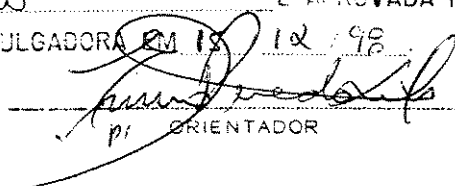


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Carla Kazue Nakao
Cavalheiro E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 18/12/98


p/ ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**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**

Autor : **Carla Kazue Nakao Cavaliero**
Orientador: **Gilberto De Martino Jannuzzi**

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

**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**

Autor : **Carla Kazue Nakao Cavaliero**

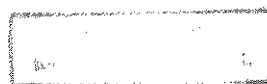
Orientador: **Gilberto De Martino Jannuzzi**

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: 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, 1998
S.P. - Brasil



9915154

UNID. V.	BC
N.º CIVIL	100
N.º DE	100
V.	38.318
TOMADO DE	229/99
PROD.	229/99
C	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	11/08/99
N.º CPO	

CM-00125544-2

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

C314r Cavaliero, Carla Kazue Nakao
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. / Carla Kazue Nakao
Cavaliero.--Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Gilberto De Martino Jannuzzi
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Mudanças climáticas. 2. Siderurgia. 3. Carbono.
I. Jannuzzi, Gilberto De Martino. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Mecânica. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENERGIA

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**

Autor : **Carla Kazue Nakao Cavaliero**

Orientador: **Prof. Dr. Gilberto De Martino Jannuzzi**



**Prof. Dr. Gilberto De Martino Jannuzzi, Presidente
DE/FEM/UNICAMP**



**Prof. Dr. Ennio Peres da Silva
DE/FEM/UNICAMP**



**Prof. Dr. Roberto Schaeffer
PPE/COPPE/UFRJ**

Campinas, 15 de dezembro de 1998.

*Dedico este trabalho
ao meu querido esposo Martin*

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo suporte financeiro.

Ao Prof. Gilberto, pela orientação prestada e amizade conquistada ao longo do trabalho.

Aos professores do Departamento de Energia, em especial ao Prof. Ennio que, antes de ser auxiliador no trabalho, foi e sempre será um grande amigo.

Aos meus familiares, em especial meus pais; Martin; Kiyomi; Batian; meus sogros; Nádia e João, pelo carinho e paciência nos momentos difíceis.

Aos funcionários da ACESITA, em especial ao Luiz Duarte Lage, pela atenção, ajuda e incentivo recebidos.

Aos funcionários da COSIPA, principalmente ao Manoel José Fernandez e Fernandez e Antonio Wilson Graner Gonçalves Jr., pela ajuda e apoio.

À Rosângela Luiza de Lucca, bibliotecária da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, pela amizade e ajuda nas pesquisas realizadas.

Aos amigos e colegas do Departamento, principalmente ao Rubem, Mônica, Miriam, Cristiano e Rodrigues, pelo apoio, companheirismo, alegria e até angústias divididas no decorrer no curso de pós-graduação.

Por último, mas não menos importante, agradeço a Deus por me permitir desfrutar deste triunfo.

*"A função da Ciência
não é acrescentar
mais anos à vida e sim,
mais vida aos anos."*

Resumo

CAVALIERO, Carla Kazue Nakao, *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: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 119 p. Dissertação (Mestrado).

As evidências de mudanças climáticas decorrentes da intensificação do chamado “efeito estufa” são cada vez mais fortes, levando ao interesse e a preocupação por parte da comunidade mundial. O dióxido de carbono (CO₂) é considerado o principal gás contribuinte do efeito estufa em função de suas altas taxas de emissões mundiais, decorrentes principalmente do consumo de combustíveis fósseis. Analisando o consumo energético nacional e do Estado de São Paulo, observa-se a importante participação do segmento siderúrgico nas emissões de CO₂ nacional e do Estado de São Paulo. Assim, o presente trabalho visa analisar a redução das emissões de CO₂ deste segmento através da injeção de combustível auxiliar na etapa de redução em alto forno, considerada a responsável pela maior parte do consumo energético de uma usina. Para tanto, é realizado um estudo de casos nas usinas siderúrgicas ACESITA (Cia. Aços Especiais Itabira) e COSIPA (Cia. Siderúrgica Paulista), onde fica constatado, através de levantamento de dados, a redução dessas emissões com a aplicação de tal medida. Além disso, é apresentada a estimativa da análise de viabilidade econômica da injeção de combustível auxiliar baseada em hipóteses e na literatura disponível. No capítulo final, procura-se discutir a importância dessas medidas no contexto nacional das emissões de CO₂, bem como oferecer algumas recomendações para futuros

trabalhos. Aborda-se também as alternativas que estão sendo analisadas para outros países onde a contribuição do setor siderúrgico para as emissões nacionais é importante.

Palavras Chave

- Segmento Siderúrgico, Emissões de CO₂, Injeção de Combustível Auxiliar em Alto Forno.

Abstract

CAVALIERO, Carla Kazue Nakao, *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: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 119 p. Dissertação (Mestrado).

There has been an increasing amount of evidence indicating a build-up of the "Greenhouse Effect" worldwide, and this has triggered widespread interest amongst specialists and part of the international community and governments. The carbon dioxide (CO₂) is the main contributor towards the Greenhouse Effect and the associated climate changes. The main source of CO₂ emissions is directly related to the use of fossil fuels. The analysis presented here based on the Energy Balance Tables for the State of São Paulo and for Brazil shows a significant contribution of the Iron & Steel industry towards the State and national CO₂ emissions. This work has the objective of verifying the possible contribution of fuel injection technology used in blast furnaces as one alternative to reduce carbon emissions from the industry. Case studies developed at ACESITA (Cia. Aços Especiais Itabira) e COSIPA (Cia. Siderúrgica Paulista), collected information that allowed a quantification of this measure. The work also presents an economic analysis of the use of fuel injection technology, based on certain hypothesis and related literature. In the final chapter it is discussed the eventual impact that this measure could bring at the national level, and also recommendation for further studies on the subject. Also, it is presented an overview of the main alternatives being considered by other countries which have important CO₂ emissions from the Iron & Steel industry.

Key Words

Iron & Steel Industry, CO₂ emissions, Fuel Injection Technology in Blast Furnaces

Índice

1. Introdução	1
1.1. Objetivos e Estruturação do Trabalho	3
2. As Emissões do Segmento Siderúrgico no Contexto das Discussões sobre Mudanças Climáticas	5
2.1. Mudanças Climáticas	5
2.1.1. Efeito Estufa	6
2.1.2. Acordos Internacionais	7
2.1.3. Emissão Mundial de CO ₂	13
2.2. Consumo Energético	15
2.2.1. Brasil	15
2.2.1.1. Balanço Energético Nacional	16
2.2.1.2. Consumo Energético Setorial	18
2.2.2. Estado de São Paulo	20
2.2.2.1. Balanço Energético do Estado de São Paulo	20
2.2.2.2. Consumo Energético Setorial	21
2.3. Emissão de CO ₂	23
2.3.1. Emissão Nacional de CO ₂	23
2.3.1.1. Inventário Nacional de Emissão de CO ₂	27
2.3.2. Emissão de CO ₂ do Estado de São Paulo	32
2.3.2.1. Inventário de Emissões de CO ₂ Associadas à Produção e Uso de Energia do Estado de São Paulo	32
2.4. Síntese do Capítulo	37

3. Indústria Siderúrgica	40
3.1. Indústria Siderúrgica Mundial	40
3.2. Indústria Siderúrgica Nacional	42
3.2.1. Distribuição da Produção Nacional de Aço	44
3.3. Processo de Produção de Aço	48
4. Etapa de Redução em Alto Forno	54
4.1. Processo de Redução em Alto Forno	54
4.1.1. Divisão do Alto Forno	55
4.1.2. Ventaneiras e Regeneradores	57
4.1.3. Transformações da Carga	59
4.1.4. Produtos do Alto Forno	61
4.1.5. Técnicas para Aumentar a Produtividade	63
4.2. Injeção de Combustível Auxiliar em Alto Forno	64
4.2.1. Efeito da Injeção de Combustível Auxiliar em Alto Forno	65
4.2.1.1. Temperatura de Chama	65
4.2.1.2. Permeabilidade	66
4.2.1.3. Controle Térmico e Qualidade do Gusa	67
4.2.1.4. Consumo de Coque: Taxa de Substituição	68
5. Estudo de Casos	70
5.1. ACESITA	70
5.1.1. Processo de Produção	71
5.1.2. Injeção de Carvão Vegetal Pulverizado (ICVP)	72
5.1.2.1. Alto Forno a Carvão Vegetal	73
5.1.2.2. Alto Forno a Coque de Carvão Metalúrgico	77
5.1.3. Cálculo da Emissão Evitada de CO ₂ na ACESITA com a ICVP em 1997	78
5.2. COSIPA	79
5.2.1. Processo de Produção	80
5.2.2. Injeção de Gás Natural	81
5.2.2.1. Altos Fornos a Coque de Carvão Metalúrgico	81
5.2.3. Cálculo da Emissão Evitada de CO ₂ na COSIPA com a Injeção de Gás Natural em 1997	84

5.3. Aspectos Econômicos da Injeção de Gás Natural em Alto Forno	86
5.3.1. Parâmetros Utilizados	86
5.3.1.1 Cálculo da Receita Anual	87
5.3.1.2. Cálculo da Despesa Anual	88
5.3.2. Análise de Viabilidade Econômica	89
6. Considerações Finais e Recomendações para Estudos Futuros	93
6.1. Considerações Finais	93
6.2. Recomendações para Estudos Futuros	97
Referência Bibliográfica	99
Anexo	109

Lista de Figuras

Figura 2.1: O efeito estufa.	6
Figura 2.2: Emissões antrópicas de CO ₂ , excluindo as mudanças no uso do solo e florestas.	11
Figura 2.3: Consumo total de fontes primárias em 1997.	16
Figura 2.4: Evolução do consumo final de energia no Brasil, por setores, entre 1990-1997.	18
Figura 2.5: Consumo energético do setor industrial nacional em 1997.	19
Figura 2.6: Consumo energético do segmento ferro gusa e aço em 1997.	19
Figura 2.7: Estrutura de consumo de energia em São Paulo por fonte energética.	21
Figura 2.8: Evolução do consumo final total do Estado de São Paulo por setores.	21
Figura 2.9: Consumo energético do setor industrial do Estado de São Paulo em 1996.	22
Figura 2.10: Consumo energético do segmento ferro gusa e aço paulista em 1996.	23
Figura 2.11: Comparação das emissões de carbono nos diversos setores entre 1970-90.	27
Figura 2.12: Emissões de carbono derivadas de fontes primárias de energia entre 1990-94.	28
Figura 2.13: Rota simplificada do carbono no processo de fabricação do aço na COSIPA.	29
Figura 2.14: Emissões de carbono de fontes primárias de energia em São Paulo e no Brasil em 1994.	33
Figura 2.15: Emissão de CO ₂ do Estado de São Paulo por setor em 1994.	34
Figura 2.16: Emissão de CO ₂ por segmento industrial paulista em 1994.	34
Figura 2.17: Emissão nacional de CO ₂ por setor em 1994.	35
Figura 2.18: Emissão de CO ₂ por segmento industrial nacional em 1994.	36
Figura 3.1: Evolução da produção brasileira de aço bruto.	43
Figura 3.2: Distribuição nacional da produção de aço em 1997.	45
Figura 3.3: Evolução do consumo energético por fonte.	46

Figura 3.4: Fluxograma simplificado de uma usina integrada a carvão metalúrgico	49
Figura 3.5: Balanço de massa do carbono na produção de 1 t de aço	53
Figura 4.1: Divisão do alto forno	56
Figura 4.2: Regenerador	58

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Estimativa das emissões evitadas de carbono decorrentes da diminuição dos subsídios aos combustíveis fósseis.	14
Tabela 2.2: Mudanças de uso do solo e biomassa da Amazônia brasileira e suas respectivas emissões de CO ₂ .	24
Tabela 2.3: Balanços de CO ₂ e O ₂ para as siderúrgicas a coque e a carvão vegetal, até a etapa de produção de gusa.	30
Tabela 2.4: Indicadores de desempenho para emissões de CO ₂ do sistema energético brasileiro e norte-americano.	31
Tabela 2.5: Coeficientes técnicos calculados para o Estado de São Paulo e Brasil em 1994.	37
Tabela 3.1: Produção mundial de aço bruto entre 1992-97.	42
Tabela 3.2: Distribuição da produção regional de aço bruto em 1997.	45
Tabela 4.1: Características dos gases de alto forno e de coqueria.	62
Tabela 5.1: Informações sobre a injeção de carvão vegetal pulverizado no alto forno 1, a carvão vegetal, da ACESITA em 1997.	74
Tabela 5.2: Informações sobre a injeção de carvão vegetal pulverizado no alto forno 2, a coque, da ACESITA em 1997.	77
Tabela 5.3: Emissão de CO ₂ da ACESITA em 1997.	78
Tabela 5.4: Emissão evitada de CO ₂ com a ICVP adotada na ACESITA em 1997.	79
Tabela 5.5: Informações sobre a injeção de gás natural (GN) nos altos fornos a coque, da COSIPA em 1997.	82
Tabela 5.6: Emissão de CO ₂ da COSIPA em 1997.	84
Tabela 5.7: Emissão evitada de CO ₂ com a injeção de gás natural na COSIPA em 1997.	85
Tabela 5.8: Parâmetros utilizados para o cálculo da receita e do custo com injeção de gás natural (GN) em alto forno, referentes às considerações feitas para o alto forno 1 da COSIPA em 1997.	87

Tabela 5.9: Parâmetros econômicos utilizados para o cálculo do valor presente líquido.	90
--	----

Nomenclatura

- Aciaria LD - Processo de obtenção de aço, a partir de ferro gusa, através da utilização de conversores a oxigênio. Nos conversores é soprado oxigênio sobre a superfície do banho metálico (ferro gusa líquido e sucata), de modo a permitir a redução do teor de carbono, silício, manganês, fósforo e enxofre, até atingir a composição desejada no aço.
- Escória – Produto obtido na etapa de redução em alto forno. Resulta da fusão do material inerte do minério (sílica e alumina), dos fundentes (calcário e dolomita) e das cinzas do coque, formando principalmente silicatos e aluminatos.
- FEA (Forno Elétrico a Arco) – Consiste no processo de produção de aço utilizando sucata em fornos elétricos.
- Forno Poço – Forno utilizado para aquecer uniformemente (sem levar ao superaquecimento) o aço proveniente do lingotamento convencional, para que seja, em seguida, debastado.
- Forno Siemens-Martin – Forno utilizado para produzir aço a partir de ferro gusa. Com o advento da Aciaria LD, onde podem ser obtidos melhores rendimentos, passaram a ser substituídos gradualmente. Atualmente são pouco utilizados, sendo responsáveis por 9% da produção mundial.
- Fundentes – São usados para retirar as impurezas do minério, permitindo a formação de uma escória fluida.
- Granulometria – Tamanho médio do material (em mm ou mesh).
- Lingotamento Contínuo – Processo a partir do qual o aço é vazado de maneira contínua em um equipamento especial, produzindo placas ou tarugos. Este processo vem substituindo parcialmente o lingotamento convencional, pois permite reduzir o consumo de energia evitando a utilização de fornos poço e debastadores.
- Lingotamento Convencional – Processo que permite vazar o aço em moldes, formando lingotes. Em seguida, esses lingotes são levados ao forno poço e ao debastador.

Metalurgia de Panela – Etapa do processo de produção de aço que permite o ajuste fino da temperatura e composição química, parâmetros de processo essenciais à obtenção de produtos nobres. É realizada entre a aciaria e o lingotamento.

Pelotização – Processo que permite aproveitar os finos de minério, que não podem ser alimentados diretamente no alto forno. O processo consiste em elevação do teor de ferro nos finos, aglomeração e queima. Como produto, obtém-se pelotas que, em função de sua uniformidade, alto teor de ferro e resistência mecânica, permitem aumentar a eficiência energética do forno.

Permeabilidade – Esse parâmetro permite quantificar a facilidade de escoamento dos gases. Quanto maior a permeabilidade, maior é o escoamento dos gases.

Produtores Independentes – Produzem apenas ferro gusa, não sendo classificados como usinas integradas. O ferro gusa produzido é vendido para outras usinas e exportado. Normalmente utilizam lenha de origem nativa para a produção de carvão vegetal.

Sínter – Produto do processo de sinterização, que se constitui basicamente de uma mistura de silicatos e cálcio-ferritas.

Sinterização – Processo que permite utilizar os finos de minério em alto forno através de um processo de semi-fusão, na presença de fundentes, coque e umidade, formando o sinter.

Temperatura de Sopro – Temperatura em que o ar aquecido, proveniente do regenerador, é soprado para dentro do alto forno pelas ventaneiras. Essa temperatura varia em torno de 1200 °C.

Temperatura de Chama – Temperatura com que os gases, provenientes da combustão no alto forno, saem da região próxima das ventaneiras.

Usina Integrada – Usina siderúrgica que realiza todas as três etapas da produção de aço: redução, refino e laminação. A ausência de qualquer uma dessas etapas classifica como semi-integrada ou não integrada.

Ventaneiras – Canal por onde o ar pré-aquecido é soprado para o interior do alto forno.

Capítulo 1

Introdução

Ao longo da história da humanidade, a energia tem sido considerada um fator importante de desenvolvimento. A urbanização, industrialização e crescimento populacional criaram novas demandas por serviços e energia, exercendo forte pressão sobre a utilização de recursos energéticos e levando à sua dependência (Jannuzzi, 1996).

Entretanto, a variação dos custos de muitos derivados de fontes de energia e a maior competitividade especialmente em alguns setores industriais energo-intensivos têm obrigado os países dependentes a limitarem seu consumo a níveis economicamente toleráveis. Como consequência, formas alternativas de energia vêm sendo pesquisadas, buscando, para cada processo industrial, aquela que tenha sua disponibilidade garantida a custos relativamente baixos e apresente maior eficiência energética possível (SMA, 1993).

Somado ao condicionamento econômico, tem surgido nos últimos anos, uma preocupação cada vez maior com o meio ambiente. Embora existam incertezas, muitos estudos levam a crer que as variações climáticas, vividas nas últimas décadas, estão intimamente relacionadas ao aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera (MCT, 1998). Tamanha preocupação levou à realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, em 1992, onde mais de 160 Estados assinaram a Convenção das Nações Unidas sobre Mudança Climática na “Cúpula da Terra” no Rio de Janeiro, Brasil. Pela Convenção, as partes reconhecem a mudança climática e seus efeitos adversos como uma

preocupação comum da humanidade e propõem a estabilização das emissões atmosféricas pelo uso de combustíveis fósseis (Houghton, 1994).

Dentre os gases que contribuem para a intensificação do efeito estufa, destaca-se o dióxido de carbono (CO₂), cujas altas taxas de emissão são decorrentes principalmente da produção e uso de energia. Esse padrão mundial de consumo, baseado na utilização (queima) de combustíveis fósseis e na perda da cobertura vegetal, vem acarretando um aumento significativo da concentração de CO₂ na atmosfera terrestre (Barker et al, 1995). Atualmente são emitidas cerca de 6 Gt de CO₂, uma quantidade muitas vezes superior à capacidade do ecossistema em promover sua reciclagem natural (Turkenburg, 1997). De acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC (IPCC, 1995), caso não sejam adotadas medidas restritivas, cerca de 25 Gt de CO₂ serão emitidas por volta do ano 2100.

A emissão de CO₂ *per capita* no Brasil é muito menor, em termos absolutos, que as emissões per capita dos países desenvolvidos, atualmente responsáveis por dois terços das emissões globais de CO₂. Em 1994, a emissão nacional de CO₂ decorrente do uso de combustíveis fósseis correspondeu a 4% da emissão, proveniente desses mesmos combustíveis, dos Estados Unidos, principal contribuinte das emissões mundiais de CO₂ atuais (UNFCCC, 1997; COPPE, 1997). O Brasil possui um índice quase três vezes menor que a média mundial de toneladas de carbono *per capita* emitida, estando abaixo de países como México e China (Jannuzzi, 1996). Em nível nacional, grande parte das emissões de CO₂, decorrentes do consumo de combustíveis fósseis, são originárias do Estado de São Paulo, que contribuiu com cerca de 30% do total emitido no país em 1994 (SMA, 1997).

Dentre os diversos segmentos industriais, o siderúrgico é considerado um dos maiores consumidores de energia. Em 1997, sua participação no consumo final total (energético e não energético) nacional atingiu 8%. A mesma importância é verificada no Estado de São Paulo, onde o segmento respondeu em 1996 por 14% do consumo final total. Essa expressiva participação do segmento siderúrgico se deve a sua expansão voltada para o mercado externo, que acarretou o aumento do consumo de energo-intensivos no setor industrial - nacional e do Estado de São Paulo - principalmente de coque de carvão metalúrgico (BEN, 1998). A característica energo-intensiva

do segmento siderúrgico, baseada no uso intensivo de combustíveis fósseis, acarreta o aumento de sua participação nas emissões de carbono nacional e do Estado de São Paulo, uma vez que, de acordo com dados do Inventário Nacional de Emissão de CO₂ - Abordagem “Top-down”, cerca de 93% do total de carbono introduzido, como coque de carvão metalúrgico, é emitido no processo de produção de aço bruto (COPPE, 1997).

1.1. Objetivos e Estruturação do Trabalho

O presente trabalho tem o objetivo de mostrar a importante participação do segmento siderúrgico no consumo energético e nas emissões de CO₂ nacionais e do Estado de São Paulo. Com base neste fato, analisa-se a injeção de combustível auxiliar em altos fornos como medida de conservação de energia e de redução das emissões de CO₂. A partir de um levantamento de campo realizado na ACESITA (Cia. Aços Especiais Itabira) e COSIPA (Cia. Siderúrgica Paulista), é quantificada a contribuição dessa medida para diminuir a emissão de CO₂. Além dos aspectos técnico e ambiental, são apresentadas estimativas de viabilidade econômica da injeção de gás natural em alto forno baseado em hipóteses e na literatura disponível.

O trabalho foi dividido em seis capítulos. No seguinte, Capítulo 2, foi realizada uma introdução sobre a mudança climática decorrente do aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera, onde foi mostrado o efeito estufa natural, o panorama histórico das conferências intergovernamentais até a última Conferência das Partes (COP-4) em Buenos Aires e as características das emissões mundiais dos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Neste mesmo capítulo se evidencia a importante participação do segmento siderúrgico no consumo energético e nas emissões de CO₂ nacional e do Estado de São Paulo. Esta conclusão é atingida através da análise dos Balanço Energético Nacional 1998 – ano base 1997; do Balanço Energético do Estado de São Paulo 1997 – ano base 1996; e dos inventários de emissão de CO₂ realizados em nível nacional e do Estado de São Paulo.

