-70 years. *Nature*, London, v.367, n.6465, p.723-726, Feb., 1994.
- SEADE. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados, São Paulo. Referência da internet: <http://www.seade.gov.br> São Paulo em Dados: população, ano base 1997. São Paulo, 1998.
- STOUFFER, R.J., MANABE, S., VINNIKOV, K.Ya. Model assessment of the role of natural variability in recent global warming. *Nature*, London, v.367, n.6464, p.634-636, Feb., 1994.
- U.S. EPA. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-1993.** Washington: United States Environmental Protection Agency, Sep., 1994. 146p.
- UNEP. **Greenhouse gas abatement costing studies. Analysis of abatement costing issues and preparation of a methodology to undertake national greenhouse gas abatement costing studies.** UNEP: Denmark, Aug. 1992. 157p.
- WALTER, A.C.S. **Viabilidade e perspectivas da cogeração e da geração termoeétrica junto ao setor sucro-alcooleiro.** Campinas: FEM, UNICAMP, 1994. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1994.
- WIGLEY, T.M.L., RAPER, S.C.B. Natural variability of the climate system and detection of the greenhouse effect. *Nature*, London, v.344, n.6264, p.324-327, Mar., 1990.

10. Anexo I

Países que fazem parte do Anexo I da UNFCCC

Alemanha	Islândia
Austrália	Itália
Áustria	Japão
Belarus #	Letônia #
Bélgica	Lituânia #
Bulgária #	Luxemburgo
Canadá	Noruega
Comunidade Européia	Nova Zelândia
Dinamarca	Países Baixos
Espanha	Polônia #
Estados Unidos da América	Portugal
Estônia #	Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte
Federação Russa #	República Tcheco-Eslovaca #
Finlândia	Romênia #
França	Suécia
Grécia	Suíça
Hungria #	Turquia
Irlanda	Ucrânia #

Países em processo de transição para uma economia de mercado.

11. Anexo II

Municípios que compõe a RBPC por Região de Governo

RG de Bragança Paulista	RG de Jundiá	Minas Gerais
01. Amparo	29. Itatiba	53. Camanducaia
02. Atibaia	30. Jarinu	54. Extrema
03. Bom Jesus dos Perdões	31. Louveira	55. Itapeva
04. Bragança Paulista	32. Morungaba	56. Toledo
05. Joanópolis		
06. Monte Alegre do Sul	RG de Limeira	
07. Nazaré Paulista	33. Cordeirópolis	
08. Pedra Bela	34. Iracemápolis	
09. Pinhalzinho	35. Limeira	
10. Piracaia		
11. Tuiuti	RG de Piracicaba	
12. Vargem	36. Águas de São Pedro	
	37. Capivari	
RG de Campinas	38. Charqueada	
13. Americana	39. Elias Fausto	
14. Artur Nogueira	40. Mombuca	
15. Campinas	41. Piracicaba	
16. Cosmópolis	42. Rafard	
17. Holambra	43. Rio das Pedras	
18. Hortolândia	44. Saltinho	
19. Jaguariúna	45. Santa Maria da Serra	
20. Monte Mor	46. São Pedro	
21. Nova Odessa		
22. Paulínia	RG de Rio Claro	
23. Pedreira	47. Analândia	
24. Santa Bárbara d'Oeste	48. Corumbataí	
25. Santo Antonio de Posse	49. Ipeúna	
26. Sumaré	50. Itirapina	
27. Valinhos	51. Rio Claro	
28. Vinhedo	52. Santa Gertrudes	

12. Anexo III

Poder calorífico inferior e massas específicas considerados neste trabalho

Energético	PCI (kJ/kg)	13. Massa Específica (kg/m ³)
Óleo diesel	42.593,1	851
Gasolina (média)	44.166,3	738
GLP	46.132,9	552
Óleo combustível (médio)	39.944,6	999
Querosene (médio)	43.496,9	787
Álcool anidro	26.777,6	791
Álcool hidratado	24.894,8	809
Bagaço de cana (50% umidade)	7.435,0	----
Palhas e pontas de cana (base seca)	9.505,3	----
Eletricidade ⁹	3.598,2	----

FONTE: SEE, 1997 (exceto dados para palhas e pontas, obtidos em GOLDEMBERG *et al.*, 1996)

⁹ Unidade em termos de kJ/kWh.