O Capítulo 3 trata da indústria siderúrgica mundial e nacional, onde são apresentadas a reestruturação da indústria siderúrgica mundial, as características da indústria siderúrgica nacional quanto à produção e consumo energético e o processo de produção de aço. O Capítulo 4 focaliza

a etapa de redução em alto forno, responsável pela maior parte do consumo energético de uma usina, e analisa a injeção de combustível auxiliar em alto forno como medida de conservação de energia e de potencial para redução de emissões de CO₂.

Para calcular o potencial de redução da emissão de CO₂ com a injeção de combustível auxiliar em alto forno no segmento siderúrgico, foi realizada a pesquisa de campo, conforme mencionado, nas usinas siderúrgicas ACESITA e COSIPA, onde essa medida já vem sendo praticada. O aspecto econômico de viabilidade também é abordado a partir de hipóteses e da literatura disponível. O Capítulo 5 mostra este estudo de casos.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e as recomendações para eventuais pesquisas sobre o potencial de redução de emissões a serem realizadas no segmento siderúrgico.

Capítulo 2

As Emissões do Segmento Siderúrgico no Contexto das Discussões sobre Mudanças Climáticas

A participação do segmento siderúrgico nas emissões de CO₂ nacional e do Estado de São Paulo é relevante, como será visto, e este capítulo apresenta as justificativas para a escolha desse segmento entre tantos outros do setor industrial. Inicialmente é feita uma introdução sobre a questão da mudança climática. Em seguida, são analisadas a participação do segmento siderúrgico no consumo energético nacional e do Estado de São Paulo e as informações obtidas nos inventários de emissão de CO₂ nacional e do Estado de São Paulo.

2.1. Mudança Climática

Entre as décadas de 70 e 90, uma sucessão de anos quentes e uma série de perturbações climáticas contribuíram para a crescente preocupação com o risco de aquecimento climático global. Embora existam incertezas com relação a essas mudanças, muitos estudos levam a crer que tais variações sejam consequência direta do aumento das concentrações dos gases do chamado “efeito estufa” na atmosfera.

Até o ano de 1992, os gases CO₂ e metano (CH₄) tiveram seus níveis de concentração na atmosfera aumentados em cerca de 30% e 145% respectivamente, quando comparados ao período anterior à Revolução Industrial (Gutman, 1998). Estudos realizados, utilizando modelos atmosféricos tridimensionais, indicam a possibilidade de elevação da temperatura média da

superfície terrestre em torno de 1,5 e 4,5°C, dentro de aproximadamente 50 a 80 anos (US Department of State, 1995).

2.1.1. Efeito Estufa

O efeito estufa é causado pela concentração, na atmosfera terrestre, de gases que absorvem e refletem de volta para a Terra, calor que deveria ser liberado para o espaço. A Figura 2.1 mostra seu esquema simplificado.

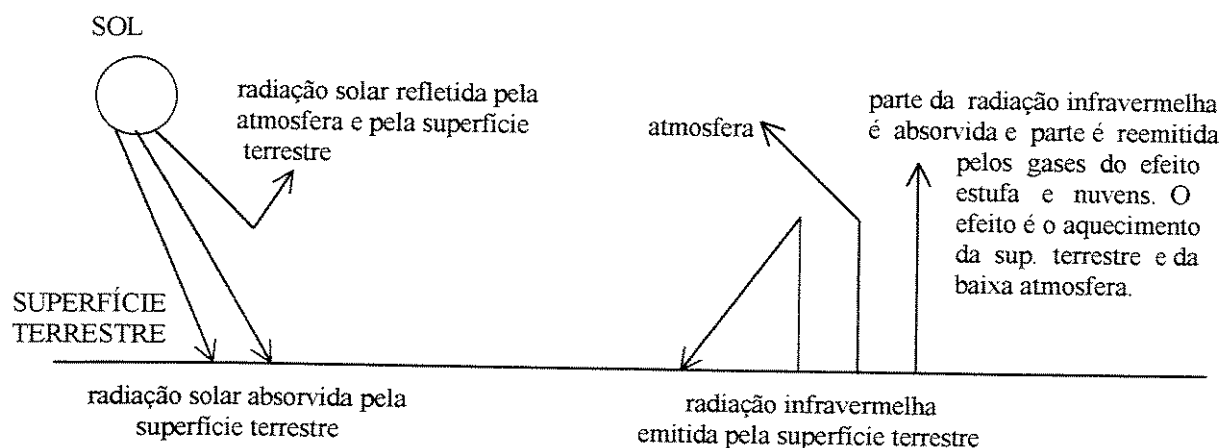


Figura 2.1: O efeito estufa.

Fonte: Szwarcfiter et al, 1996.

A Terra recebe do Sol uma energia composta de raios ultravioleta (9%), visível (43%) e infravermelho (48%). A maior parte dos raios ultravioleta fica retido na atmosfera pela camada de ozônio. Uma grande parte do infravermelho e quase todos os raios visíveis chegam à superfície do planeta. Parte da energia que chega à superfície terrestre (continentes, oceanos, geleiras e biosfera) é absorvida e aquece o planeta, enquanto que outra parte (parcela de raios infravermelhos) é reemitida para a atmosfera (como pode ser visto na Figura 2.1), que absorve aproximadamente 80% destes raios por intermédio do acúmulo de gases. O resultado é a formação de uma imensa “estufa”, que mantém a temperatura média do planeta em torno de 15°C, e não de -18°C que seria a temperatura normal sem o efeito estufa (Szwarcfiter et al, 1996). Esse efeito estufa natural, como é chamado, é extremamente benéfico pois sem ele não seria possível existir vida na Terra.

Os principais gases presentes na atmosfera que contribuem para o efeito estufa são vapor d'água, CO₂, monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), ozônio (O₃), óxidos de nitrogênio (NO_x) e os compostos clorofluorcarbonos (CFC). Apesar dos quatro últimos gases apresentarem um poder de absorção maior, o CO₂ vem causando maiores debates acerca da mudança climática devido ao aumento de sua concentração anual em torno de 0,4% (IPCC, 1990), participando com cerca de 50% da concentração total de gases do efeito estufa na atmosfera (Camargos, 1996).

Os gases do efeito estufa são gerados, em sua grande maioria, pelo consumo e geração de energia. O CO₂ e CO são formados principalmente pelo consumo de combustíveis fósseis nos setores de transportes e industrial. O CH₄ é gerado pela decomposição de matéria orgânica em represas, depósitos de lixo, entre outros. Segundo pesquisas, a maior parte das emissões é reciclada pela biosfera (ecossistemas florestais e outros) e pelos oceanos. Entretanto, o rápido crescimento da população mundial e das atividades econômicas tem proporcionado uma grande emissão de gases, que ultrapassa a possibilidade de absorção dos sistemas terrestres. Portanto, o excesso de carbono que é lançado na atmosfera e não consegue ser reciclado acentua o chamado “efeito estufa”, e está intimamente relacionado ao uso da energia pelo homem (Freitas, 1996).

2.1.2. Acordos Internacionais

Em 1898, o cientista sueco Svante Arrhenius já alertava o mundo para a possibilidade de aquecimento climático causado pela emissão de dióxido de carbono. Entretanto, foi só nos anos 70, deste século, que essa questão passou a ter maior reconhecimento. Em 1979, na Primeira Conferência Mundial sobre o Clima, foram discutidos os possíveis efeitos das mudanças climáticas nas atividades humanas, o que levou a publicação de uma declaração alertando os governos mundiais de que as ações antrópicas poderiam causar alterações no clima cujos efeitos seriam adversos ao bem-estar da humanidade (UNEP, 1998 a). A partir de então, uma série de conferências intergovernamentais sobre mudanças climáticas foram realizadas entre 1980 e 1990.

Em 1988, o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e a Organização Mundial Meteorológica (WMO) estabeleceram o Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), cuja função era avaliar o estado

de conhecimento sobre o sistema climático e sua mudança, seus impactos ambientais, econômicos e sociais e as estratégias a serem tomadas. Em 1990, o IPCC apresentou seu Primeiro Relatório de Avaliação, revisado e aprovado por centenas de cientistas, experts técnicos e representantes de governo, no qual foram confirmadas as evidências científicas sobre mudança climática (UNEP, 1998 b).

A Segunda Conferência Mundial sobre o Clima, realizada em 1990, promoveu discussões e negociações entre 137 Estados, além dos países integrantes da Comunidade Européia. A declaração final não especificou nenhum objetivo internacional para a redução da emissões. Entretanto, ela enfatizou e apoiou uma série de princípios que foram incluídos na Convenção de Mudança Climática. Entre eles, destaca-se a importância da equidade, da busca pelo desenvolvimento sustentável e as responsabilidades dos países em diferentes níveis de desenvolvimento.

Em junho de 1992, na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, mais de 160 Estados assinaram a Convenção das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC) na “Cúpula da Terra” no Rio de Janeiro, Brasil, reconhecendo a mudança climática e seus efeitos adversos como uma preocupação comum da humanidade (Houghton, 1994). Além dessa Convenção, resultaram da ECO-92, como ficou conhecida essa conferência, três outros acordos importantes: a Declaração do Rio, a Agenda 21 e a Convenção sobre Biodiversidade (UNEP, 1998 a).

O principal objetivo da Convenção Climática é a estabilização da concentração dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera em um nível que possa impedir interferências antrópicas perigosas ao sistema climático. Esse nível deve ser atingido dentro de um período de tempo suficiente para: permitir a adaptação natural dos ecossistemas às mudanças climáticas; garantir que a produção de alimentos não seja ameaçada; e permitir o desenvolvimento econômico de forma sustentável (UNEP, 1998 c).

A Convenção enfatiza que os países desenvolvidos, também conhecidos como Partes do Anexo 1 (englobando a maioria dos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento

Econômico – OECD - e alguns Estados da Europa Central e Oriental), são os principais responsáveis pelas emissões históricas e atuais, devendo tomar a iniciativa no combate à mudança do clima (Grubb, 1996). A prioridade primeira dos países em desenvolvimento deve ser o seu próprio desenvolvimento social e econômico e, por isso, sua parcela de emissões globais totais deve aumentar à medida em que eles se industrializam (UNEP, 1998 c).

Ao tornarem-se partes da Convenção, tanto os países desenvolvidos quanto os em desenvolvimento assumiram alguns compromissos, como por exemplo, submeter para apreciação as comunicações nacionais contendo inventários das emissões dos GEE por fontes e seus “sumidouros” nacionais (processos e atividades que absorvem GEE da atmosfera, em especial, florestas e oceanos); desenvolver programas nacionais para mitigação da mudança do clima e adaptação a seus efeitos; fortalecer a pesquisa científica e tecnológica e a observação sistemática do sistema climático e promover o desenvolvimento e difusão de tecnologias relevantes; promover programas educativos e de conscientização pública sobre mudança do clima e seus efeitos prováveis (MCT, 1998).

Aos países desenvolvidos cabem também outros compromissos, como adotar políticas destinadas a limitar suas emissões de GEE e proteger e aumentar os “sumidouros” desses gases; transferir recursos tecnológicos e financeiros para países em desenvolvimento, e apoiar os esforços desses países no cumprimento de suas obrigações sob a Convenção; ajudar países em desenvolvimento que sejam particularmente vulneráveis aos efeitos adversos da mudança do clima para fazer frente aos custos de adaptação (MCT, 1998).

Para promover a transferência de recursos financeiros aos países em desenvolvimento, foi estabelecido o Fundo para o Meio Ambiente (Global Environment Facility - GEF). O GEF é o mecanismo de financiamento que outorga doações e concede fundos, de países ricos doadores, em condições concessionais para países receptores de renda média e baixa. Essas doações são destinadas ao adiantamento de projetos e atividades visando a proteção do ambiente global nas áreas de mudança climática, biodiversidade e águas internacionais (Viola, 1997).

A Convenção foi ratificada em dezembro de 1993 e passou a vigorar em março de 1994. A partir de setembro do mesmo ano, os países desenvolvidos começaram a apresentar suas comunicações nacionais e estratégias para reduzir as emissões e concentrações de GEE. Em fevereiro de 1995, ficou decidido que a Conferência das Partes (COP) se tornaria a maior autoridade da Convenção (UNEP, 1998 a). Sua função é promover e revisar os compromissos assumidos pelas Partes para atender o objetivo principal da Convenção (UNEP, 1998 d).

A COP-1 ocorreu no período de 28 de março à 7 de abril de 1995, em Berlim, Alemanha, reunindo delegações de 118 Partes, centenas de organizações intergovernamentais (IGOs), organizações não-governamentais (NGOs) e a imprensa. A Convenção queria que a COP-1 revisasse o compromisso dos países desenvolvidos em reduzir suas emissões aos níveis (ou abaixo) de 1990 até o ano 2000 (UNEP, 1998 d).

Depois de alguns debates, as Partes chegaram à conclusão de que algumas ações especificadas no documento original da Convenção Climática eram inadequadas para tratar do aumento das emissões dos GEE e da ameaça de mudança climática global. Assim, foi estabelecido o Ad hoc Group on the Berlim Mandate (AGBM), que seria responsável pela elaboração de um protocolo ou outro instrumento legal, para ser adotado na COP-3 em 1997, quantificando os limites e as reduções das emissões de GEE das Partes (EIA, 1998). Além disso, a COP-1 decidiu que o GEF continuaria a operar como mecanismo financeiro da Convenção por mais quatro anos e iniciou a fase piloto das atividades de implementação conjunta. Nesta fase inicial, qualquer país poderia participar, porém o país investidor não poderá contabilizar os créditos da redução das emissões do país receptor (UNEP, 1998 d).

Em abril de 1996, o IPCC publicou o Segundo Relatório de Avaliação, escrito e revisado por cerca de 2.000 cientistas mundiais, no qual foram confirmadas as evidências da influência humana no clima global e, principalmente, a viabilidade de estratégias de custo efetivo para combater a mudança climática (World Bank, 1998). Neste mesmo ano, foi realizada a Segunda Conferência das Partes (COP-2), em Genebra entre 8 e 19 de julho, onde foi aprovado o Segundo Relatório do IPCC e definido o formato da primeira comunicação nacional dos países em desenvolvimento, a ser submetida à Convenção a partir de abril de 1997 (UNEP, 1998 e).

A revisão da comunicação nacional submetida à Convenção, realizada em 1996, revelou que a emissão mundial de CO₂ continuava aumentando a cada ano. Os países desenvolvidos, que haviam firmado inicialmente o compromisso de estabilizar as emissões de CO₂ aos níveis (ou abaixo) de 1990 até o ano 2000, continuavam sendo responsáveis pela maior parte das emissões globais. Dos nove países da OECD, com emissões superiores à 50 Mt¹ de carbono em 1990, apenas dois pareceram capazes de conseguir atingir aquele objetivo: Reino Unido e Alemanha. (UNFCCC, 1997). A Figura 2.2 mostra as emissões desses nove países, entre 1991-95, considerando-as valores percentuais relativos a 1990=100.

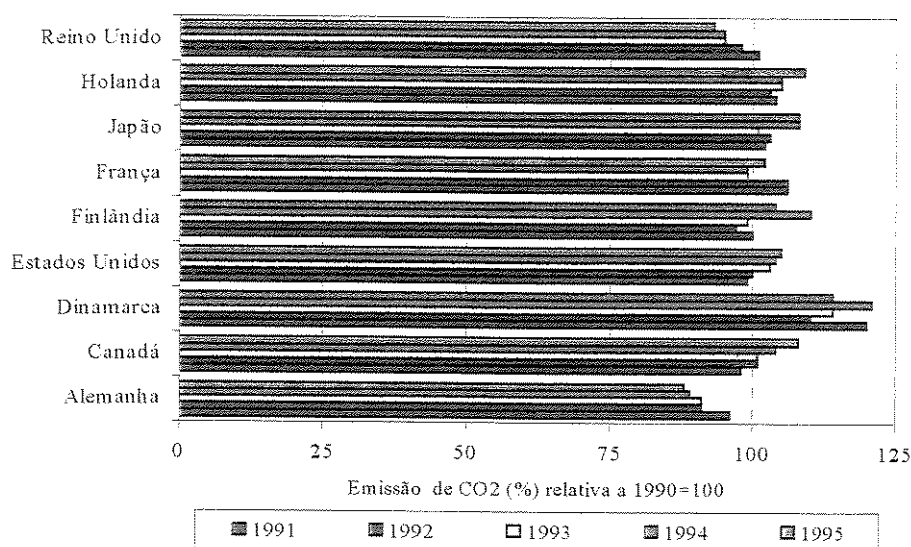


Figura 2.2: Emissões antrópicas de CO₂, excluindo as mudanças no uso do solo e florestas.
Fonte: UNFCCC, 1997.

Muito se esperava da Terceira Conferência das Partes, COP-3, realizada em Kioto, Japão, entre 1 e 12 de dezembro de 1997, pois seu objetivo principal era definir, de acordo com todas as Partes e com os princípios da Convenção, os níveis de redução de emissão dos GEE para o período após o ano 2000. Algumas propostas foram levadas pelas Partes e depois de muitos debates chegou-se ao histórico acordo. Através do Protocolo de Kioto, ficou estabelecido que os países industrializados, conhecidos como países do Anexo 1, deverão reduzir suas emissões médias nacionais em pelo menos 5% abaixo dos níveis de 1990 durante o período 2008-2012 (Kopp, 1998). Os Estados Unidos prometeram reduzir suas emissões em cerca de 7%, um pouco

¹ 1Mt = 10³ Gg

menos que a União Européia (8%) e um pouco mais que o Japão (6%). Além disso, o Protocolo permite que alguns países desenvolvidos aumentem modestamente suas emissões e cria cláusulas especiais aos membros do Bloco Soviético (Fletcher, 1998). Aos países em desenvolvimento, não é exigido nenhum limite às emissões de GEE.

Apesar de o Protocolo de Kioto ter definido os limites das reduções das emissões dos países do Anexo 1, faltaram as definições de algumas questões importantes. Por isso, a COP-4, que foi realizada entre 2 e 13 de novembro em Buenos Aires, Argentina, tinha como um dos principais objetivos examinar e finalizar as questões ainda indefinidas do Protocolo de Kioto (UNFCCC, 1998).

Entretanto, após difíceis negociações, as Partes decidiram adotar um plano de trabalho para a regulamentação dos mecanismos de flexibilização do Protocolo de Kioto. Esse plano de trabalho, chamado de “Agenda 2000”, especifica as medidas, regras e objetivos que devem ser desenvolvidos até o final do ano 2000, para que os mecanismos sejam postos em prática após a realização da VI Conferência sobre o Clima (COP-6) (El País, 1998). Os principais mecanismos são: o comércio de emissões, que permite aos membros do Anexo 1 do protocolo diminuir seus compromissos ao comprar certificados de emissões de outros países ²; e o mecanismo de desenvolvimento limpo (CDM), criado por proposta brasileira, que autoriza os países desenvolvidos a reduzir suas metas de corte se financiarem projetos para diminuir emissões dos países em desenvolvimento (O Globo, 1998).

Esses mecanismos de flexibilização são considerados fundamentais para permitir a entrada em vigor do Protocolo de Kioto, já que muitos países garantem que só ratificarão o documento após a regulamentação desses pontos (O Globo, 1998).

² Existe a preocupação de que alguns países sejam capazes de alcançar suas metas, com esforço mínimo, e vendam a outros um grande volume de excedente de créditos de emissões. Isto acabaria reduzindo a pressão para que alguns países desenvolvidos reduzissem suas emissões nacionais.

2.1.3. Emissão Mundial de CO₂

Atualmente a emissão mundial de CO₂ chega a cerca de 6 Gt³ ao ano (Turkenburg, 1997). Cientistas calculam que, mantidas as tendências atuais, a concentração de CO₂ e de outros gases causadores do efeito estufa equivaleria, já na década de 2030, ao dobro dos níveis de CO₂ da era pré-industrial, o que poderia ocasionar variações climáticas sérias (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1991).

Essas emissões estão relacionadas ao consumo de combustíveis fósseis em três atividades principais: geração de energia elétrica e atividades nos setores de transportes e industrial. Menos de 30% das emissões globais de CO₂ são decorrentes da produção de eletricidade em centrais térmicas, enquanto que quase dois terços provém dos setores industrial e de transportes (Jannuzzi, 1996).

Tal característica pode ser observada nos países desenvolvidos, principais responsáveis pelos atuais níveis de concentração de CO₂ na atmosfera terrestre. Com exceção de alguns países que possuem geração nuclear de eletricidade ou hidrelétricas, como França e Suécia respectivamente, o quadro é bastante similar.

Já os países em desenvolvimento vêm aumentando sua participação na demanda mundial de energia primária, e, a continuar assim, poderão consumir tanto quanto os países da OCDE já no ano 2010 (Jannuzzi, 1989). Estatísticas mostram que há uma tendência dos países desenvolvidos em concentrar seu desenvolvimento econômico em serviços tecnológicos, altas tecnologias industriais, sistemas computacionais e software (Bending & Cattell, 1987); enquanto importam aço, alumínio e outros materiais energo-intensivos de países em desenvolvimento - Divisão Internacional do Trabalho. A importação desses produtos acaba escondendo o real consumo energético direto dos países desenvolvidos, aumentando o consumo e, conseqüentemente, as emissões dos países em desenvolvimento (Tolmasquin, 1996).

³ 1 Gt = 10⁶ Gg.

Entretanto, no período de 1990-91 e 1995-96, quatorze países em desenvolvimento, que contribuem com 25% das emissões globais de carbono provenientes do setor industrial, tiveram uma redução de 45% dos subsídios domésticos aos combustíveis fósseis (de US\$ 60 bilhões para US\$ 33 bilhões) (Reid & Goldemberg, 1997). Durante esse mesmo período, os subsídios dos países desenvolvidos declinaram cerca de 20%, de US\$ 12,5 bilhões para US\$ 9,9 bilhões (Reid & Goldemberg, 1997). Tal redução levou a um aumento do preço do combustível aos consumidores e diminuição das taxas de crescimento do consumo e das emissões de carbono, tanto nos países em desenvolvimento como nos países desenvolvidos.

Pela Tabela 2.1 pode-se observar a redução das emissões de carbono em decorrência das reformas dos preços dos combustíveis fósseis. Desde 1990, os seis países em desenvolvimento listados conseguiram evitar cerca de 46 Mt de carbono, representando 9% da emissão global de 1992 (Reid & Goldemberg, 1997). Essas estimativas podem ser até maiores, porque muitas informações sobre o impacto das alterações de preço do carvão mineral, usado na China neste período, não estavam disponíveis.

Tabela 2.1: Estimativa das emissões evitadas de carbono decorrentes da diminuição dos subsídios aos combustíveis fósseis.

Fontes e Países	Emissão de 1992 (10 ³ t de carbono)	Mudança real do preço (%)	Intervalo de tempo	Elasticidade da demanda	Redução da emissão (%)	Redução da emissão (10 ³ t de carbono)
Carvão mineral						
Índia	150.627	106	1990-94	0,60	4	5.594
África do Sul	65.267	119	1991-94	0,60	10	6.360
Produtos do petróleo						
Brasil	41.892	122	1991-95	0,50	10	3.989
China	108.704	221	1991-94	0,25	18	19.541
Índia	44.032	102	1990-95	0,60	1	397
México	68.532	138	1990-95	0,30	9	6.311
Arábia Saudita	33.948	150	1990-95	0,30	12	3.933
TOTAL (sem China)	404.298					26.584
TOTAL (com China)	513.002					46.125

Fonte: Reid & Goldemberg, 1997.

Muitos pesquisadores consideram que a maior parte do aumento das emissões dos países em desenvolvimento resultam da provisão de necessidades humanas básicas para o crescimento populacional, enquanto que os países desenvolvidos contribuem com o aumento de emissões devido ao padrão de vida muito acima da média mundial (Reid & Goldemberg, 1997). Entretanto, em muitos países em desenvolvimento, a maior parte do consumo de energia fóssil é realizada pelas elites, que representam de 10 a 15% da população, de um terço a metade da renda nacional e possuem padrões de consumo semelhantes aos dos países desenvolvidos (Jannuzzi, 1989).

Além do uso intensivo de combustíveis fósseis, o desflorestamento e uso da terra são contribuições significantes para o aumento das emissões de CO₂ em muitos países em desenvolvimento e menos desenvolvidos, principalmente aquelas provenientes da queima da lenha. Estimativas variam de 20 a 40% como sendo a contribuição mundial anual de CO₂ liberado devido a queima de matéria vegetal (Jannuzzi, 1989). Grande parte dessa lenha é consumida como combustível para cocção e em muitos países, como por exemplo Nepal e Etiópia, essa atividade tem dizimado florestas nativas.

2.2. Consumo Energético

As emissões de CO₂ provenientes do uso de combustíveis fósseis para produção e utilização de energia estão associadas às características do balanço energético de cada país. Para melhor situar a posição do Brasil e do Estado de São Paulo analisam-se a seguir os dados dos respectivos balanços energéticos. A partir dessa análise observa-se a importante participação do segmento siderúrgico no consumo energético e, conseqüentemente, nas emissões de CO₂ nacional e do Estado de São Paulo.

2.2.1. Brasil

O Brasil é um país com aproximadamente 157 milhões de habitantes, dos quais cerca de 75% viviam nos centros urbanos em 1991 (IBGE, 1994). O consumo final de energia em 1997 foi de 221.778×10^3 tEP, crescendo 6,1% em relação ao ano anterior (BEN, 1998).

2.2.1.1. Balanço Energético Nacional

O Balanço Energético Nacional mostra a estrutura de produção, importação, exportação de fontes de energia primária, providas da natureza na sua forma direta; e de energia secundária, produzidas a partir do consumo (transformação) das energias primárias nos Centros de Transformação. As fontes de energia primária renováveis são as mais utilizadas, representando 58% do consumo total em 1997. Dentre essas fontes, a energia hidráulica é a mais consumida, seguida pelos produtos da cana-de-açúcar (caldo, melaço e bagaço) e pela lenha. Já as fontes de energia primária não renováveis contribuíram com 42% do consumo total no mesmo ano, destacando-se o consumo predominante de petróleo (BEN, 1998). A estrutura de consumo final total de fontes primárias em 1997 está representado na Figura 2.3.

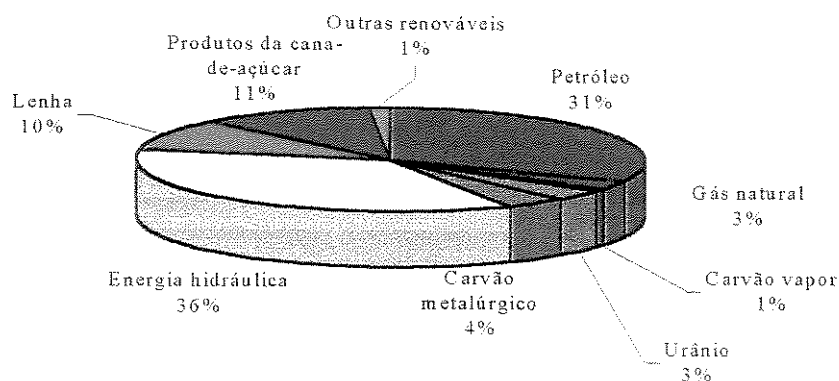


Figura 2.3: Consumo total de fontes primárias em 1997.
Fonte: BEN, 1998.

Depois de passar por um período de estagnação entre 1970-79, a produção e transformação de energia passou a crescer acentuadamente a partir do segundo choque do preço do petróleo. A política de redução da dependência externa de energia estimulou a extração das reservas de petróleo nacional, que evoluiu e se manteve em níveis superiores a dez anos de produção, acompanhadas pela produção de gás natural (passando de 1,9 a 9,9 bilhões de m³ entre 1979-97). As importações líquidas de petróleo e seus derivados caíram de quase um milhão de barris equivalentes de petróleo por dia (bep/dia) para 420 mil bep/dia no período de 1979-85 (BEN, 1998). Em 1986, com a volta dos preços do petróleo aos níveis de 1978, as importações voltaram a crescer, atingindo em 1997 cerca de 763 mil bep/dia (BEN, 1998).

A capacidade de refino em dezembro de 1997 era de 1,8 milhões de barris/dia. A participação dos derivados de petróleo no consumo final de energia foi de 33% em 1970 e atualmente encontra-se no patamar de 35%.

O carvão mineral (reservas medidas e indicadas de 10,1 bilhões de toneladas), o urânio (usado em apenas uma central nucleoeletrica de 657 MW – Usina de Angra dos Reis) e o gás natural são recursos energéticos pouco usados na matriz energética brasileira. A utilização de carvão mineral como fonte térmica foi estimulada a partir de 1975, contribuindo para a substituição de óleo combustível na indústria, principalmente no setor cimenteiro. Atualmente, o setor de carvão mineral está privatizado e compete em condições de mercado com os demais energéticos. O uso de carvão mineral metalúrgico (99% importado) acompanhou a expansão da produção de aço (BEN, 1998).

A geração hidráulica participou com 91% da demanda de eletricidade do setor elétrico (que quintuplicou sua capacidade instalada no período 1970-97) e os outros 9% foram decorrentes da geração térmica e nuclear em 1997. A participação da eletricidade no consumo final de energia passou de 16% em 1970 para 39% em 1997 (BEN, 1998).

Os produtos da cana-de-açúcar (caldo, melaço e bagaço) vêm sendo amplamente utilizados nos diversos setores da economia. O Programa do Álcool, criado em 1975, representou o esforço de maior êxito no desenvolvimento de fontes alternativas renováveis para substituir os derivados de petróleo. A partir desse programa, iniciou-se a utilização de álcool adicionado à gasolina (álcool etílico anidro) e de álcool puro (álcool etílico hidratado). Estima-se que em 1995, cerca de 4,3 milhões de veículos utilizaram exclusivamente álcool como combustível (Uria & Schaeffer, 1997). O volume de vendas de veículos novos a álcool em 1997 ficou abaixo do montante de carros sucateados, o que provocou a redução e envelhecimento da frota que atualmente é da ordem de 3,7 milhões de veículos a álcool (BEN, 1998). Com isso, o consumo de álcool hidratado decresceu 8,7% em 1997. Entre as outras fontes, vem sendo observado também o aumento do consumo de bagaço de cana no setor energético, que passou de 32 % em 1982 a 49% em 1997 (BEN, 1998).

2.2.1.2. Consumo Energético Setorial

A participação percentual de cada setor no consumo total de energia se manteve relativamente constante entre 1990-97. Pode-se observar, através da Figura 2.4, a maior contribuição do setor industrial no consumo, seguido pelo setor de transportes e residencial.

A crescente participação de energo-intensivos no setor industrial (principalmente nos segmentos cimenteiro, ferro gusa e aço e químico) de 45% em 1979 para 62% em 1992, foi decorrente, em grande parte, pela expansão do segmento metalúrgico voltada para o mercado externo (as exportações de aço, ferro-ligas e alumínio passaram de 2,3 a 13 milhões de toneladas entre 1980-92). De 1992 em diante o mercado interno absorveu parte das exportações, refletindo positivamente na redução da participação dos energo-intensivos no consumo do setor, de 62% para 59%, em 1997.

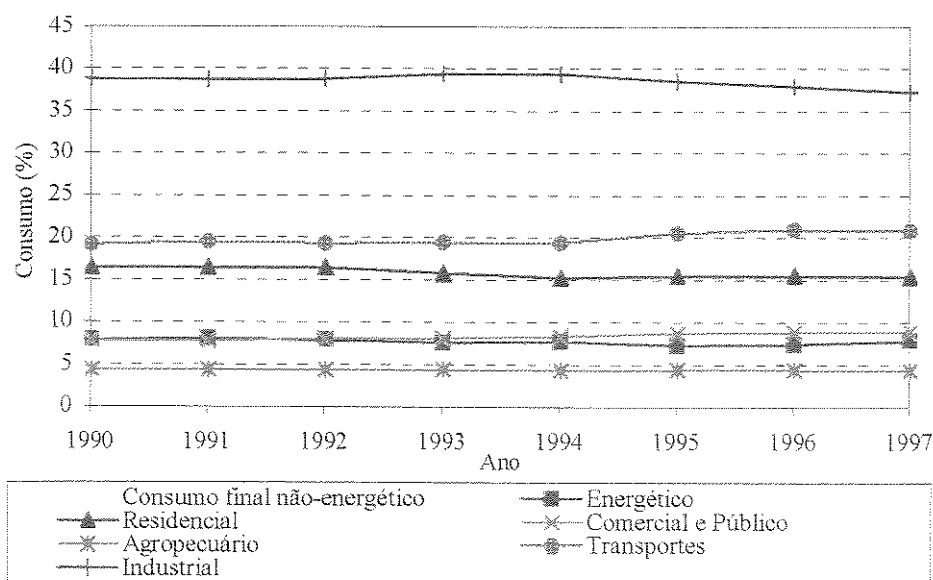


Figura 2.4: Evolução do consumo final de energia no Brasil, por setores, entre 1990-1997.
Fonte: BEN, 1998.

Dentro do segmento metalúrgico, o segmento siderúrgico de produção de ferro gusa e aço é o que mais consome energia, respondendo por quase 8% do consumo final total (energético e não-energético) e 20% do consumo industrial nacional de 1997 (BEN, 1998), como mostra a Figura 2.5.

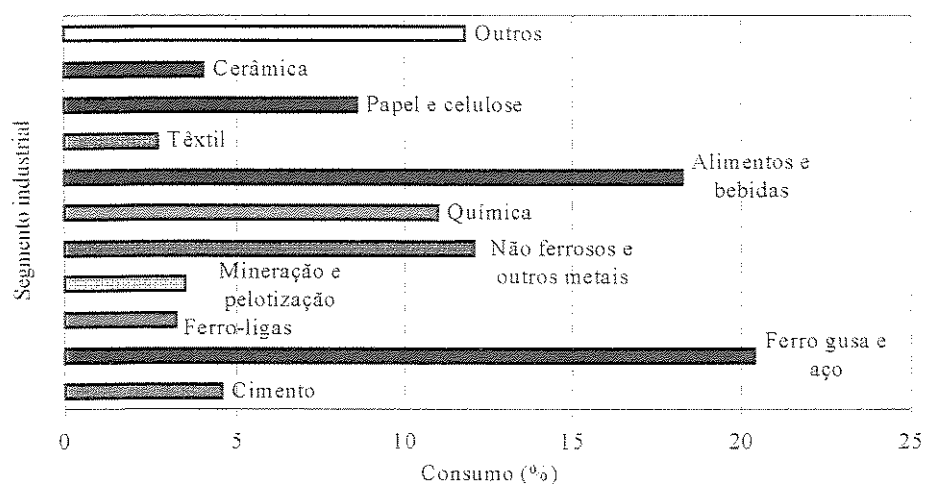


Figura 2.5: Consumo energético do setor industrial nacional em 1997.
Fonte: BEN, 1998.

O consumo energético do segmento ferro gusa e aço, em 1997, pode ser observado na Figura 2.6. Apesar de o consumo de coque de carvão mineral ter reduzido 1,4 pontos percentuais no consumo total energético do segmento, comparado a 1996, ainda observa-se o predomínio de usinas integradas a coque na produção nacional de aço. Essa redução ocorreu em função do aumento da participação de outras fontes (carvão mineral, óleo diesel, GLP, nafta, querosene, gás canalizado, alcatrão e outras fontes secundárias do petróleo), principalmente carvão mineral e alcatrão e outras fontes secundárias de petróleo. A descrição detalhada do consumo energético do segmento siderúrgico é apresentada no Capítulo 3.

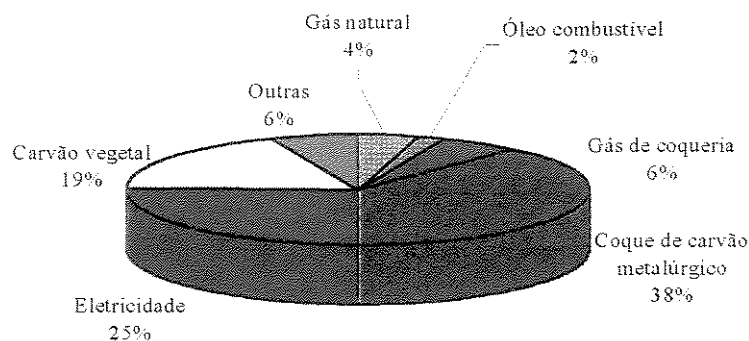


Figura 2.6: Consumo energético do segmento ferro gusa e aço em 1997.
Fonte: BEN, 1998.

2.2.2. Estado de São Paulo

A região sudeste é responsável pela maior parte do consumo final energético nacional, representando quase 60%. Dentre os quatro estados desta região, destaca-se o Estado de São Paulo, com uma participação de 31% do consumo total do país em 1996 (BEESP, 1997). Da mesma forma que em nível nacional, analisa-se o balanço energético do Estado de São Paulo para explicar sua participação na emissão nacional de CO₂.

2.2.2.1. Balanço Energético do Estado de São Paulo

A análise do consumo energético por fonte a partir de 1982 evidencia a grande alteração estrutural na matriz energética estadual, com o deslocamento dos derivados de petróleo pela biomassa e, em menor escala, pela eletricidade. A Figura 2.7 representa a estrutura de consumo para os anos de 1970, 1980, 1985, 1996 (BEESP, 1997).

No início da reestruturação da matriz energética, após o segundo choque do petróleo, a parcela relativa desse energético diminuiu para 62% em 1980 e para 47% em 1985, auge do ajuste estrutural. Nessa ocasião, o incentivo ao desenvolvimento de tecnologias utilizando fontes alternativas fez com que a biomassa atingisse a participação de 25%, a eletricidade 17% e os outros energéticos 11% (gás natural, carvão vapor, outras fontes primárias, gás de coqueria, coque de carvão metalúrgico, produtos não energéticos da cana, e outras secundárias), estrutura essa que se mantém relativamente estável desde então. Em 1996, a biomassa recuou para 22%, dando espaço para outras formas de energia, principalmente o gás natural. A eletricidade e os derivados de petróleo apresentaram participações estáveis de 17% e 47%, respectivamente, entre 1985 e 1996 (BEESP, 1997).

Apesar do Estado de São Paulo não possuir reservas conhecidas de petróleo, existe uma grande capacidade instalada de refinarias desse energético. Em 1996, 66% do petróleo processado nas refinarias paulistas era nacional, enquanto que 34% era importado, excedendo cerca de 7 pontos percentuais em relação ao ano anterior (BEESP, 1997).

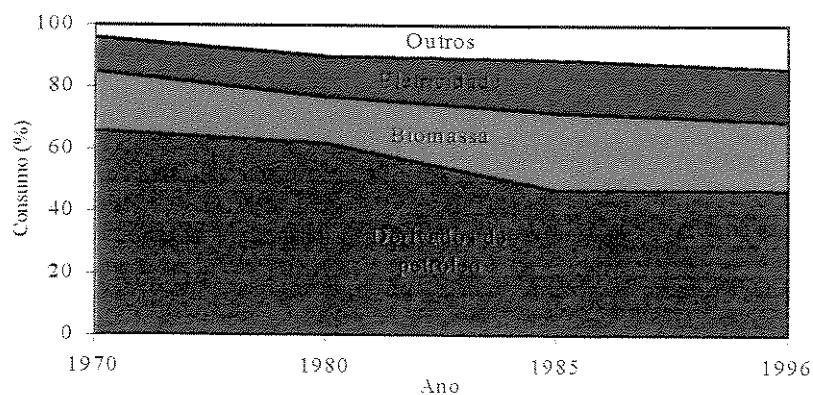


Figura 2.7: Estrutura de consumo de energia em São Paulo por fonte energética.
Fonte: BEESP, 1997.

2.2.2.2. Consumo Energético Setorial

Do ponto de vista do consumo setorial, o peso do consumo energético de cada setor varia proporcionalmente à sua importância econômica no contexto nacional. A Figura 2.8 mostra a evolução do consumo energético por setores da economia no Estado de São Paulo entre 1990-96. Observa-se a enorme importância do setor industrial, em primeiro plano, e do setor de transportes, em segundo plano, ambos bem superiores ao consumo dos demais setores, inclusive o residencial.

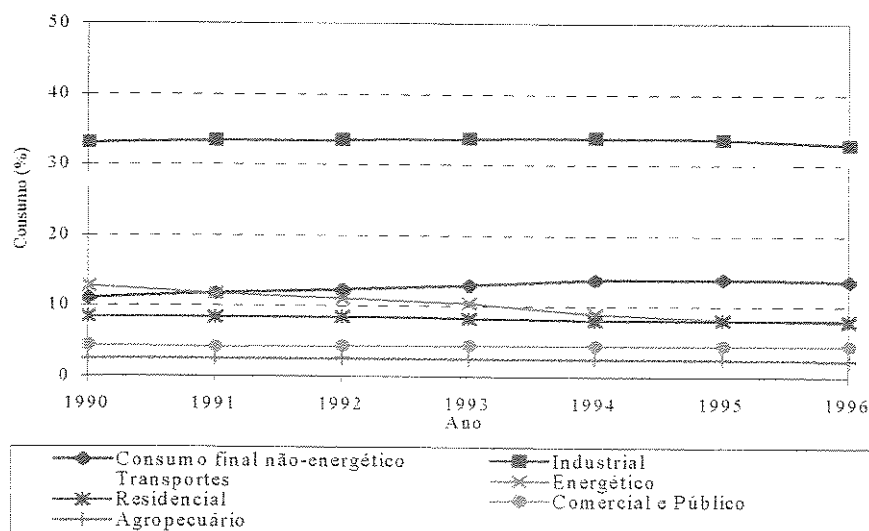


Figura 2.8: Evolução do consumo final total do Estado de São Paulo por setores.
Fonte: BEESP, 1997.

De acordo com o Balanço Energético do Estado de São Paulo (BEESP, 1997), dentre os diversos segmentos do setor industrial, destaca-se o elevado consumo energético das indústrias de alimentos e bebidas e ferro gusa e aço, visto na Figura 2.9. A indústria de alimentos e bebidas contribuiu, em 1996, com 34% do consumo total industrial, onde destaca-se o aumento de consumo de bagaço de cana, tornando o principal energético consumido no setor industrial paulista no mesmo ano.

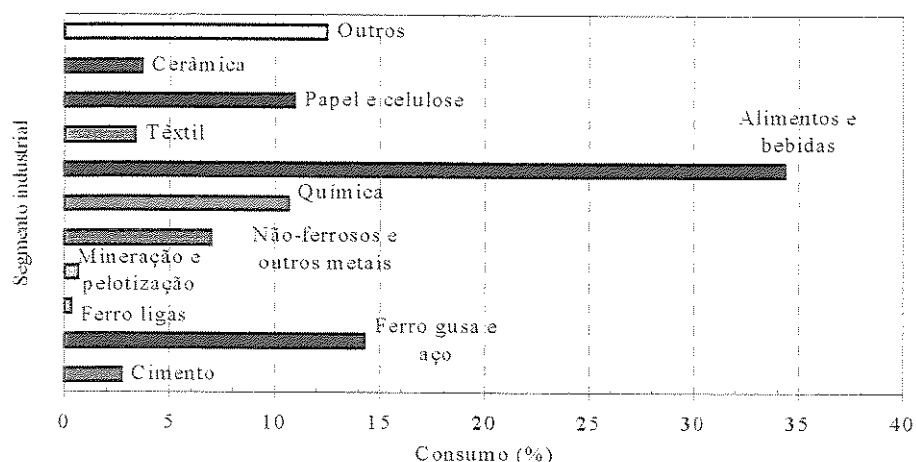


Figura 2.9: Consumo energético do setor industrial do Estado de São Paulo em 1996.
Fonte: BEESP, 1997.

O segmento de ferro gusa e aço foi responsável por 14% do consumo total do setor industrial em 1996 (BEESP, 1997). O principal energético consumido foi o coque de carvão metalúrgico, que além da função térmica, é utilizado como redutor (fonte de carbono) na produção de ferro gusa. O alto consumo desse energético, apresentado na Figura 2.10, representa a predominância de usinas integradas a coque na produção estadual de ferro gusa. As fontes energéticas definidas como outras são: carvão vapor, lenha, outras primárias, óleo diesel, GLP, querosene e carvão vegetal. Maiores informações sobre o consumo energético deste segmento é apresentado no Capítulo 3.

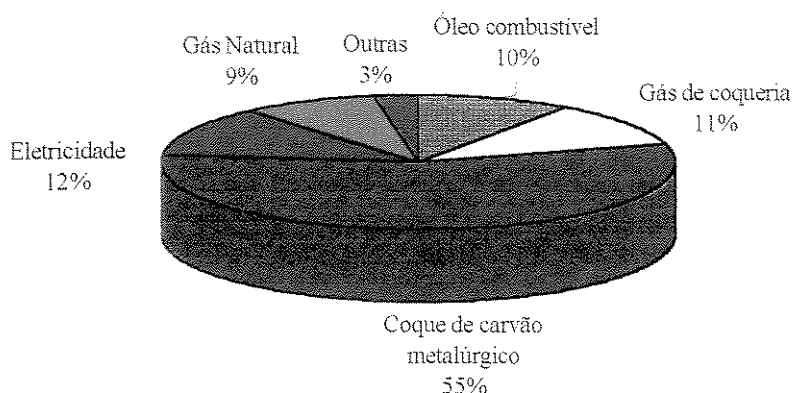


Figura 2.10: Consumo energético do segmento ferro gusa e aço paulista em 1996.

Fonte: BEESP, 1997.

2.3. Emissão de CO₂

Nesta seção apresentam-se os trabalhos, já realizados, contabilizando as emissões de CO₂ nacional e do Estado de São Paulo. A partir dos inventários de emissão do sistema energético, pode-se observar a relevante contribuição do segmento siderúrgico em âmbito nacional e do Estado de São Paulo.

2.3.1. Emissão Nacional de CO₂

A maior parte das emissões de CO₂ no Brasil são decorrentes de alterações do uso do solo na Amazônia, representando cerca de 80% das emissões antrópicas; enquanto que o restante das emissões deve-se à utilização de combustíveis fósseis para geração de energia (Szwarcfiter et al, 1996).

O desflorestamento da Amazônia tem sido associado à ocupação de novas áreas para a implantação de infra-estrutura institucional (administrativo e financeiro) e operacional (auto-estradas, portos e ferrovias); e de grandes projetos agropecuários, geração de energia e exportação (Freitas, 1996). Essa desastrosa ocupação, implementada a partir do início dos anos 70, é responsável por mais de 75% da alteração total de sua cobertura florestal.

Estimativas das emissões da Amazônia brasileira foram avaliadas entre 0,29 a 0,41 Gt de carbono por ano (Reis & Guzman, 1992), o que correspondia a cerca de 5 a 7% (INPE, 1989) das emissões antrópicas globais médias dos anos 80. A Tabela 2.2 mostra as emissões de CO₂ decorrentes das mudanças de uso do solo e da biomassa na Amazônia brasileira.

Tabela 2.2: Mudanças de uso do solo e biomassa da Amazônia brasileira e suas respectivas emissões de CO₂.

Ano	Superfície desmatada acumulada (km ²)	% da Amazônia Legal	Desflorestamento anual (km ² /ano)	Emissões de CO ₂ /ano (Gt/ano)	% das emissões antrópicas de CO ₂ do uso do solo e da biomassa nos trópicos	% das emissões mundiais antrópicas de CO ₂
Antes de 1960	97.600	1,99	-	-	-	-
1978	152.200	3,10	-	-	-	-
1988	377.600	7,70	26.000	0,36 - 0,48	23,0 - 30,0	4,7 - 6,3
1989	401.433	8,18	17.860	0,25 - 0,36	15,6 - 22,5	3,3 - 4,7
1990	415.251	8,46	13.810	0,19 - 0,27	11,9 - 16,9	2,5 - 3,5
1991	426.400	8,69	11.130	0,15 - 0,22	9,4 - 13,7	2,0 - 2,9

Fonte: Freitas, 1996.

O INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, apresentou as estimativas do desflorestamento da Amazônia Legal referentes aos anos de 1995, 1996 e valores preliminares de 1997. As estimativas revelam que ocorreu um grande salto na taxa de desflorestamento em 1995 para 29.059 km²/ano, representando quase o dobro da taxa do período de 1992-1994 que correspondeu a 14.896 km²/ano. A taxa de desflorestamento em 1996 foi de 18.161 km²/ano e as estimativas preliminares mostram que a taxa de 1997 será de cerca de 13.000 km²/ano (INPE, 1998), o que deverá representar uma emissão de CO₂ em torno da verificada em 1990 (0,19-0,27 GtCO₂), como se observa na Tabela 2.2.

Segundo Fearnside (1998), a redução da taxa de desflorestamento de 1987 a 1991 pode ser explicada pela recessão econômica vivida no Brasil no período em questão. O pico apresentado em 1995 deve-se, em sua maior parte, ao reflexo da recuperação da economia nacional com o

Plano Real, que permitiu a injeção de recursos financeiros que alimentaram novos desflorestamentos⁴. A queda da taxa verificada em 1996 e prevista em 1997 pode estar associada à ação do governo, através de medidas de restrição, como a medida provisória 1511 (que reduziu a área de corte raso de 50% para 20% das propriedades na Amazônia) e medidas de fiscalização, como a Operação Macauã (que em 1997 alcançou resultados recordes de apreensões e multas) (INPE, 1998).

O uso de energia no Brasil tem contribuído levemente para a intensificação do efeito estufa. Cerca de 73 Mt de carbono foram emitidas em 1990, correspondendo a cerca de 1% das emissões globais totais, considerando apenas as emissões de CO₂ (Rosa, 1996). A relativamente baixa contribuição do uso de energia comparada ao desflorestamento, pode ser explicada pela larga difusão de fontes renováveis, como a hidreletricidade e a biomassa, no balanço energético brasileiro.

O Brasil possui um parque de geração hidrelétrica considerável que corresponde a mais de 92% da geração de energia elétrica nacional. Entretanto, apesar da geração hidrelétrica ser considerada uma forma mais limpa de energia, comparada à geração utilizando combustíveis fósseis, estudos recentes vêm mostrando que os reservatórios das hidrelétricas contribuem para o aumento de emissão de gases do efeito estufa, notadamente o CH₄. Esta emissão ocorre devido a decomposição de material orgânico que fica submerso após o alagamento do reservatório. Apesar de não se saber ao certo o quanto esta contribuição representa para o Brasil, pode-se afirmar que estas emissões, em geral, não se comparam àquelas derivadas da geração termelétrica ao longo do tempo (Rosa, 1996).

As emissões nacionais entre 1970-90 cresceram cerca de 85%, de 39 a 73 Mt de carbono. Em 1970, de acordo com a Figura 2.11, os setores industrial e de transportes contribuíram com a maior parte das emissões, 30% e 28% respectivamente, correspondendo a quase 60% do total emitido (Rosa et al, 1990). Em seguida vieram o setor residencial (16%) e o agropecuário (15%).

⁴ Os investimentos permitiram a expansão da agricultura (incentivada pela redução do valor da terra e disponibilização de tecnologia e demanda de mercado), o aumento do consumo de alimentos básicos (pressionado pela migração rural-urbana na região, como pelo aumento do poder aquisitivo), e aumento do consumo de madeira dura (decorrente do crescimento da construção civil e de reformas de residências) (INPE, 1998).

A lenha foi a principal fonte de emissão em 1970, participando com 37% do total, distribuída entre os setores agrícola (38%), residencial (30%) e industrial (26%). O óleo combustível contribuiu com 41% do total emitido no setor industrial, enquanto que a gasolina e o óleo diesel foram responsáveis por 91% das emissões do setor de transportes (Rosa et al, 1990).

Em 1990, os setores industrial e de transportes totalizavam quase 70% das emissões, mantendo suas posições de maiores contribuintes nacionais para as emissões de CO₂. Entretanto, houve uma alteração na participação de cada fonte de energia. Durante esse período, o óleo diesel aumentou sua contribuição, e em 1990 tornou-se o principal combustível emissor de carbono (26% do total), seguido pela lenha (16%) e óleo combustível (16%) (Rosa et al, 1990). As emissões provenientes do consumo de gasolina diminuíram de 16%, em 1970, para 9% em 1990, em decorrência da penetração do álcool veicular hidratado em substituição à gasolina, e do álcool anidro, que era adicionado à gasolina numa proporção de 22% em todo o território nacional (exceto no Rio Grande do Sul onde se utiliza outro oxigenado - MTBE - adicionado à gasolina). Atualmente, a adição de álcool anidro à gasolina é realizada na proporção de 24%, o que deve levar a uma redução ainda maior da emissão decorrente do consumo de gasolina.

No setor industrial em 1990, as emissões decorrentes do uso de óleo combustível diminuíram com a substituição por eletricidade. De outro lado, o crescimento da indústria siderúrgica fez as emissões provenientes do coque aumentarem, durante esse período, de 12 para 24% (Rosa, 1990). No setor de transportes o óleo diesel foi responsável por quase 60% das emissões do setor, seguido pela gasolina (27%). No setor residencial, o uso de GLP reduziu o consumo de lenha, responsável por 29% das emissões do setor em 1990 (contra 71% em 1970), e tornou-se o principal combustível emissor do setor, com cerca de 60% (Rosa et al, 1990).

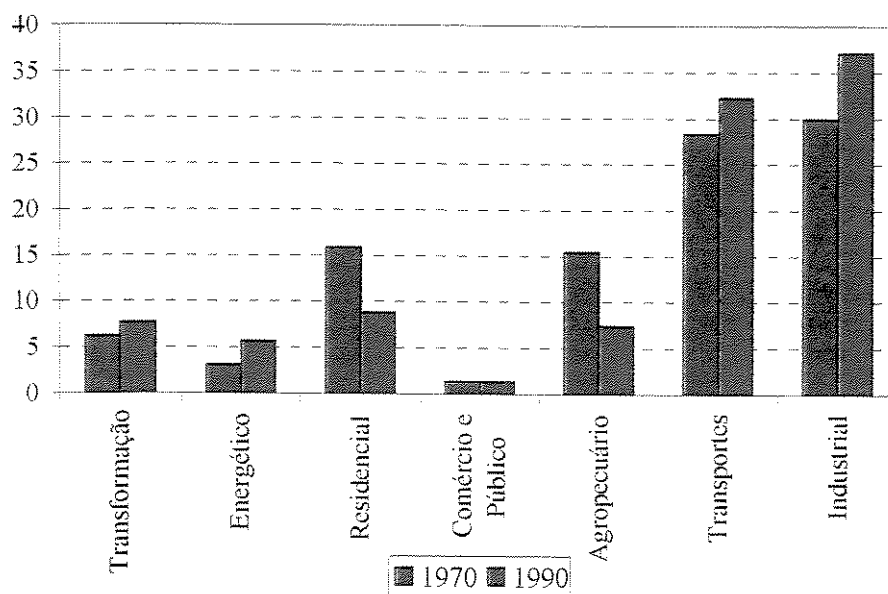


Figura 2.11: Comparação das emissões de carbono nos diversos setores entre 1970-90.
Fonte: Rosa et al, 1990.

2.3.1.1. Inventário Nacional de Emissão de CO₂

Para quantificar as emissões nacionais de CO₂ provenientes do sistema energético, a COPPE/UFRJ realizou o Relatório das Emissões de Carbono Derivadas do Sistema Energético - Abordagem “Top-down”, entre o período de 1990-94 (COPPE, 1998 a). Esse inventário utilizou a metodologia do IPCC, que tem sido amplamente adotada para tentar padronizar o cálculo das emissões e promover análises comparativas entre os diversos países. As emissões calculadas por essa metodologia baseiam-se essencialmente no consumo energético dos combustíveis e seus conteúdos de carbono. Para isso, foram utilizados os dados consolidados de produção, importação e exportação de energia e a variação de estoques, bem como a composição setorial dos diferentes grupos energéticos encontrados no balanço energético nacional. Em seguida, aplicaram-se diferentes fatores de emissão sugeridos pelo IPCC, e considerações para os diferentes combustíveis (COPPE, 1998 b). O Cálculo das Emissões de CO₂ do Sistema Energético Brasileiro no ano de 1994 está apresentado na Tabela 1 do Anexo. Os resultados dos cálculos realizados entre 1990 e 1994 estão sintetizados na Figura 2.12.

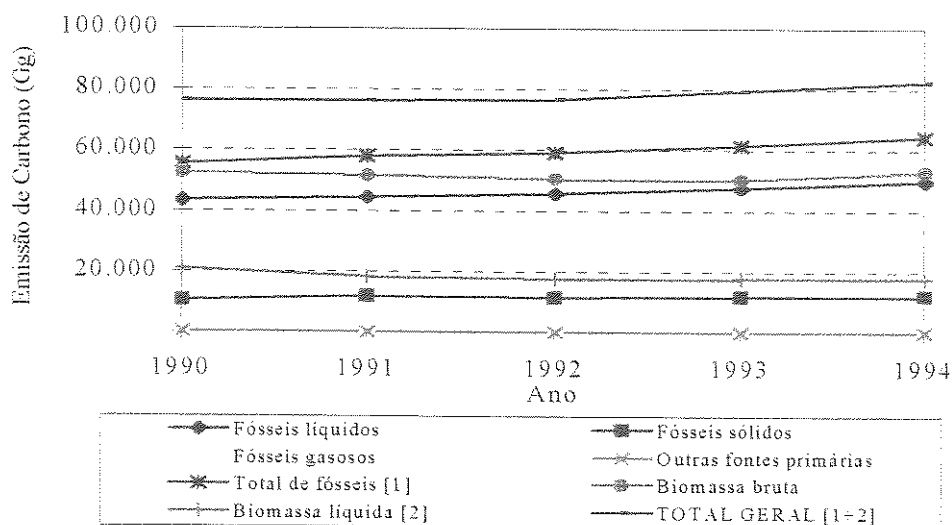


Figura 2.12: Emissões de carbono derivadas de fontes primárias de energia entre 1990-94.
Fonte: COPPE, 1998 a.

Os resultados obtidos mostram que as emissões de CO₂ derivadas da queima de combustíveis fósseis no sistema energético brasileiro evoluíram de 55,2 Mt C, em 1990, para 64,5 Mt C, em 1994. Isto representa um crescimento das emissões de 16,8% no período, resultado das seguintes evoluções: 15,6% para as fontes fósseis líquidas, dominadas pelo petróleo e seus derivados; 19,9% para as fontes fósseis sólidas, dominadas pelo carvão metalúrgico; e 22,6% para as fontes gasosas, dominadas pelo gás natural (COPPE, 1998 c).

Apesar da metodologia do IPCC recomendar que a emissão de CO₂ derivada do uso de biomassa não seja incluída na contabilidade das emissões do sistema energético (e sim, reportado em outro módulo chamado “Uso do Solo e Manejo Florestal”), ela foi calculada e pode ser verificada na Figura 2.12. As emissões brutas de CO₂ derivadas do consumo da biomassa tiveram apenas um pequeno aumento de 1,1% no período 1990-94, crescendo de 52,4 Mt C, em 1990, para 52,9 Mt C em 1994. Na sua composição houve um aumento de 18% na participação das fontes renováveis de biomassa: de cerca de 61% das emissões brutas, em 1990, para 71% em 1994 (COPPE, 1998 c). Este fato positivo deve-se ao aumento do uso da lenha de florestas renováveis na produção de carvão vegetal e à maior produção e consumo de bagaço de cana. Deve-se ressaltar que o crescimento da produção de bagaço não está diretamente ligado ao

aumento da produção de caldo de cana destinado à produção de álcool automotivo, mas sim ao aumento da produção de açúcar (COPPE, 1998 c).

O relatório introduziu um apêndice com relação as considerações feitas para o setor siderúrgico (COPPE, 1997). Foi tomado, como referência para os cálculos, o fluxograma dos principais produtos e insumos empregados na Cia. Siderúrgica Paulista - COSIPA, visto na Figura 2.13, uma usina integrada a coque com grande representatividade na produção nacional de aço. Como premissa para os cálculos, foi considerado que grande parcela do carbono adicionado ao processo provém apenas do carvão metalúrgico, não sendo considerados os outros produtos que entram na composição final do aço por representarem uma quantidade ínfima do total. Durante o processo de coqueificação, são produzidos óleo leves e alcatrão, empregados como insumos não energéticos. De acordo com a metodologia do IPCC, recomenda-se um valor padrão de 5,9% do total do carbono no carvão que se transforma em coque, como sendo destinado a estes usos não-energéticos. Isso correspondeu a 0,054 tC no caso da COSIPA.

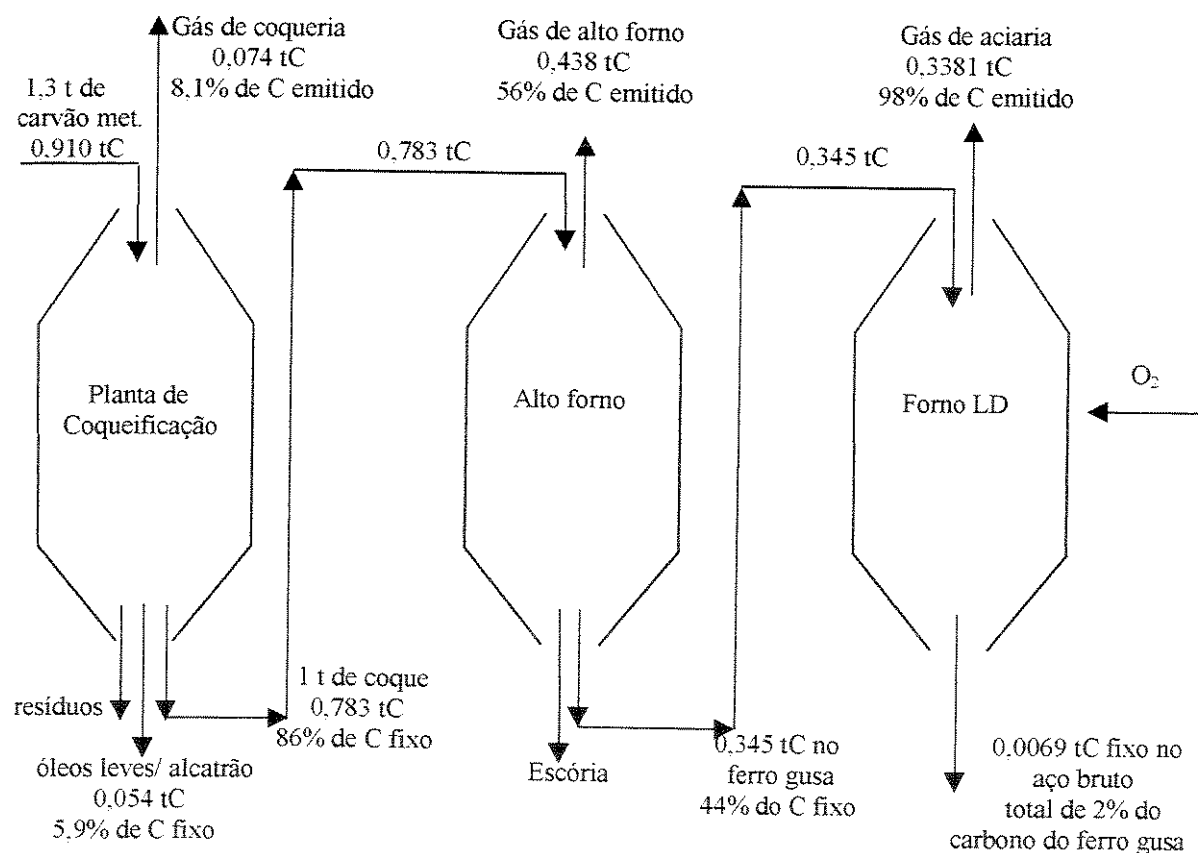


Figura 2.13: Rota simplificada do carbono no processo de fabricação do aço na COSIPA.
Fonte: COPPE, 1997.

O coque é misturado ao minério de ferro e transformado em ferro gusa nos altos fornos. Em seguida, o ferro gusa sofre reações com a adição de oxigênio nos fornos de refino, onde são transformados em aço bruto. Foi utilizado como hipótese a faixa limite superior da participação percentual em peso do carbono no aço, ou seja, 2% do carbono contido no ferro gusa, correspondendo a 0,0069t de C fixado no caso da COSIPA. Assim, dos 0,910 tC contidos em 1,3 t de carvão metalúrgico, cerca de 0,85 tC são emitidos, correspondendo a 93% do total introduzido no processo (COPPE, 1997).

Apesar da metodologia do IPCC não considerar as emissões de CO₂ provenientes do uso de biomassa no sistema energético, é importante destacar essa contribuição no caso especial da indústria siderúrgica. O consumo de carvão vegetal está dividido entre usinas integradas e produtores independentes. Parte do carvão vegetal consumido pelos produtores independentes provém de florestas naturais dos cerrados e a taxa de restituição da população florestal situa-se em níveis baixos (Pereira, 1998).

Utilizando alguns critérios propostos por pesquisadores e considerando que toda a madeira consumida provém de florestas plantadas, em 1993, a fixação de CO₂ pela siderurgia independente teria sido de 4,3Mt e a produção de oxigênio à ela associada seria de 1Mt (Pereira, 1998). Esse argumento é utilizado pelos defensores da siderurgia a carvão vegetal, vista dessa maneira como pouco prejudicial ao meio ambiente, até mesmo como “tecnologia limpa”. Entretanto, sem o reflorestamento, as emissões de CO₂ da siderurgia a carvão vegetal, até o ponto da produção de gusa, são sensivelmente superiores às da siderurgia a coque, como mostra a Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Balanços de CO₂ e O₂ para as siderúrgicas a carvão vegetal e a coque, até a etapa de produção de gusa.

kg/t gusa	Carvão vegetal (reflorestamento total)	Coque	Carvão vegetal (sem reflorestamento)
CO ₂ produzido	(890)	1749	2753
O ₂ produzido	203	(990)	(1559)

Fonte: Pereira, 1998.

Os resultados apresentados no relatório permitiram comparar o desempenho do sistema energético brasileiro, sob o ponto de vista de suas emissões de CO₂, com o de outros países, com

vista a se verificar o quanto o sistema brasileiro é “carbono-intensivo”. A Tabela 2.4 mostra os indicadores de desempenho calculados para o Brasil e Estados Unidos e sua média ao longo do período 1990-94.

Tabela 2.4: Indicadores de desempenho para emissões de CO₂ do sistema energético brasileiro e norte-americano.

Indicadores	Média do período 1990-94	
	Brasil	Estados Unidos
Emissão total de CO ₂ /Oferta interna bruta de energia (t C/ tEP)	0,39	0,68
Emissão total de CO ₂ /PIB (t C/ US\$ mil)	0,22	0,23
Emissão total de CO ₂ per capita (t C/ hab.)	0,52	5,31
Oferta interna bruta de energia/PIB (ktEP / US\$)	0,55	0,34
Oferta interna bruta de energia per capita (tEP / hab.)	1,32	7,83
Renda per capita (US\$ mil / hab.)	2,38	23,05

Fonte: COPPE, 1998 d.

A comparação do desempenho dos sistemas energéticos brasileiro e norte-americano, sob o ponto de vista de suas emissões de CO₂, revela as vantagens comparativas do Brasil, em função do importante papel desempenhado pelas fontes renováveis de energia, sejam elas a biomassa energética ou a hidreletricidade. A Tabela 2.4 mostra que os Estados Unidos (EUA) emitem 70% mais CO₂ por unidade de energia ofertada do que o Brasil. A vantagem comparativa do Brasil torna-se ainda maior quando se compara as emissões de CO₂ per capita dos dois países: a emissão per capita americana é 11 vezes maior do que a brasileira. Este fato, no entanto, traz escondido em seu bojo o baixo consumo de energia per capita brasileiro, de 1,32 tEP/hab., ou seja, 16% do consumo per capita americano (ambos consumos medidos com base na oferta interna bruta de energia), reflexo da falta de acesso de uma larga parcela da população a bens e serviços básicos (COPPE, 1998 d).

A comparação efetuada permitiu verificar que, apesar de emitir menos CO₂ por unidade de energia ofertada, o Brasil desperdiça esta vantagem quando da utilização desta energia: enquanto o Brasil necessita 0,55 ktEP de energia ofertada para produzir um dólar de PIB, os EUA necessitam 0,34 ktEP. O uso ineficiente de energia, ou seu uso em setores energo-intensivos, faz com que o Brasil, apesar de emitir menos CO₂ do que os EUA na produção de energia, apresente

um índice de emissão por unidade de PIB praticamente igual ao dos EUA (0,22 t C/ US\$ mil) (COPPE, 1998 d).

2.3.2. Emissão de CO₂ do Estado de São Paulo

O Estado de São Paulo é responsável pela maior parte do consumo energético nacional, representando 31% em 1996. Sua participação também é intensa nos três principais setores da economia: industrial, de transportes e residencial (BEN, 1998), e, por isso, sua contribuição para a emissão nacional de CO₂ é muito importante e relevante.

2.3.2.1. Inventário de Emissões de CO₂ Associadas à Produção e Uso de Energia do Estado de São Paulo

Para quantificar as emissões de CO₂ do Estado, foi realizado o Inventário de Emissões de CO₂ Associadas à Produção e Uso de Energia do Estado de São Paulo, com base nos dados referentes a 1994. Foi utilizada a metodologia do IPCC, a mesma aplicada para o Relatório das Emissões de Carbono Derivadas do Sistema Energético - Abordagem “Top-down” podendo, assim, ser realizada uma análise da real participação estadual nas emissões nacionais.

De acordo com a matriz energética estadual, observa-se o grande consumo de derivados de petróleo e a crescente utilização da biomassa nos diversos setores, destacando-se principalmente o uso dos derivados de cana-de-açúcar. Entretanto, a emissão decorrente do uso de biomassa não é contabilizada, da mesma forma que no Relatório Nacional. O Inventário de Emissões de CO₂ Associadas à Produção e Uso de Energia do Estado de São Paulo de 1994 está apresentado na Tabela 2 do Anexo.

Os resultados mostram que, assim como no Relatório Nacional, a principal fonte primária (excluindo a biomassa) responsável pela emissão de CO₂ em 1994 no estado foi o combustível fóssil líquido, dominado pelo petróleo, seguido pelo combustível fóssil sólido (carvão mineral) e fóssil gasoso (gás natural). A comparação entre as emissões do Estado de São Paulo e do Brasil é mostrada na Figura 2.14.

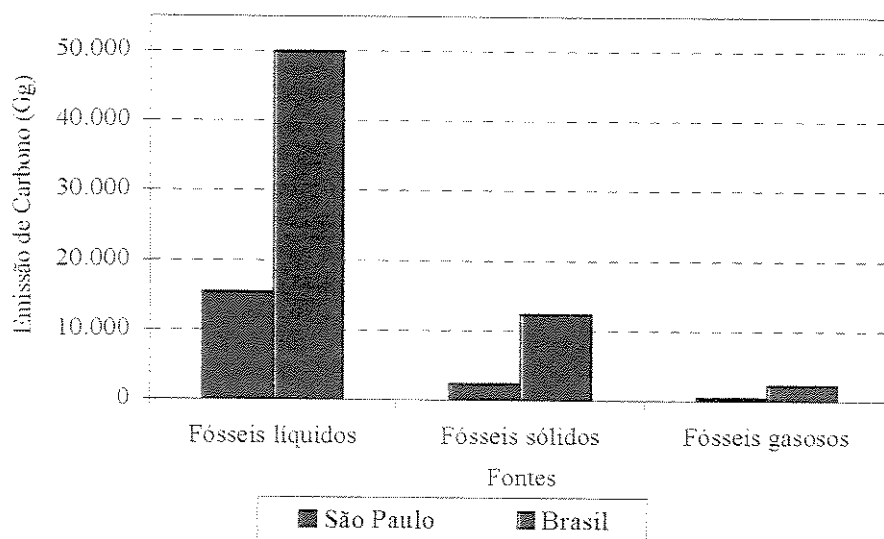


Figura 2.14: Emissões de carbono de fontes primárias de energia em São Paulo e no Brasil em 1994.
Fonte: SMA, 1997.

As emissões de carbono estaduais dos combustíveis fósseis líquidos corresponderam a 31% das emissões nacionais em 1994, assim como as dos combustíveis fósseis sólido e gasoso corresponderam a 19% e 18% respectivamente.

Além do inventário “Top-down” das emissões de CO₂ do Estado de São Paulo, foi realizado também o cálculo das emissões de acordo com o consumo final energético de cada fonte em cada setor da economia – Inventário “Bottom-up” de Emissões de CO₂ do Estado de São Paulo. Nesse caso, é utilizado o fator de emissão específico para o consumo de cada combustível em cada setor, como pode ser observado na Tabela 3 no Anexo. No inventário “Top-down”, grande parte das emissões foram computadas de acordo com o consumo aparente de petróleo e seu respectivo fator de emissão. Entretanto, o consumo final encontrado no balanço energético do Estado de São Paulo não leva em conta as perdas nos centros de transformação, e sim, perdas de produção, transportes, distribuição e armazenamento de energia. No caso das refinarias de petróleo, isso poderia ter valor significativo a ser acrescentado às emissões do setor industrial estadual. Assim, de acordo com esse cálculo, o setor de transportes contribuiu com 47% das emissões de CO₂ do estado em 1994, seguido pelo setor industrial com 35% (SMA,

1997). A participação de cada setor na emissão de CO₂, calculada a partir do consumo final energético, pode ser observada na Figura 2.15 e Tabela 4 no Anexo.

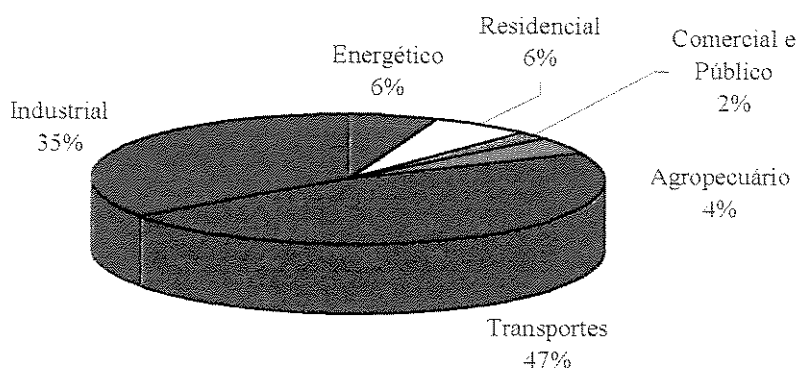


Figura 2.15: Emissão de CO₂ do Estado de São Paulo por setor em 1994.
Fonte: SMA, 1997.

No setor industrial, sem contabilizar as emissões das refinarias de petróleo, o óleo combustível contribuiu com 50% das emissões, seguido pelo coque de carvão metalúrgico com 28% (SMA, 1997). Por isso, ao analisar cada segmento do setor industrial, observa-se a grande emissão de CO₂ do segmento ferro gusa e aço (33%) e químico (20%), apresentado na Figura 2.16. As emissões referentes a cada segmento do setor industrial são apresentadas na Tabela 5 no Anexo.

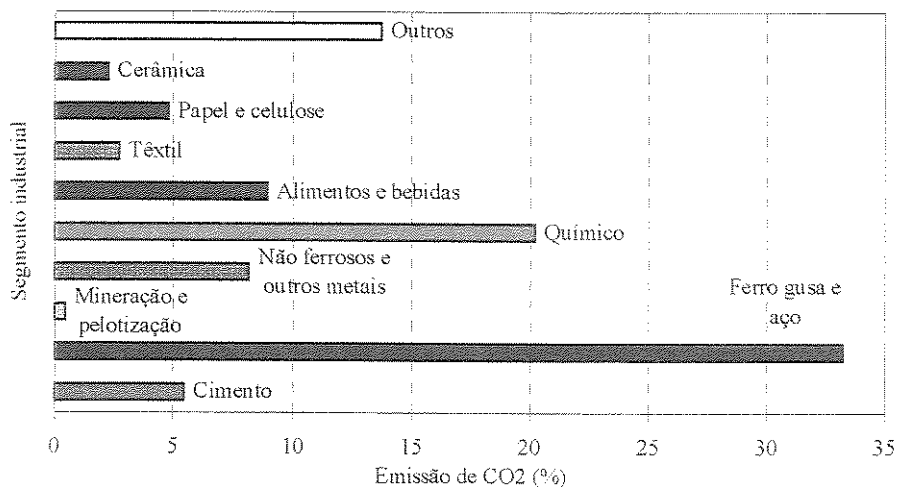


Figura 2.16: Emissão de CO₂ por segmento industrial paulista em 1994.
Fonte: SMA, 1997.

Apesar do Relatório Nacional não ter apresentado essa mesma análise, foram realizados cálculos preliminares, apresentados na Tabela 6 no Anexo, usando a mesma metodologia do Inventário “Bottom-up” de Emissões de CO₂ do Estado de São Paulo, para determinar a participação do segmento siderúrgico nacional nas emissões setoriais nacionais provenientes do uso de combustíveis fósseis em 1994. De acordo com os resultados preliminares, observa-se que, ao contrário do Estado de São Paulo, a emissão proveniente do consumo de coque de carvão metalúrgico no Brasil representa 38% do total emitido no setor industrial em 1994, enquanto que a emissão proveniente do óleo combustível, representa 32%. A Figura 2.17 mostra a participação dos setores de atividade na emissão nacional de CO₂. A intensa participação do coque de carvão metalúrgico nas emissões, confirma a importante participação do segmento siderúrgico, respondendo por quase 50% das emissões industriais e 16% da emissão total nacional (referentes ao consumo apenas de combustível fóssil), como mostra a Figura 2.18. As emissões de cada segmento industrial nacional em 1994 estão apresentadas na Tabela 7 no Anexo.

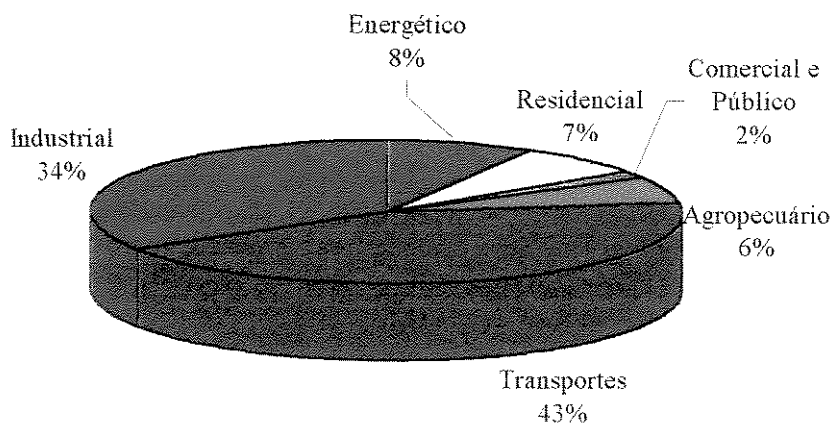


Figura 2.17: Emissão nacional de CO₂ por setor em 1994.
Fonte: Própria.

Os resultados preliminares obtidos mostram que a emissão do segmento siderúrgico estadual, decorrente do consumo de combustíveis fósseis, representa cerca de 20% da emissão do segmento siderúrgico nacional, e 3% da emissão total nacional em 1994.

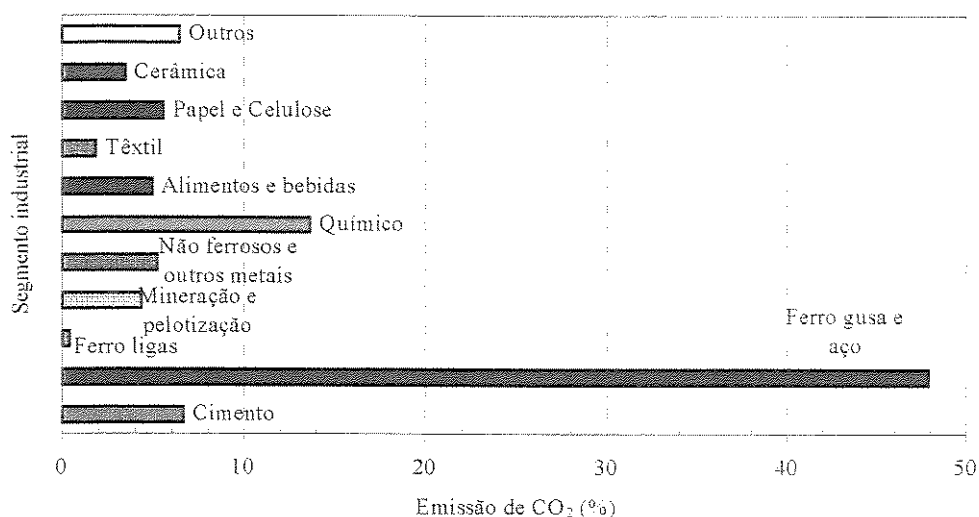


Figura 2.18: Emissão de CO₂ por segmento industrial nacional em 1994.
Fonte: Própria.

Entretanto, como havia sido mencionado anteriormente, é importante considerar a emissão de CO₂ proveniente do uso de carvão vegetal de origem nativa, sem o reflorestamento, no segmento siderúrgico nacional. Para isso, foi calculada a emissão proveniente do consumo de carvão vegetal no segmento em 1994, usando a mesma metodologia “Bottom-up” (aplicando o fator de emissão e a fração oxidada apresentados nos inventários nacional e estadual), cujo valor é 17.742 GgCO₂; e o percentual de consumo de carvão vegetal em 1994 oriundo de lenha nativa, de 46%, segundo Gutman (1998). A partir dessas informações, a contabilização da emissão proveniente do uso de carvão vegetal de origem nativa é realizada através da Equação 2.1:

$$\text{Emissão Líquida} = \text{Emissão Bruta} \times \% \text{ CV Oriundo de Lenha Nativa} \quad (\text{Equação 2.1})$$

Substituindo os dados na Equação 2.1, conclui-se que a emissão de carvão vegetal proveniente de lenha nativa foi de 8.161 GgCO₂ em 1994. Ao somar esse valor com o encontrado na Tabela 7, apresentado no Anexo, conclui-se que o segmento siderúrgico nacional emitiu 43.560 GgCO₂ no mesmo ano.

Foram calculados alguns coeficientes técnicos para as emissões provenientes de combustíveis fósseis e biomassa (emissão líquida) no Estado de São Paulo, em 1994, que serviram para realizar uma comparação com os do Brasil (Tabela 2.4). No caso específico da

emissão líquida de biomassa decidiu-se considerar que ela provinha do consumo de lenha de origem de mata nativa, correspondendo a 30% do consumo total desse energético em 1994. As demais biomassas (sólida e líquida) foram consideradas de origem totalmente renovável, não sendo incluídas no cálculo das emissões líquidas.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.5, no qual se observa que a emissão de carbono *per capita* estadual é 8% maior que a emissão média nacional. Apesar disso, a intensidade econômica da emissão (t C/ US\$ mil) é menor que a nacional (48%). Isto pode ser explicado pela menor intensidade econômica energética (ktEP/US\$), característica do Estado, decorrente da concentração de indústrias de ponta que necessitam de menos energia para gerar um produto de maior valor agregado.

Tabela 2.5: Coeficientes técnicos calculados para o Estado de São Paulo e Brasil em 1994.

Indicadores	São Paulo	Brasil
Emissão total de CO ₂ /Oferta interna bruta de energia (t C/ tEP)	0,44	0,38
Emissão total de CO ₂ /PIB (t C/ US\$ mil)	0,10	0,21
Emissão total de CO ₂ per capita (t C/ hab.)	0,56	0,52
Oferta interna bruta de energia/PIB (ktEP / US\$)	0,23	0,55
Oferta interna bruta de energia per capita (tEP / hab.)	1,27	1,36
Renda per capita (US\$ mil / hab.)	5,53	2,45

Fonte: Própria.

2.4. Síntese do Capítulo

As variações climáticas vividas nas últimas décadas têm sido associadas ao aumento da concentração de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera. Esses gases são gerados, em sua maioria, pelo consumo e geração de energia. Dentre eles, destaca-se o dióxido de carbono, em função do aumento de sua taxa de emissão atmosférica decorrente do consumo de combustíveis fósseis. A preocupação mundial com essa questão é tamanha, que levou à ratificação da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança Climática, cujo objetivo principal é a estabilização das concentrações dos gases do efeito estufa na atmosfera. Algumas ações especificadas inicialmente na Convenção Climática se mostraram inadequadas para tratar do aumento das emissões dos GEE e, por isso, vem sendo realizada anualmente a Conferência das Partes (COP). Através das COPs importantes decisões têm sido tomadas para adequar a

Convenção, como por exemplo, o Protocolo de Kioto, firmado na COP-3 em 1997, que define os limites e as reduções das emissões de 39 países desenvolvidos. Entretanto, muitos países garantem que só ratificarão o documento após a regulamentação dos chamados mecanismos de flexibilização do Protocolo de Kioto. De acordo com a COP-4, realizada em Buenos Aires no final de 1998, decidiu-se adotar um plano de trabalho, chamado de “Agenda 2000”, que irá permitir a regulamentação dos mecanismos, entre eles: de comércio de emissões e de desenvolvimento limpo.

No Brasil, a maior parte das emissões de CO₂ são decorrentes das alterações do uso do solo na Amazônia. As emissões de CO₂ provenientes do uso de combustíveis fósseis para a produção e utilização de energia contribuem levemente para a intensificação do efeito estufa. Elas estão associadas às características do balanço energético de cada país. Por isso, analisam-se os dados dos balanços energéticos do Brasil e do Estado de São Paulo em 1997.

O balanço energético nacional mostra a crescente participação de energo-intensivos no setor industrial, decorrente principalmente da expansão do segmento metalúrgico voltada para o mercado externo. Dentro deste segmento, destaca-se o segmento siderúrgico de produção de ferro gusa e aço, que responde por quase 8% do consumo final total e 20% do consumo industrial nacional em 1997. Esse alto consumo deve-se a participação do coque de carvão metalúrgico no balanço energético siderúrgico (38% em 1997), mostrando o predomínio de usinas a coque na produção nacional de aço. No Estado de São Paulo também observa-se a importante participação do segmento siderúrgico no consumo energético estadual. Em 1996, este segmento foi responsável por 5% do consumo final total estadual e 14% do consumo total industrial estadual.

Assim, com base nos dados do balanço energético nacional, a COPPE realizou o Relatório das Emissões de Carbono Derivadas do Sistema Energético - Abordagem “Top-down”, utilizando a metodologia proposta pelo IPCC. Nesse inventário, foi introduzido um apêndice mostrando que são emitidos 93% do carbono introduzido como carvão metalúrgico no processo siderúrgico. Apesar do IPCC sugerir que a emissão proveniente do uso de biomassa não seja computada nas emissões do sistema energético, é importante mostrar que existe uma parcela da produção de ferro gusa (produto intermediário à produção de aço) que utiliza carvão vegetal proveniente de

mata nativa sem o devido reflorestamento. Neste caso, as emissões de CO₂ são ainda maiores (Tabela 2.3).

O Estado de São Paulo também realizou um inventário de emissões de CO₂, utilizando a mesma metodologia apresentada pelo Relatório Nacional. Comparando os resultados referentes ao ano de 1994, conclui-se que o Estado responde por quase 30% das emissões nacionais de CO₂ provenientes do consumo de combustíveis fósseis. A partir do Inventário “Bottom-up” (subseção 2.3.2.1), observa-se a importante participação do segmento siderúrgico nas emissões industriais do Estado, contribuindo com 33%. Realizou-se também o cálculo preliminar das emissões nacionais usando a metodologia “Bottom-up” e verificou-se que o segmento siderúrgico responde por quase 50% das emissões industriais e 16% das emissões totais nacionais, decorrentes do consumo de combustíveis fósseis, em 1994. Além disso, os resultados preliminares obtidos mostram que a emissão do segmento siderúrgico estadual representa cerca de 20% da emissão do segmento siderúrgico nacional, e 3% da emissão total nacional em 1994, decorrentes do uso de combustíveis fósseis. Contabilizando também a emissão proveniente do uso de lenha de origem nativa, para a produção de carvão vegetal no segmento siderúrgico, conclui-se que a emissão total do segmento em 1994 foi de cerca de 43.500 GgCO₂.

Com isso, este capítulo mostra a importante participação do segmento siderúrgico nas emissões nacionais e do Estado de São Paulo, sendo focalizado em mais detalhes nos capítulos a seguir.

Capítulo 3

Indústria Siderúrgica

Neste capítulo são analisadas a evolução e as principais características do setor siderúrgico mundial e nacional. Procura-se dar atenção à descrição das etapas de produção do aço e as implicações com o consumo de energia, e emissões de carbono. O próximo capítulo tratará de uma etapa específica do processo – a redução em alto forno – responsável pela maior parte do consumo energético total do processo de produção de aço.

3.1. Indústria Siderúrgica Mundial

Após a Segunda Guerra Mundial, a tendência de vários países em desenvolvimento era favorável à instalação de “usinas integradas de grande porte”, o que, na época, parecia ser a única maneira de produzir aço. Praticamente todas foram estabelecidas como usinas estatais, devido aos elevados investimentos exigidos. Posteriormente, a necessidade de reestruturação da indústria siderúrgica, em face à problemas econômicos-financeiros vividos na década de 70 (principalmente após 1974), fizeram com que fossem modernizadas e construídas novas usinas, seguindo algumas tendências, que foram rapidamente absorvidas por países em desenvolvimento e desenvolvidos (Astier, 1991):

- expansão do preparo do minério de ferro e carvão, incluindo instalações de sinterização, com melhorias nas operações de altos fornos;

- substituição dos fornos Siemens-Martin (e conversores a ar) por conversores a oxigênio, frequentemente associados à metalurgia de panela;
- substituição do vazamento de lingotes, de fornos-poços, por lingotamento contínuo;
- controle generalizado da produção, tanto em quantidade como, especialmente, em qualidade, com sistemas sofisticados incluindo computadores, etc.

Ao final dos anos 80, a indústria siderúrgica passou a sofrer novas mudanças estruturais, no sentido de conseguir maior flexibilidade industrial, maior agressividade gerencial, processos mais compactos (menos intensivos em capital e mão-de-obra) e menor agressão ao meio ambiente. Nesse contexto, ocorreu o crescimento explosivo de “mini-usinas”, que produzem aço através da fusão de sucata em fornos elétricos a arco (FEA) (Hogan, 1998). A opção por esse processo tem sido motivada por vários fatores e o principal deles, sem dúvida, é a relação de investimentos exigidos: de US\$ 2 mil por tonelada/ano para as usinas integradas e de US\$ 500 por tonelada/ano para as usinas a base de FEA (ABM, 1998 a).

Atualmente 58% da produção mundial de aço é processada em aciarias LD (conversores a oxigênio), 33% em FEA e 9% através do processo Siemens-Martin (SM). De acordo com previsões da agência de consultoria World Steel Dynamics, no ano de 2010 a produção de 1,052 bilhão de toneladas de aço líquido será processada 51% em LD, 47% em FEA e 2% em SM (ABM, 1998 a). Em função disso, muito tem sido dito a respeito da inevitável substituição, em âmbito mundial, das siderúrgicas integradas por mini-usinas.

Todas essas mudanças mostram a ascensão da demanda e produção siderúrgica mundial. De acordo com o International Iron and Steel Institute (IISI), entidade que reúne os países produtores mundiais de aço, a produção em abril de 1997 apresentou um crescimento de quase 7% em relação à abril de 1996 (ABM, 1997 a). A produção mundial de aço bruto é mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Produção mundial de aço bruto entre 1992-97.

Países	Produção (milhões t)					
	1992	1993	1994	1995	1996	1997*
China	80,9	89,5	92,6	95,4	100,0	107,6
Japão	98,1	99,6	98,3	101,6	98,8	104,5
Estados Unidos	84,3	88,8	91,2	95,2	94,7	99,2
Rússia	67,0	58,3	48,8	51,6	49,3	46,4
Alemanha	39,7	37,6	40,8	42,1	39,8	45,0
Coréia do Sul	28,1	33,0	33,7	36,8	38,9	42,6
Brasil	23,9	25,2	25,7	25,1	25,2	26,2
Itália	24,8	25,7	26,2	27,8	24,3	25,7
Outros	272,9	268,8	268,0	276,8	277,1	297,2
TOTAL	719,7	727,5	725,3	752,4	748,1	794,4

* Dados preliminares.

Fonte: IBS, 1998.

3.2. Indústria Siderúrgica Nacional

A indústria siderúrgica nacional passou por sérias transformações desencadeadas com a extinção da Siderbrás, empresa holding das indústrias estatais Aço Minas Gerais (AÇOMINAS), Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), Companhia Siderúrgica Paulista (COSIPA), Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST) e Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais (USIMINAS); e a efetiva privatização de suas empresas.

Apesar de ter sido consequência da crise do Estado e não de uma política de reestruturação do setor siderúrgico (Bajay et al, 1995), a privatização tem provocado significativos avanços nas siderúrgicas brasileiras. Os investimentos realizados em modernização tecnológica, aumento de produtividade, redução de custos e implementação de programas de gestão ambiental, as têm tornado mais competitivas em nível nacional e mundial. A confirmação disso tem sido a obtenção de importantes certificados de qualidade reconhecidos mundialmente.

A evolução da produção nacional de aço bruto pode ser observada na Figura 3.1. No início da década de 80, a produção de aço bruto foi duramente afetada pela crise econômica

brasileira. Sua recuperação só ocorreu a partir de 1984 e em 1989, a produção já atingia um crescimento de 6% ao ano (Bajay et al, 1995).

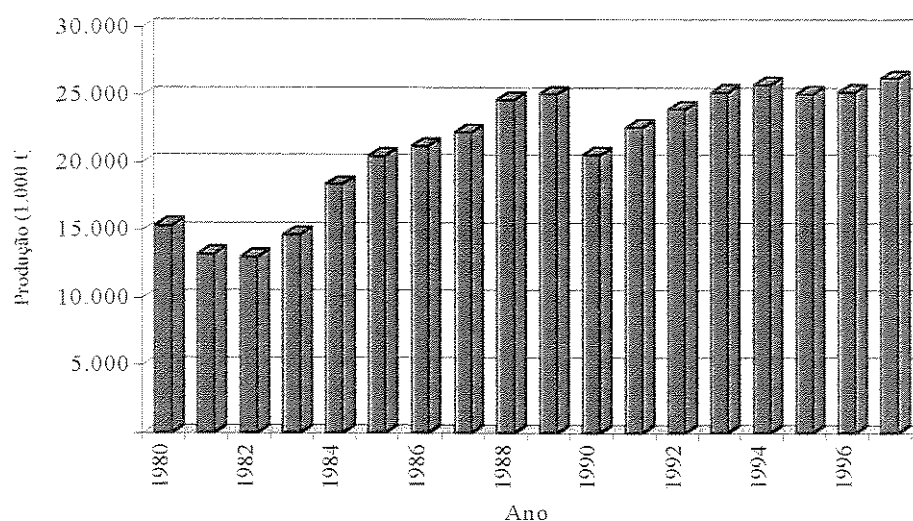


Figura 3.1: Evolução da produção brasileira de aço bruto.
Fonte: IBS, 1998.

A queda da produção em 1990 ocorreu devido, principalmente, à queda da produção da CST causada por problemas em seu, até então, único alto forno. Em 1993, a produção brasileira cresceu cerca de 5% em relação ao ano anterior, motivada para atender a demanda interna que apresentou um crescimento de 21% em relação a 1992 (Marques, 1994). Esse crescimento foi creditado à produção recorde de automóveis (1.391 mil veículos) e de eletrodomésticos. Em 1995, observa-se ligeira redução da produção de aço em função da diminuição da produção de ferro gusa em algumas usinas independentes, que estiveram fora de operação por motivos econômicos ou ambientais (ABM, 1996).

Em 1997, a produção nacional de aço bruto atingiu 26,2 milhões de toneladas, representando 3,3% da produção mundial. Esse resultado consolidou ao Brasil o sétimo lugar entre os maiores produtores mundiais de aço bruto conquistado em 1997, antes ocupado pela Itália (ABM, 1997 b).

Ao contrário de outros países produtores de aço como Japão e Estados Unidos, cujo consumo *per capita* em 1996 foi de 665 kg/habitante e 445 kg/habitante respectivamente (IBS,

1998), o consumo interno brasileiro de aço sempre foi menor. Entretanto, dados disponíveis mostram que o consumo *per capita* nacional de aço passou de 80 kg/habitante em 1993 para 106,5 kg/habitante em 1997, representando um acréscimo de 33% (ABM, 1998 b). Analistas econômicos acreditam que a boa atuação do mercado doméstico tenha sido causado pela redistribuição de renda em alguns segmentos em decorrência do Plano Real e pelo bom desempenho de setores que são consumidores intensivos de aço (automobilístico, construção civil e bens de capital) (ABM, 1998 b).

A forte posição exportadora atual do Brasil não resultou de uma política de conquista de mercados externos, mas de contração do mercado interno decorrente da crise mundial. O setor siderúrgico estava acabando de se preparar para atender a uma expectativa de grande crescimento da demanda interna, quando surgiu a crise. A expansão de usinas, que envolveu mais de US\$ 20 milhões, alcançara um ponto irreversível, que forçou sua conclusão. Assim, houve a necessidade de exportar a parcela aumentada de produção, que hoje já chega à quase 50% da produção nacional de aço, mas que inicialmente tinha sido planejada para cerca de 10% com o objetivo de equilibrar a balança comercial setorial (com a importação de carvão metalúrgico) (Bajay et al, 1995).

3.2.1. Distribuição da Produção Nacional de Aço

A região sudeste é o principal centro siderúrgico do país, onde se destaca o Estado de Minas Gerais, que participou com 37% da produção em 1997, conforme a Tabela 3.2. Sua liderança na produção de aço bruto pode ser explicada pela disponibilidade, qualidade e facilidade de exploração de suas jazidas de minério de ferro e pela favorável localização geográfica em relação aos portos marítimos do Rio de Janeiro, São Paulo e Espírito Santo (Bajay et al, 1995).

As usinas produtoras de aço podem ser classificadas em usinas integradas a coque, integradas a carvão vegetal, integradas à redução direta e semi-integradas (ou não integradas). As usinas integradas a coque foram responsáveis por cerca de 75% do ferro gusa produzido em 1997

(IBS, 1998), cujo uso é cativo para a própria produção de aço, como ocorre nas grandes siderúrgicas: Açominas, Usiminas, CST, CSN, Cosipa e Gerdau, apresentadas na Figura 3.2.

Tabela 3.2. Distribuição da Produção Regional de Aço Bruto em 1997.

Estados	Produção	
	(mil toneladas)	(%)
Minas Gerais	9.620	36,8
Rio de Janeiro	6.222	23,8
São Paulo	4.975	19,0
Espírito Santo	3.979	15,2
Rio Grande do Sul	512	2,0
Bahia	377	1,4
Paraná	241	0,9
Pernambuco	151	0,6
Ceará	76	0,3
BRASIL	26.153	100,0

Fonte: IBS, 1998.

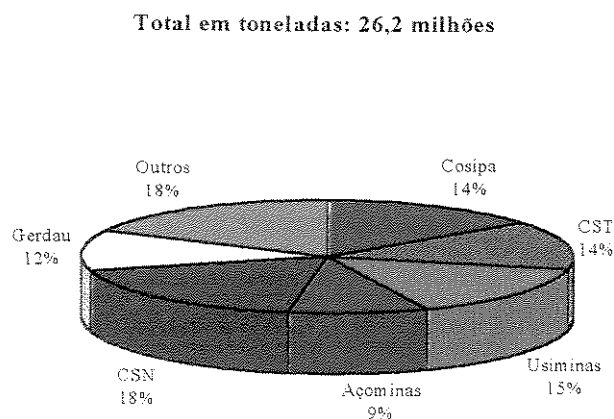


Figura 3.2: Distribuição nacional da produção de aço em 1997.
Fonte: IBS, 1998.

A produção de ferro gusa à base de carvão vegetal é dividida entre usinas integradas e produtores independentes, também chamados de guseiros. As usinas integradas foram responsáveis por 6% da produção nacional de gusa em 1997, enquanto que os guseiros responderam por 18% (IBS, 1998). Suas usinas, não integradas, se concentram em Minas Gerais,

principalmente nos pólos de Divinópolis, Sete Lagoas, Itaúna e Grande Belo Horizonte. Os guseiros exportam mais da metade de sua produção, que se baseava na utilização de reservas nativas sem o devido reflorestamento, o que os diferenciava das usinas integradas a carvão vegetal (Duarte et al, 1995).

O baixo índice de reflorestamento e a devastação de matas nativas têm gerado sérios problemas de fornecimento de carvão vegetal. Essa crise tem levado à sua substituição por coque de carvão mineral, influenciando diretamente a estrutura de consumo siderúrgico, principalmente no Estado de Minas Gerais. Para contornar esse problema, as grandes usinas integradas a carvão vegetal têm investido em aumentar seus índices de auto-suprimento e uma delas, a Mannesmann, já é auto-suficiente (ABM, 1997 c). Certamente até o final de 1998, as outras estarão atendendo, da mesma forma, a legislação ambiental.

O consumo de energia do setor, apresentado na Figura 3.3, confirma o predomínio das usinas integradas a coque na produção de aço bruto, responsáveis por 69% da produção nacional em 1993. Em seguida aparecem as usinas integradas a carvão vegetal (17%), semi-integradas a partir de sucata (12%) e integradas à redução direta a gás natural ou carvão fóssil (2%) (Bajay et al, 1995).

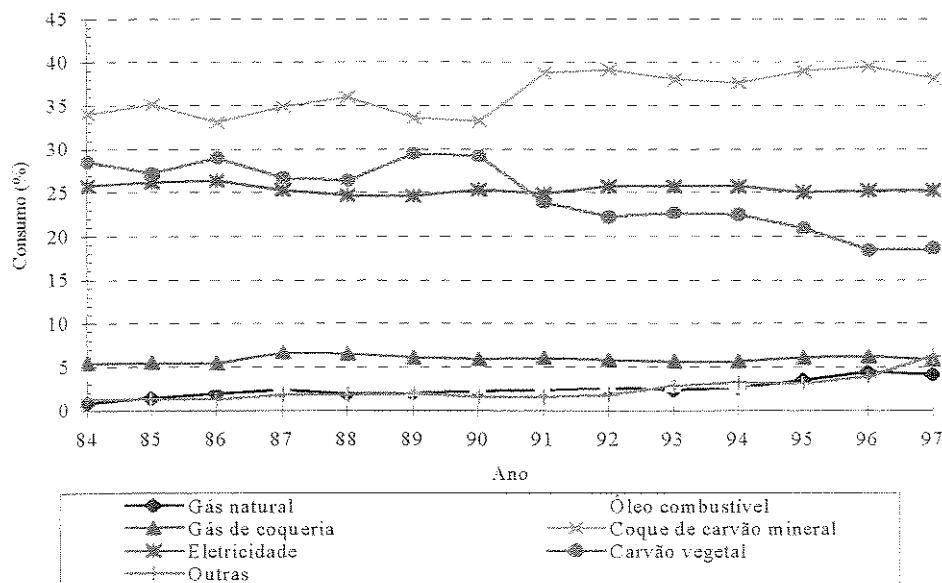


Figura 3.3: Evolução do consumo energético por fonte.
Fonte: BEN, 1998.

A reduzida participação do óleo combustível no consumo energético, que já atingiu 10% em 1980 (BEN, 1995), pode ser creditada às melhorias tecnológicas alcançadas. A eliminação de sua utilização como redutor siderúrgico, o melhor aproveitamento dos gases de coqueria, alto forno e aciaria, e o aumento da participação de produtos obtidos por processos de lingotamento contínuo em relação ao total de aço produzido, são algumas das melhorias que causaram a substituição desse energético.

A participação relativa de outras, que inclui carvão mineral, GLP, óleo diesel, nafta, querosene, gás canalizado, alcatrão e outras secundárias do petróleo, aumentou em 1997 em função do maior consumo dos dois primeiros energéticos.

O aumento do consumo de gás natural a partir de 1994 foi promovido com a entrada em operação do campo de Merluza na Bacia de Santos (litoral paulista) (Moraes et al, 1996) e a participação do gás natural proveniente da Bacia de Campos (RJ) no setor siderúrgico mineiro, cuja matriz energética, até então, não considerava esse combustível (Camargos, 1996). Com a importação de gás natural da Bolívia (gasoduto Bolívia-Brasil), estima-se que sua participação no consumo energético brasileiro seja mais representativa.

A relevância da eletricidade no consumo energético siderúrgico tende a aumentar com o enobrecimento do parque produtivo, com investimentos concentrados em laminação, e o crescimento das usinas semi-integradas, que utilizam fornos elétricos para produzir aço. Entretanto, não se espera que a produção nacional siga, por enquanto, a tendência mundial de produção de aço em FEA. Atualmente, 78% da produção brasileira é gerada em aciarias LD e 22% em FEA, enquanto que em termos mundiais essa proporção é de 58% em LD, 33% em FEA e 9% em SM, como já foi citado. Isto ocorre em função da indisponibilidade de carga metálica (sucata e seus complementos) em nível nacional e dos problemas no fornecimento de energia elétrica (ABM, 1998 a). Além disso, com a privatização do setor elétrico, esta questão deverá demandar análises mais profundas e que levarão em conta não apenas a disponibilidade de energia, mas também seu custo.

Segundo Worrell et al (1997), o consumo específico de energia do segmento ferro gusa e aço apresentou ligeira queda entre 1980-1991, de 32,2 GJ/t para 31,7 GJ/t (sem incluir a participação da energia elétrica utilizada em FEA). Essa redução de cerca de 2% ocorreu em função do pequeno aumento da eficiência energética do processo de produção de aço. A relativa falta de preocupação com conservação de energia reflete bem a característica da indústria nacional de aço no período considerado, interessada apenas em produzir maiores quantidades para que não houvesse ociosidade já que havia abundância de energia (Gutman, 1998). Atualmente o consumo específico de energia está em torno de 29,3 GJ/t, calculado a partir do consumo de energia no segmento (BEN, 1998) e da produção física de aço em 1997 (IBS, 1998). Sua redução deve-se principalmente à alteração do processo de produção, com o aumento da participação de lingotamento contínuo; e ao aumento da eficiência de alguns processos, como a injeção de combustível auxiliar em alto forno. Entretanto este valor pode ser considerado alto, quando comparado a países como Alemanha (que em 1991 apresentava consumo específico de 18,3 GJ/t) e Japão (que em 1991 apresentava consumo específico de 21 GJ/t) (Worrell et al, 1997), mas deve-se principalmente à característica da produção nacional de aço baseada no predomínio de usinas que utilizam altos fornos, e na pequena participação de FEA, como já foi mencionado anteriormente.

3.3. Processo de Produção de Aço

A produção de aço envolve três etapas: redução, refino e laminação. Quando uma usina siderúrgica realiza essas três etapas é considerada como integrada, sendo que a ausência de qualquer uma delas a classifica como não integrada ou semi-integrada. A Figura 3.4 mostra o fluxograma simplificado da produção de aço em usina integrada a coque.

A produção de aço se inicia com as etapas de coqueificação e sinterização ou pelotização, apresentadas na Figura 3.4. A coqueificação é o processo pelo qual o carvão mineral é submetido à altas temperaturas na ausência de oxigênio, produzindo gás de coqueria – GCO - (utilizado como insumo energético na usina, constituindo uma fonte de emissão de CO_2), alcatrão e coque (com alta concentração de carbono). A duração da coqueificação dependerá da largura do forno, da temperatura das paredes e das características do carvão (grau de moagem e densidade bruta).

Após o desenformamento, o coque é levado para a extinção da queima, que pode ser realizado por via úmida ou seca. O carvão mineral, classificado como metalúrgico, deve apresentar baixos teores de cinzas, enxofre e material volátil para garantir a produtividade e o consumo energético do alto forno (Bajay et al, 1995).

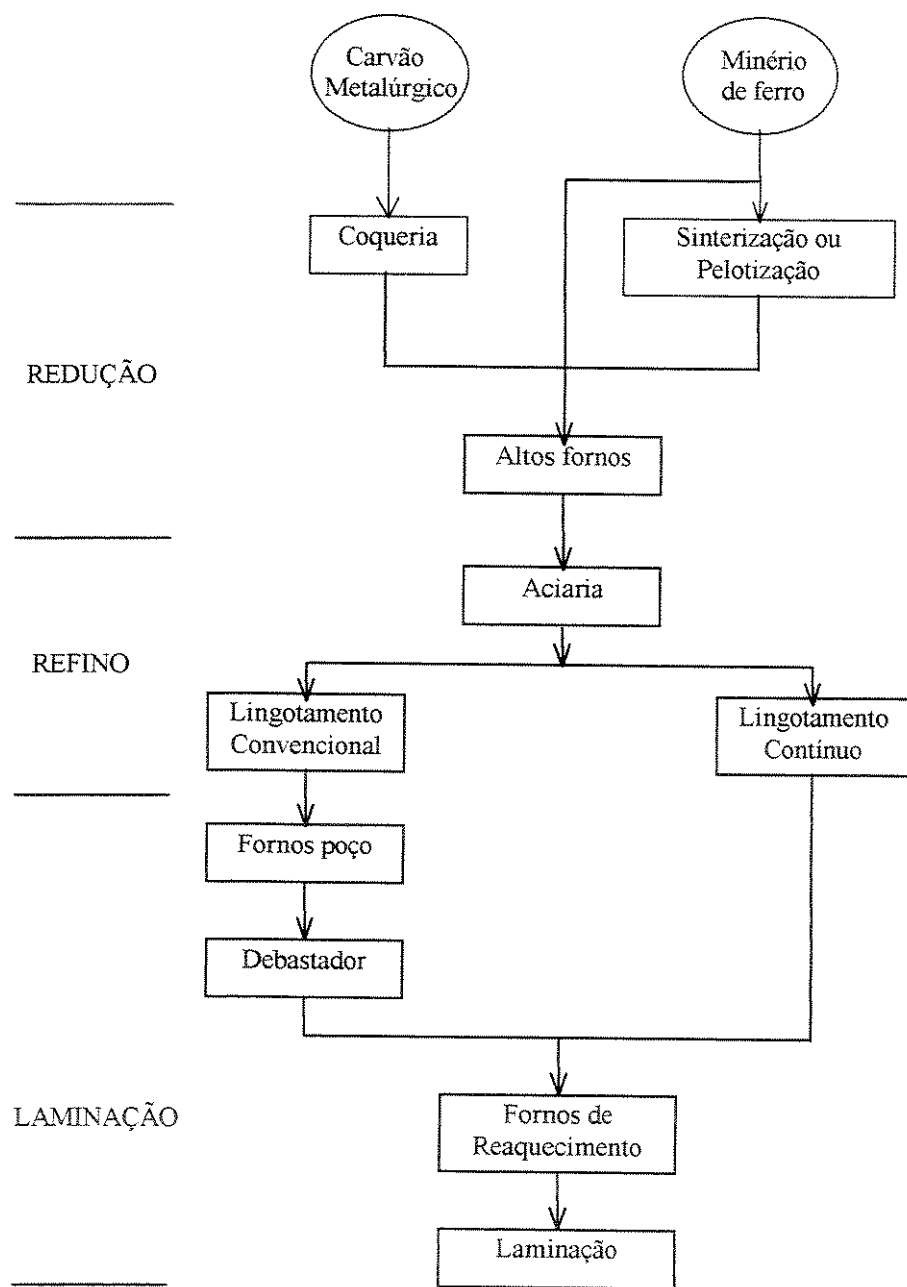


Figura 3.4: Fluxograma simplificado de uma usina integrada a carvão metalúrgico.
Fonte: Bajay et al, 1995.

Em muitas jazidas de minério há certa proporção de material friável, que se desagrega facilmente, produzindo finos que não podem ser utilizados diretamente no alto forno. Estes finos são aglomerados em processos de pelotização ou sinterização, produzindo material de granulometria controlada e excelente rendimento nos altos fornos (Mei & Silva, 1988).

A sinterização é um processo de semi-fusão redutora-oxidante a que é submetido o minério de ferro na presença de fundentes, coque e umidade. Existem dois processos básicos de sinterização: o Greenwalt, que é intermitente, e o Dwight Lloyd, contínuo. Os dois processos não apresentam muitas diferenças. De forma geral, ambos consistem em carregamento da “panela” ou esteira com a mistura a ser sinterizada, aquecimento da mistura com vaporização da água, calcinação dos carbonatos, semi-fusão e formação de sinter (aglomeração do minério de ferro) através da queima do próprio coque (que constitui a mistura) e posterior britagem. As reações de sinterização ocorrem na faixa de 900° a 1400°C, quando ocorre a formação do magma do sinter - mistura de silicatos e cálcio-ferritas (Bajay et al, 1995).

A pelotização é uma etapa alternativa à sinterização, sendo atualmente aceita como a melhor maneira de alimentar os altos fornos em função da sua uniformidade dimensional, alto teor de ferro e características físicas (alta resistência mecânica). Além disso, do ponto de vista da mineração, a pelotização permite a utilização de finos de minério, antes considerados como rejeito. O processo consiste, inicialmente, em elevar o teor de ferro dos finos (concentração) através da eliminação da sílica e de outras impurezas por efeito mecânico ou eletrostático (Boyle & Gall, 1985). Em seguida o minério passa por uma série de operações de preparação que o adequam à pelotização, fase seguinte em que este é transformado em pelotas cruas pela ação de rolamento em disco ou tambor. A última etapa é de queima, onde a pelota adquire as características físicas e metalúrgicas que a tornam apta para as etapas seguintes.

O processo de redução ocorre no alto forno, que é carregado com sinter (ou pelotas), minério, fundentes e coque (principal elemento redutor e combustível). Os produtos dessa etapa são ferro gusa líquido, escória e gás de alto forno - GAF. Em usinas integradas, o gusa é transportado, através de vagão torpedo ou panela, em estado líquido à aciaria. O gás de alto forno

é aproveitado no próprio alto forno ou como insumo energético em outras partes do processo (Bajay et al, 1995) e, neste momento constitui-se uma importante fonte de emissão de CO_2 .

O conjunto de etapas denominado de redução, que engloba a redução em si mais a coqueificação e a sinterização, visto na Figura 3.4, representa entre 65 e 70% do consumo energético global do processo de produção de aço em usinas integradas. Isso mostra a importância de medidas de conservação de energia nessa fase de produção (Bajay et al, 1995).

A etapa de refino, representada na Figura 3.4, tem três fases principais: a aciaria, que é a produção de aço propriamente dita; a metalurgia de panela (ou refino secundário), que melhora as características estruturais do aço e reduz o tempo de corrida da aciaria; e o lingotamento, fase de solidificação do aço (Boyle & Gall, 1985).

Na aciaria existem duas rotas predominantes no mundo: conversor a oxigênio, também denominado LD, e o forno elétrico a arco. O primeiro é utilizado em usinas integradas a carvão metalúrgico ou vegetal, enquanto o segundo é mais usado em usinas semi-integradas, cujo processo começa na aciaria; ou semi-integradas à redução direta.

O processo LD é realizado em um vaso basculante, a fim de que seja facilitado o vazamento do aço, que recebe como carga, gusa líquido e sucata. Consiste basicamente na sopragem de oxigênio verticalmente sobre a superfície do banho metálico. Na zona de impacto do oxigênio, o alto calor sensível do gusa e a oxidação de seus elementos causa uma reação violenta e imediata, com temperaturas locais em torno de 2500° e 3000°C . Devido às diferenças de temperatura, concentração, peso específico e formação de gases, ocorre uma energética movimentação do banho. A quantidade de sucata carregada é função da temperatura e do teor de silício do gusa, empregando-se, em geral, de 15 a 20% de sucata (Bajay et al, 1995).

Como produto do processo, têm-se aço líquido, escória fundida e gás de aciaria - GAC, que é destinado ao sistema de gases da usina onde pode ser aproveitado (gerando emissão de CO_2). A demanda de energia nessa etapa é muito pequena, calculada em cerca de 3,5% do consumo global (Bajay et al, 1995).

A utilização da metalurgia de panela é um dos melhores indicadores do enobrecimento do “mix” de produtos. Trata-se da interligação da aciaria com as máquinas de lingotamento, possibilitando o ajuste fino da temperatura e composição química, que são parâmetros de processo essenciais à obtenção de produtos nobres. Em geral, quanto maior a proporção de aços tratados com refino secundário, melhor é o grau de enobrecimento da produção (Mei & Silva, 1988).

A partir da obtenção do aço líquido, existem duas possibilidades para a etapa de lingotamento. Nos processos convencionais, o aço é vazado em moldes, lingotes, onde é solidificado. A partir daí inicia-se a etapa de laminação, apresentada na Figura 3.4, onde os lingotes são reaquecidos em forno poço, que permite um aquecimento mais uniforme sem levar ao superaquecimento; desbastados e aparados nas extremidades; e levados para o forno de reaquecimento.

A segunda possibilidade está no lingotamento contínuo, onde o aço líquido é vazado num equipamento especial, produzindo placas ou tarugos que são levados diretamente ao forno de reaquecimento e laminação (representado na Figura 3.4). Na laminação o aço é reaquecido e deformado pela pressão de cilindros gigantes, até atingir as especificações exigidas pelo cliente. Caso seja necessária a produção de materiais com características mecânicas bem determinadas, é realizada mais uma laminação, desta vez a frio. O alto consumo de energia dos fornos de reaquecimento pode ser explicado pelo fato de que, praticamente toda a carga (placas, tarugos e blocos) está à temperatura ambiente (Bajay et al, 1995).

Apesar do processo de lingotamento contínuo ser mais econômico que o convencional, pois há menores perdas de aço, existem produtos siderúrgicos que não aceitam aquele processo, principalmente quando o perfil do produto exigido pelo mercado obriga a produção sob a forma quase artesanal. Assim, a importância do forno poço numa usina siderúrgica deverá ser mantida, bem como a necessidade de reduzir o consumo de energia nessa etapa (que consiste na queima de óleo combustível e dos gases produzidos internamente nas usinas).

Baseado nas considerações feitas no apêndice do Inventário Nacional de Emissão de CO₂ – Abordagem “Top-down” (COPPE, 1997), foi realizado um balanço de massa de carbono no processo de produção de aço. Este balanço está apresentado, de forma simplificada, na Figura 3.5.

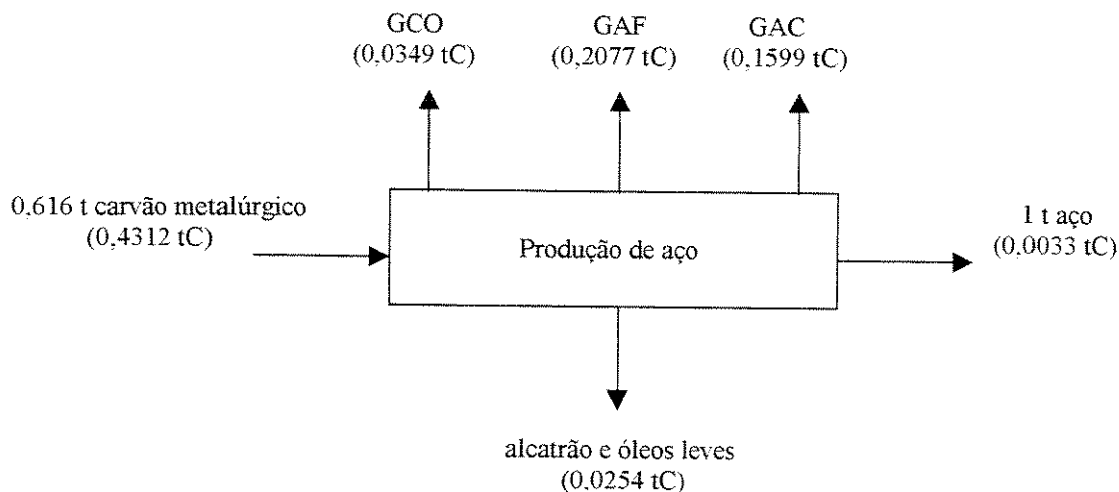


Figura 3.5: Balanço de massa do carbono na produção de 1 t de aço.
Fonte: Própria.

O carbono contido no alcatrão e óleos leves não é emitido no processo de produção de aço, não devendo ser contabilizado no segmento siderúrgico. Os GCO⁵, GAF⁶, GAC⁷ são aproveitados na própria usina como insumos energéticos, sendo direcionados para as etapas do processo e, em algumas usinas, lançados para a atmosfera. Nesse momento, esses gases são considerados fontes de emissão de CO₂ pois tanto seu aproveitamento quanto seu descarte envolve o processo de combustão. Considerando que ocorra combustão completa dos gases, a emissão de CO₂ pode chegar a, no máximo, 0,4025 t C/t aço produzido (em termos de emissões de CO₂ basta multiplicar pelo peso molecular do CO₂ - 44 g - e dividir pelo do carbono - 12 g -, correspondendo a 1,48 t CO₂/t aço produzido).

Assim, de acordo com as características de cada etapa do processo e com o balanço de massa do carbono apresentado na Figura 3.5, decidiu-se analisar em específico a etapa de redução, mais precisamente em alto forno.

⁵ Gás de coqueria.

⁶ Gás de alto forno.

⁷ Gás de aciaria.

Capítulo 4

Etapa de Redução em Alto Forno

A etapa de redução em alto forno é responsável pela maior parte do consumo energético do processo de produção de aço, representando cerca de 65%. Por isso, é nessa etapa que se concentram as medidas de conservação de energia, principalmente de redução de consumo de coque de carvão metalúrgico (ou carvão vegetal). Assim, neste capítulo analisa-se o processo de redução em alto forno e a injeção de combustível auxiliar como medida de redução as emissões de CO₂ do segmento.

4.1. Processo de Redução em Alto Forno

Nessa etapa da produção de aço ocorre, basicamente, a redução dos óxidos de ferro por intermédio de um redutor, que contenha carbono, para produzir ferro gusa. As reações ocorrem no alto forno, onde são carregados alternadamente pelo topo: minério de ferro (e pelotas ou sinter), o agente redutor (coque ou carvão vegetal) e adições (fundentes como calcário e/ ou dolomita).

As proporções do material variam em função da prática operacional. Um exemplo seria: 1,7 t de minério (hematita - Fe₂O₃), 0,5 t de coque, 0,25 t de calcário e 1,8-2,0 t de ar. Desta carga obtém-se 1,0 t de gusa, 0,2-0,4 t de escória e 2,5-3,5 t de gás de alto forno, este normalmente usado para aquecimento em diversas aplicações na usina, por conter alto teor de CO (Mei & Silva, 1988).

No desenrolar do processo, a carga desce no interior do forno, enquanto os gases resultantes da combustão do coque ou carvão vegetal (com oxigênio do ar soprado pelas ventaneiras) ascendem através da coluna de carga, reduzindo o minério e pré-aquecendo os materiais. Durante o aquecimento, a composição da mistura vai se alterando até serem realizadas as reações de redução, quando o oxigênio combinado com o ferro do minério passa a fazer parte dos gases, sob a forma de óxidos de carbono. O processo de redução é acompanhado de outras reações químicas, como a formação de carbonetos e escória (Araújo, 1997).

O movimento ascendente dos gases e outro, em sentido contrário, do material é de grande importância para o trabalho do alto forno. Isso permite aos gases cederem seu calor aos materiais carregados, buscando utilizar ao máximo seu poder de redução no interior do forno. O alto forno pode ser considerado um trocador de calor e de materiais entre a carga descendente (inicialmente sólida, depois pastosa e por fim líquida) e o gás redutor que sobe em contracorrente.

4.1.1. Divisão do Alto Forno

O alto forno apresenta divisões bem definidas: topo, goela, cuba, ventre, rampa e cadinho, que podem ser vistas na Figura 4.1.

O topo, representado na Figura 4.1, é a parte superior do forno, onde se localizam os dispositivos de carregamento, os de saída dos gases (dutos de gás, portas de explosão, sangradouros) e as plataformas de acesso a todos esses equipamentos.

O primeiro contato das cargas (metálica e redutora) com os gases aquecidos ocorre na goela, apresentada na Figura 4.1. Nesse local costumam ocorrer desgastes causados, principalmente, pelos choques e abrasão durante a descida da carga a temperaturas até 700°C (Araújo, 1997).

Na cuba, vista na Figura 4.1, ocorre o aquecimento e secagem da carga, seguido das reações de redução de Fe_2O_3 em ferro metálico (Fe). Sua temperatura na parte média é de 600°-1000°C, aumentando ainda mais quando utiliza-se alta porcentagem de pelotas. No final da cuba,

a mistura consiste em ganga, cal, coque, ferro esponja e quantidades variáveis de minério não reduzido.

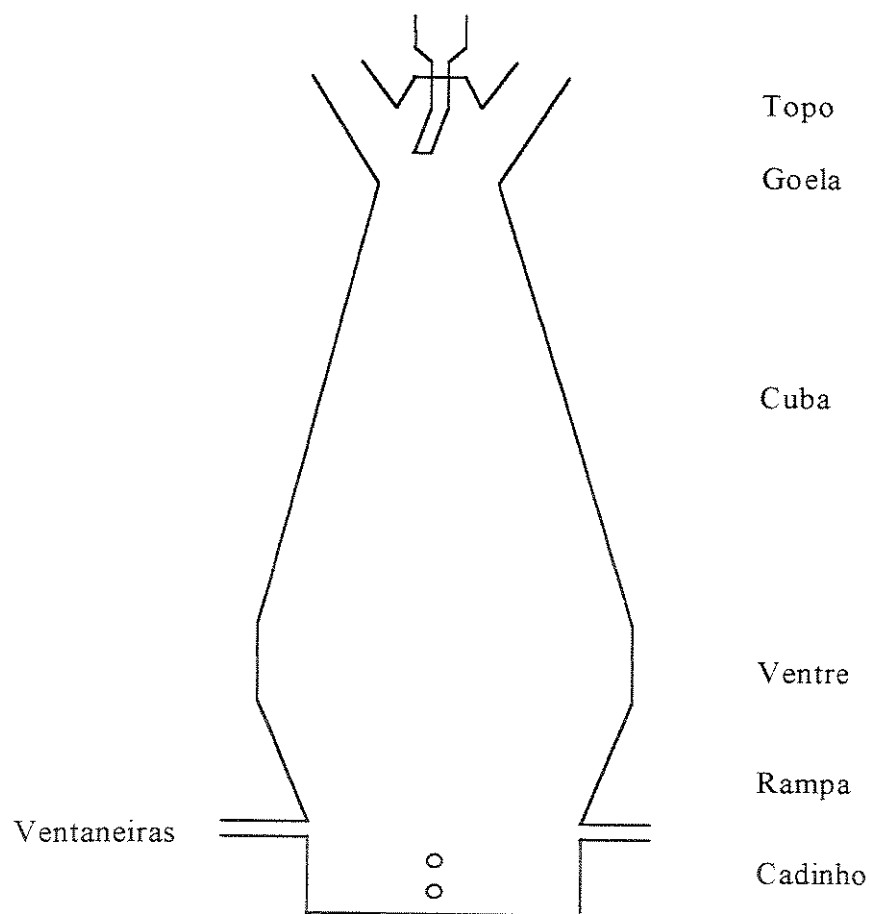


Figura 4.1: Divisão do alto forno.
Fonte: Mei & Silva, 1988.

O ventre tem forma cilíndrica e situa-se abaixo da cuba, sobre a rampa. Em alguns perfis de alto forno não há ventre, fazendo com que a cuba esteja unida diretamente à rampa.

Ao atingirem a rampa do alto forno, representada na Figura 4.1, a uma temperatura acima de 1200°C , os óxidos de ferro e manganês, a cal e parte da ganga reagem entre si, formando principalmente silicatos e aluminatos. Com o aumento da temperatura, eles passam ao estado líquido e formam a escória. Por isso, a rampa é conhecida também como zona de fusão dos materiais (Mei & Silva, 1988).

Uma das propriedades mais importantes da escória é a sua fluidez. Uma escória muito viscosa dificulta a operação do alto forno pois pode agarrar-se ao revestimento, escorrer lentamente e colar-se ao coque na rampa, dificultando a normal distribuição do gás ascendente. A viscosidade da escória varia em função de sua composição química e da temperatura. Após anos de desenvolvimento em operação, descobriu-se que a viscosidade depende da relação $(\text{CaO} + \text{MgO}) : (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$. Quando a relação se aproxima da unidade, a escória se solidifica rapidamente numa massa petrificada. A viscosidade tende a aumentar com teores crescentes de alumina. Quando o incremento desta última é compensado por uma correspondente diminuição do teor de sílica, a viscosidade é reduzida (Araújo, 1997).

A proporção de cal tem importância especial para a remoção de enxofre (dessulfuração). O enxofre presente em altas concentrações causa fragilidade no aço e por isso é imprescindível mantê-lo dentro do limite (em torno de 0,05%) no ferro gusa. No trabalho em alto forno a carvão vegetal, esta circunstância tem importância secundária pois esse combustível contém quase nenhum enxofre. Já no trabalho em alto forno a coque, o elevado teor de enxofre neste combustível exige uma quantidade maior de cal, tornando básica sua escória. Como o processo de dessulfuração ocorre à temperaturas elevadas, é necessário aumentar o consumo de coque (Araújo, 1997).

O cadinho, visto na Figura 4.1, tem forma cilíndrica e sua função é coletar o gusa e a escória a medida que se formam. Eles são vazados para fora do alto forno por intermédio do furo de escória e furo de gusa. Como a escória flutua sobre o gusa, por apresentar uma densidade menor, o furo de escória situa-se acima do furo de gusa.

4.1.2. Ventaneiras e Regeneradores

Através das ventaneiras o ar pré-aquecido é soprado para o interior do forno. Seu número nos altos fornos grandes é da ordem de 30 a 38 (Araújo, 1997).

Se o ar, necessário à combustão, fosse introduzido pelas ventaneiras do alto forno à temperatura ambiente, seria necessário consumir uma quantidade maior de coque para aquecer os

gases até as temperaturas de trabalho na região de queima. Utilizando-se uma parte do gás de alto forno para aquecer o ar, antes de enviá-lo às ventaneiras, obtém-se uma considerável economia de combustível sólido. Para isso, são utilizados regeneradores (ou cowpers), que conseguem atingir temperaturas de sopro de ar mais elevadas quando o gás de alto forno é enriquecido pela mistura com gás natural ou de coqueria.

O regenerador, visto na Figura 4.2, apresenta uma câmara de combustão vertical, uma cúpula para ligação ao empilhamento e o enchimento de refratários, estes apoiados sobre uma grelha e colunas de ferro fundido. Cada regenerador tem o mesmo diâmetro que o alto forno e a altura do seu empilhamento é 1,5 vezes a altura útil do mesmo (Araújo, 1997).

O gás de alto forno, introduzido juntamente com o ar no queimador instalado perto da base da câmara de combustão, queima no seu interior, ascende e muda de direção ao atingir a cúpula do regenerador. Em seguida, ele atravessa o enchimento de refratário no sentido descendente, cede calor aos tijolos e sai para a chaminé à uma temperatura entre 150° e 250°C (Araújo, 1997). Esta fase é chamada de “fase em gás” apresentada na Figura 4.2.

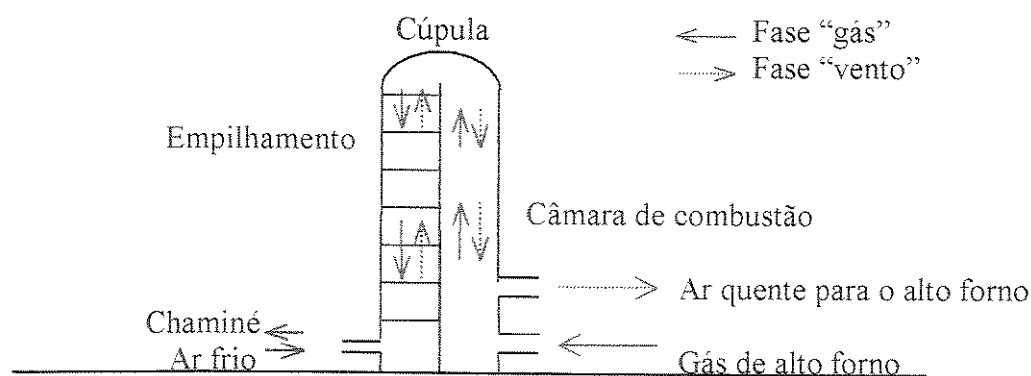


Figura 4.2: Regenerador.
Fonte: Araújo, 1997.

Após certo tempo (1 hora e meia), o refratário atinge temperaturas da ordem de 1200°C (atualmente até 1400°C). Nesse momento, fecham-se as válvulas de entrada de gás e ar para o queimador, bem como a de saída para a chaminé. Abre-se o registro de entrada do ar vindo do soprador (chamado de “vento”), que está localizado perto da base do regenerador, e também a ligação de saída para o duto de ar quente. O ar soprado, ao atravessar os canais nos tijolos, vai se

aquecendo, muda de direção ao atingir a cúpula do regenerador e desce pelo duto da câmara de combustão, saindo para o alto forno. O vento sai do regenerador à uma temperatura em torno de 1200°C (Araújo, 1997). Esta fase, apresentada na Figura 4.2, é chamada “fase em vento”.

Desenvolvimentos recentes em regeneradores adotam câmaras de combustão externa, que evitam o risco de um “curto-circuito”, isto é, a formação de trincas nas paredes da câmara de combustão que permitem a passagem dos gases quentes para as zonas inferiores do empilhamento. Estas zonas, não resistindo a temperaturas tão altas, amolecem e causam redução da eficiência do regenerador (Araújo, 1997).

4.1.3. Transformações da Carga

O minério, sinter (e/ou pelota) e o coque carregados entram em contato com uma corrente de gases quentes a 150°-250°C. A primeira transformação é de natureza física e consiste na secagem da carga, onde a umidade é removida junto com o gás, enquanto que a água combinada será eliminada nas zonas inferiores, no intervalo de temperatura entre 700° e 800°C (Araújo, 1997).

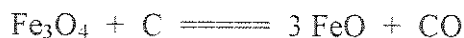
As primeiras reações de redução têm lugar a 470°C, onde uma parte da hematita é reduzida, depositando carbono (Araújo, 1997):



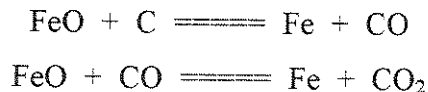
A ± 550°C, uma parte da hematita é reduzida a Fe_3O_4 :



A cerca de 620°C, uma fração do Fe_3O_4 é reduzida a óxido ferroso:



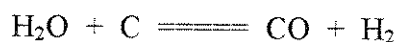
No intervalo entre 620° e 800°C, ocorrem as reações:



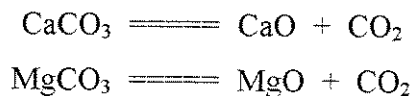
À $\pm 870^\circ\text{C}$, boa parte do CO_2 é reduzida pelo carbono:



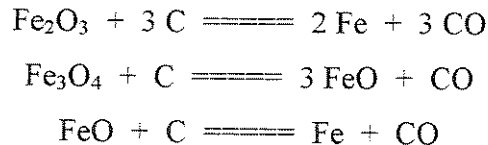
À 900°C , a água combinada restante reage com o carbono e decompõe-se:



A partir de 970°C e até a temperatura da zona das ventaneiras, o calcário é calcinado:



Acima de 1070°C , a redução dos óxidos de ferro é concluída pelo carbono:

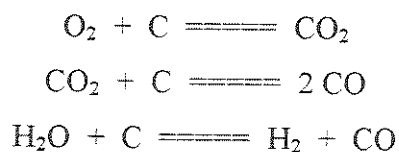


A partir de 1200°C inicia-se a redução dos óxidos de manganês, silício e fósforo, reagindo com o carbono:



Acima de 1350°C tem início a fusão de todos os elementos da carga, menos o coque.

À 1550°C começa a zona de combustão, onde o oxigênio e o vapor de água do ar soprado combinam-se com o carbono do coque para formar hidrogênio e monóxido de carbono:



A 2000°C quase todo o sulfeto de ferro é transformado em sulfeto ácido (dessulfurização do ferro gusa):



Ao final, o ferro reduzido absorve carbono (baixando seu ponto de fusão) e ambos gotejam pelos interstícios do coque incandescente, caindo no cadinho.

4.1.4. Produtos do Alto Forno

Ao final da corrida no alto forno obtém-se: ferro gusa, escória e gás de alto forno.

O gusa líquido deve ser transportado para a aciaria (ou para a máquina de lingotar ou à instalação de granulação) com o mínimo de perdas de calor. Para isso, são usadas panelas de transporte ou, então, vagões torpedo. A utilização de vagões torpedo apresenta maiores vantagens, em relação às panelas, pois diminui o custo de transporte, reduz a perda de calor (já que as panelas são abertas) e aumentam a vida útil do refratário. Além disso, as panelas abertas resistem ao transporte de 5.000 a 25.000 t, enquanto que os vagões torpedo suportam de 50.000 a 350.000 t transportadas entre novos revestimentos (Araújo, 1997).

A escória poderá ser transformada, conforme o resfriamento realizado, em produtos compactos, porosos, vítreos e filamentosos. A escória, que deixa o alto forno a quase 1480°C pode ser esfriada de forma (Araújo, 1997):

- a) lenta, ao ar: formando blocos ou pedaços empregados como lastro na construção de estradas de ferro e rodagem, como agregado para concreto e, quando moídos, como adubo.
- b) rápida, em bastante água: produzindo grãos de areia com propriedades de pega hidráulica, utilizados para a fabricação de cimento, blocos de construção civil e, quando moídos, corretivos de solo.
- c) rápida, com pouca água: obtém-se material poroso usado na construção civil para a fabricação de blocos isolantes, térmicos e acústicos.

d) ao ar ou vapor: forma um produto em longas fibras chamado lã de escória, usada como isolante, tendo boa resistência ao ataque de soluções aquosas.

O gás de alto forno arrasta partículas de minério, coque e cal, havendo necessidade de um sistema de limpeza que consiste em: sistema de despoeiramento, coletor de pó, Venturi ⁸, torre de resfriamento ⁹ e estação redutora de pressão ¹⁰ (Araújo, 1997).

Seu poder calorífico é baixo, quando comparado com o gás de coqueria, pois na sua composição há uma grande concentração de nitrogênio (gás inerte) e uma baixa concentração de hidrogênio (reductor), justamente o contrário do gás de coqueria, como mostra a Tabela 4.1. O consumo do gás de alto forno é realizado parcialmente (cerca de 30%) no próprio alto forno para aquecer os cowpers e o restante, misturado com o gás de coqueria, pode ser aproveitado na central térmica para gerar vapor e energia elétrica, ou ser lançado ao meio ambiente. Parte do gás também pode ser utilizado na coqueria ou nos fornos de reaquecimento da laminação (Araújo, 1997).

Tabela 4.1: Características dos gases de alto forno e de coqueria.

Gases	de Alto Forno (%)	de Coqueria (%)
Análise		
N ₂	55 - 63	4,1 - 6,3
CO	22 - 30	6
CO ₂	6 - 13	2
CH ₄	0,4 - 1,0	26,4
C _m H _n	-	3,1
H ₂	0,5 - 0,9	57,7
Poder calorífico		
kJ/Nm ³	3.140 - 3.768	15.910 - 18.420
kcal/Nm ³	750 - 900	3.800 - 4.400

Fonte: Araújo, 1997.

⁸ Usado para a limpeza das poeiras mais finas.

⁹ Permite reduzir o teor de vapor no gás.

¹⁰ Utilizado para reduzir a pressão aos níveis de utilização nos queimadores.

Em todas as utilizações desse gás na usina ocorre combustão, com transformação de CO e outros hidrocarbonetos em CO₂, e emissão para a atmosfera. Para reduzir a emissão de CO₂ nesta etapa do processo de produção de aço, são apresentadas algumas medidas de conservação de energia, especificamente de redução do consumo de coque ou carvão vegetal (fontes de carbono).

4.1.5. Técnicas para Aumentar a Produtividade

De 1950 a 1975, o consumo específico de coque (“coke rate”) diminuiu de 925 para 550 kg/t gusa e, na década de 80, em fornos grandes, caiu para menos de 450 kg/t gusa. As maiores razões decorreram de desenvolvimentos obtidos com (Araújo, 1997):

- composição e granulometria do coque, onde a diminuição do teor de cinzas e de material volátil, permitem uma alta eficiência no alto forno. O tamanho calibrado do coque, peneirado para tirar os finos abaixo de 25 mm, aumenta a permeabilidade da coluna de carga e o seu ritmo de aquecimento;
- emprego de elevada porcentagem de sinter e pelotas permitindo uma boa permeabilidade dos gases e distribuição uniforme no interior do alto forno. A maioria das usinas usa entre 75 a 85% de sinter, 10 a 20% de pelotas e 5 a 10% de minério bitolado;
- melhor distribuição da carga;
- elevadas temperaturas de sopro: entre 1950 e 1965, a temperatura média de sopro aumentou de 550°C para 815°C, reduzindo o consumo de coque de 75 kg/t gusa. Atualmente utilizam-se temperaturas de sopro entre 1200° a 1250°C;
- injeção de combustíveis através das ventaneiras, aumentando o poder redutor do gás na rampa e substituindo parcialmente o coque por combustíveis mais baratos (gás natural, de coqueria, alcatrão, carvão em pó);
- injeção de oxigênio, onde seu emprego causa aumento da temperatura de combustão na região das ventaneiras, atingindo altas temperaturas de chama. Essas temperaturas mantêm o

equilíbrio térmico na rampa ao injetar-se até 70 kg de óleo combustível/ t gusa. Assim é possível combinar os efeitos da injeção de combustível com a superoxigenação, a fim de aumentar a quantidade de hidrocarbonetos introduzidos pelas ventaneiras. Cada 1% de O_2 aumenta a produção de 2 a 4%, e o enriquecimento pode atingir até 30% de O_2 no sopro;

- operação à alta pressão, que significa maior volume de ar injetado no interior do forno.

No Brasil, a adoção dessas medidas, principalmente a injeção de combustível auxiliar em alto forno associado ao enriquecimento do ar em oxigênio, permitiu que o “coke rate” reduzisse para 426 kg/t gusa em 1997 (IBS, 1998). Por isso, analisa-se a seguir essa medida com mais detalhes.

4.2. Injeção de Combustível Auxiliar em Alto Forno

Muitas usinas siderúrgicas, espalhadas por todo o mundo, possuem sistemas de injeção de combustíveis auxiliares em altos fornos. Além de reduzir o consumo de coque (ou de carvão vegetal), essa medida permite aumentar a produtividade, diminuir o custo final do ferro gusa e reduzir as emissões de CO_2 . Entretanto, apesar de tecnicamente viável, sua implantação está sujeita à viabilidade econômica, que depende basicamente dos preços de coque (ou de carvão vegetal), de combustível auxiliar e de oxigênio.

Muitos combustíveis como: gás natural, gás de coqueria, alcatrão, óleo combustível e carvão pulverizado, podem ser injetados através das ventaneiras do alto forno. Como os calores das reações são diferentes para, por exemplo, metano, óleo ou carvão, e diminuem com o crescimento da proporção C:H na molécula, pode-se soprar mais carvão que óleo e mais óleo que gás natural (Araújo, 1997)

A injeção de gás natural permite que, além do carbono contido no gás substituindo o da carga de coque, seja aproveitado também o hidrogênio dissociado como redutor. Os dados de operação mostram que 30 m³ de gás natural/t gusa, reduzem o “coke rate” de 50 kg e aumentam a produção do forno em aproximadamente 3% (Araújo, 1997).

O emprego de 30 m³ de gás de coqueria/t gusa resultam na economia de 13 kg de coque. Entretanto, sua utilização tem sido limitada pela dificuldade de encontrar excesso de gás na usina e pela necessidade de instalação de compressores de operação delicada (Araújo, 1997).

A injeção de óleo combustível varia entre 50 e 150 kg/t gusa. Em geral, pode-se afirmar que, ao injetar cerca de 15 kg de óleo para cada 1.000 m³ de vento, 1,0 kg de óleo permite poupar 1,5 a 2,0 kg de coque. Na prática, isto significa uma economia de coque da ordem de 10% e um aumento na produção de cerca de 7% (Araújo, 1997).

A injeção de finos de carvão é uma realidade e atualmente pode-se encontrar, em algumas usinas, taxas de injeção da ordem de 150 kg/t gusa (Sampaio, 1993 a). Uma das vantagens desse combustível é que o carvão usado não precisa ter características de qualidade como as exigidas para a produção de coque. Isto torna o carvão pulverizado um excelente substituto a outros mais caros, como óleo combustível e gás natural. Os inconvenientes da injeção de finos de carvão são o maior custo da moagem e secagem desse combustível, a abrasão nas tubulações e a necessidade de ar seco para transportar o carvão.

4.2.1. Efeito da Injeção de Combustível Auxiliar em Alto Forno

A injeção de combustível auxiliar gera uma série de alterações no interior do alto forno, cujos efeitos devem ser bem conhecidos para que se possa extrair o máximo de benefício dessa medida de conservação de energia.

4.2.1.1. Temperatura de Chama

Corresponde à temperatura com que os gases saem da zona de combustão, região próxima às ventaneiras onde é injetado ar quente. Nessa região, ocorre a combustão do coque e, eventualmente, algum combustível injetado. Esta temperatura é calculada através de balanços de massa e térmico, sendo normalmente consideradas condições adiabáticas. Desse modo, a temperatura de chama calculada é sempre maior que a real (Tavares, 1993).

Qualquer variação no seu valor afeta os níveis térmicos no interior do alto forno, influenciando na temperatura de gusa e escória e na incorporação de elementos ao gusa, especialmente silício. O aumento da temperatura de chama provoca o aumento do nível térmico do forno e do volume de gases gerados na zona de combustão. Como a quantidade de vazios disponível para o gás passar continua a mesma, a velocidade do gás cresce levando ao aumento da força de fricção entre gás e sólido e a queda de pressão do gás. Como consequência, pode haver uma descida irregular da carga e redução da eficiência do processo (Tavares, 1993).

Normalmente, a injeção de combustível auxiliar gera o resfriamento da zona de combustão e conseqüentemente, a diminuição da temperatura de chama. Essa queda pode limitar a taxa de injeção, uma vez que força o aumento do consumo de coque, reduzindo a economicidade do processo. Para manter o seu controle, pode-se diminuir a quantidade de vapor injetado (secagem do ar), aumentar a temperatura de sopro ou enriquecer o ar em oxigênio, sendo essa última medida normalmente adotada. A experiência prática comprova que o aumento da temperatura de sopro provoca uma elevação da temperatura de chama, em função da manutenção do balanço térmico (Tavares, 1993).

Além de assegurar o controle da temperatura de chama, o enriquecimento do ar em oxigênio se mostra muito eficiente para o aumento da produção (Toxopeus, 1996). Ele pode ser melhor entendido se for considerado como empobrecimento em nitrogênio. O nitrogênio atua removendo calor na zona de combustão, pois a temperatura de sopro é inferior à temperatura de chama. Ao se empobrecer o ar em nitrogênio (enriquecê-lo em oxigênio) está sendo retirada uma quantidade de material que remove calor da zona de combustão, havendo conseqüentemente a tendência de aumentar a temperatura de chama.

4.2.1.2. Permeabilidade

Esse parâmetro serve para quantificar a facilidade de escoamento dos gases no alto forno. Quanto maior a permeabilidade, mais fácil é esse escoamento e maior é a produtividade. Os fatores que afetam a permeabilidade são (Oliveira, 1993):

- distribuição de tamanho dos componentes da carga, onde a menor dispersão aumenta a quantidade de vazios entre as partículas (grande dispersão faz com que as partículas menores se acomodem nos vazios existentes entre as maiores), aumentando a permeabilidade. Um maior tamanho médio de carga também leva a um aumento da mesma;
- proporção de carga metálica e coque, onde seu efeito pode ser percebido ao se considerar o tamanho médio desses materiais. A carga metálica possui tamanho médio entre 10 e 20 mm, enquanto o coque, em torno de 50mm. Ou seja, o coque é um material mais permeável que a carga metálica;
- resistência mecânica dos componentes da carga, cuja elevação favorece o aumento da permeabilidade pois reduz a degradação dos materiais e a geração de finos. Nesse aspecto, a utilização de sinter e pelotas em lugar do minério de ferro acarreta um aumento na permeabilidade do alto forno.

A injeção de combustível auxiliar proporciona uma economia de coque, aumentando a razão entre volume de carga metálica e volume de coque. Assim há uma redução da permeabilidade global. Essa queda pode levar à degradação da marcha do alto forno e até à perda da produção de gusa, constituindo um limite à injeção.

A diminuição da permeabilidade pode ser resolvida através da melhoria na qualidade da carga do alto forno, tanto em termos de distribuição granulométrica quanto à sua resistência mecânica; e da adequação de sua distribuição, aumentando a espessura da camada de carga metálica (Oliveira, 1993).

4.2.1.3. Controle Térmico e Qualidade do Gusa

O empilhamento de coque (ou de carvão vegetal) no alto forno representa uma reserva interna de energia, chamada de “homem morto”. Quando se diminui o consumo de carbono da carga, diminui-se também a altura do “homem morto”. Assim, qualquer erro no cálculo da carga de combustível pode levar ao risco de resfriamento no alto forno. A injeção de combustível

auxiliar atua, neste caso, como uma reserva térmica de energia, permitindo que se possa corrigir rapidamente o problema de resfriamento (Oliveira, 1993).

A incorporação de silício ao gusa e a dessulfuração desse metal ocorre durante o percurso ao longo do homem morto. Como a injeção de combustível auxiliar permite diminuir e estabilizar a altura do homem morto, ocorre uma redução do teor médio de silício e decréscimo no desvio padrão de carbono, silício e enxofre. Assim, há uma melhoria na qualidade do gusa (Oliveira, 1993).

4.2.1.4 Consumo de Coque: Taxa de Substituição

A injeção de combustível auxiliar pelas ventaneiras permite a redução do consumo de coque, expressa por um índice chamado de taxa de substituição. Essa taxa representa a relação entre a massa de redutor economizado e massa de combustível auxiliar injetado, correspondendo à equação abaixo (Oliveira, 1993):

$$T_{sb} = \frac{\Delta M_c}{\Delta M_{ci}} \quad (\text{Equação 4.1})$$

onde: T_{sb} = taxa de substituição,

ΔM_c = massa de coque economizado (kg/t gusa),

ΔM_{ci} = massa de combustível auxiliar injetado (kg/t gusa).

A economia de energia conseguida com a injeção de combustível auxiliar não é determinada apenas pela substituição de um combustível por outro. Deve-se levar em conta também as alterações ocorridas no alto forno associadas ao (Oliveira, 1993):

- tempo de residência da carga metálica, que corresponde ao tempo necessário para a carga percorrer a zona de preparação, desde o topo do alto forno até a entrada da zona de elaboração. Estudos mostram que a injeção de combustível auxiliar aumenta o tempo de residência e, conseqüentemente, a extensão da reação química. Dessa forma, há uma redução mais pronunciada da carga metálica na zona de preparação, onde ocorre sem consumo de carbono.

Quanto mais se conseguir reduzir nessa zona, menor será o consumo global de carbono do forno e mais baixo será seu consumo total de energia;

- teor de hidrogênio nos gases, que normalmente é aumentado com a injeção de combustível auxiliar. Esse aumento é importante, pois a redução da carga metálica pelo hidrogênio é cerca de cinco vezes mais rápida que a redução pelo CO. Isso favorece a maior redução da carga na zona de preparação do alto forno, aumentando a redução indireta (sem consumo de carbono) e reduzindo a redução direta. Assim, há a diminuição do consumo de coque;
- taxa de injeção de combustível, que leva à redução da taxa de substituição. O aumento da quantidade de combustível injetado dificulta sua queima integral na zona de combustão, não havendo o aproveitamento total de seu poder calorífico. O enriquecimento do ar soprado com oxigênio pode proporcionar a queima total do combustível auxiliar até um valor limite da taxa de injeção. O valor máximo da taxa de injeção não pode ser fornecido com precisão, pois depende de parâmetros operacionais e econômicos (custo do coque, do combustível auxiliar e do oxigênio), sendo que estes últimos variam continuamente.

A intensidade com que esses fatores afetam à economia da quantidade de coque irá determinar o valor final da taxa de substituição.

Capítulo 5

Estudo de Casos

A injeção de combustível auxiliar em alto forno, acompanhada de enriquecimento do ar com oxigênio, já é uma medida realizada pelas grandes usinas siderúrgicas nacionais em função do aumento de produtividade atingido, da redução do consumo específico de combustível enornado e, como consequência, da diminuição do preço final do ferro gusa. Entretanto, para analisar a redução de emissão de CO_2 é necessário saber mais detalhes sobre a injeção e o tipo de combustível auxiliar a ser utilizado. Então, decidiu-se realizar uma pesquisa de campo onde foram colhidas informações sobre taxa de injeção, taxa de substituição, consumo específico de redutor, produção anual de aço e outras informações necessárias para o cálculo. Para tanto, foram escolhidas duas usinas siderúrgicas de grande representatividade na produção nacional de aço: a ACESITA (Cia. Aços Especiais Itabira), à carvão vegetal, e a COSIPA (Cia. Siderúrgica Paulista), à coque de carvão metalúrgico. Todas as informações apresentadas foram obtidas nas próprias usinas e os cálculos e as análises realizadas serão mostrados adiante.

5.1. ACESITA

A ACESITA, é a única siderúrgica da América do Sul produtora de aços planos especiais (inoxidável e silício). Atualmente, ela tem um contrato assinado com o grupo francês Usinor, quarto lugar no mundo em volume de produção e segundo em faturamento, que o transforma no maior acionista individual da siderúrgica (ABM, 1998 c) . O grupo se responsabiliza pela direção operacional, gestão industrial e comercial da ACESITA, que espera ser beneficiada pela

transferência de tecnologia industrial, de pesquisa e desenvolvimento, além da possibilidade de acesso aos mercados externos através da rede comercial mundial da Usinor (ABM, 1998 d).

A usina se localiza em Timóteo, Minas Gerais. Até 1996, ela operava utilizando carvão vegetal nos dois altos fornos existentes, configurando-se como usina integrada à carvão vegetal. Entretanto, com a pressão da legislação ambiental que exige a utilização no setor industrial de carvão vegetal proveniente de reflorestamento e não mais de mata nativa; a falta de uma área reflorestada que suprisse a capacidade instalada de seus altos fornos e a falta de subsídios para o reflorestamento, a ACESITA viu-se obrigada a converter, em 1996, seu alto forno 2 à coque de carvão metalúrgico.

Mesmo com a utilização de coque, a usina não optou pela construção de uma coqueria, preferindo importar esse energético do Japão. Assim, ela não emite carbono na etapa de coqueificação do carvão mineral, mas também não aproveita o potencial energético do gás de coqueria, que possui poder calorífico bem maior que do gás de alto forno.

O fornecimento de carvão vegetal para o alto forno 1, de menor capacidade, é garantido pelos 90.000 ha. de área florestal mantidos no Vale do Rio Jequitinhonha, na região entre Itamarandiba, Turmalina e Minas Novas.

5.1.1. Processo de Produção

A usina opera cerca de 350 dias/ano, produzindo ferro gusa nos seus dois altos fornos e pré-metal em dois fornos elétricos a arco (FEA). A etapa de refino é realizada em conversor LD, produzindo aço carbono e silício; e conversor MRPL (que tem fundo removível e injeta gás inerte – argônio ou nitrogênio), produzindo aço inox. O aço produzido em ambos conversores é levado à metalurgia de panela e segue para o lingotamento. Na usina são realizados os dois tipos de lingotamento: convencional e contínuo. Parte do aço carbono é lingotado de forma convencional e a outra parte, juntamente com aço silício e inox, é lingotado de forma contínua.

O lingote produzido em lingotamento convencional é levado para a etapa de laminação, que consiste em reaquecimento em fornos-poço e laminação no debastador. Em seguida é realizado outro reaquecimento e a laminação propriamente dita, gerando barras. Já as placas produzidas em lingotamento contínuo são levadas direto aos fornos de reaquecimento e passam pelo laminador debastador e pelo laminador acabador. Por fim, são bobinadas e levadas ou não, dependendo da especificação do cliente, para a laminação a frio.

O gás de alto forno gerado na etapa de redução é aproveitado em toda a usina. Um terço é enriquecido com GLP, para atender a demanda energética, e utilizado para aquecer os regeneradores do próprio alto forno. Outra terça parte é também enriquecida com GLP e consumida em outras partes do processo (como por exemplo nos fornos de reaquecimento da etapa de laminação). A última terça parte é queimada e emitida para a atmosfera pois não há demanda na usina, nem mesmo para ser aproveitado na geração de energia elétrica. Isso porque ela possui, desde 1950, uma hidrelétrica, reformada em 1998, localizada no Rio Piracicaba e que supre boa parte da energia elétrica demandada, ficando o restante fornecido pela concessionária.

5.1.2. Injeção de Carvão Vegetal Pulverizado (ICVP)

A injeção de carvão vegetal pulverizado na ACESITA iniciou-se em 1982, quando os dois altos fornos ainda operavam a carvão vegetal. O peneiramento do carvão bruto gerava finos de carvão vegetal (em torno de 20%) que, em função de sua baixa granulometria, não podem ser carregados pelo topo do alto forno por problemas de permeabilidade. O armazenamento desses finos levavam ao sério risco de ocorrer acidentes como explosões, devido a sua alta reatividade e fácil combustão espontânea. Assim, passou-se a injetar esses finos pelas ventaneiras do alto forno. Depois, a melhoria da produtividade e a redução do consumo específico de carvão granulado enornado, ou seja vantagens econômicas e ambientais, fizeram com que essa medida se tornasse imprescindível à sua produção de aço.

Atualmente esses finos de carvão vegetal provêm não só do peneiramento do carvão bruto, mas também do aproveitamento do pó em alguns equipamentos (coletores, etc..) e da troca, com a

empresa Belgo Mineira, com finos de coque para utilização em sinterização. Esses finos devem ainda passar por um sistema de secagem e moagem e seguir para o sistema de injeção.

A etapa de moagem e secagem é realizada em um moinho, onde o carvão carregado é simultaneamente secado e pulverizado. A secagem é efetuada pelo gás fornecido pelo gerador de gás quente, que no caso da ACESITA é queimado gás de alto forno enriquecido com GLP. A mistura carvão pulverizado, gás de secagem e água evaporada é movimentada pelo fluxo criado por exaustores. Logo na saída do moinho a mistura passa pelo classificador, que capta as partículas com granulometria acima do valor desejado (no caso 70% menor de 200 mesh - em torno de 19 mm), sendo as mesmas devolvidas ao moinho. Parte do carvão passante é captado em um ciclone, parte é recirculado no circuito primário (moinho/classificador/ciclone exaustor) e parte é enviada ao filtro de mangas no chamado circuito secundário (filtro/exaustor). O que passar pelo ciclone é levado ao silo de carvão pulverizado (Cunha et al, 1993).

A ACESITA injeta carvão vegetal pulverizado em ambos os altos fornos a carvão vegetal e a coque de carvão mineral. Inicialmente analisa-se a injeção de carvão vegetal pulverizado, no alto forno que utiliza carvão vegetal e em seguida no alto forno que utiliza coque de carvão metalúrgico. Em seguida é realizado o cálculo das emissões de CO₂, a partir do consumo energético da usina, e da emissão evitada com a ICP em 1997.

5.1.2.1. Alto Forno a Carvão Vegetal

A injeção de carvão vegetal pulverizado proporciona a redução do consumo de carvão vegetal enornado e o aumento da produtividade da usina. Para calcular a redução do consumo específico de carvão vegetal, foram utilizadas as informações da Tabela 5.1, obtidas na própria usina.

Tabela 5.1: Informações sobre a injeção de carvão vegetal pulverizado no alto forno 1, a carvão vegetal, da ACESITA em 1997.

Dados	Alto forno 1 (carvão vegetal)
Produção de ferro gusa com injeção (tgusa) - $P_{c/inj.}$	185.000
Consumo específico de carvão vegetal (CV) enornado com injeção e aumento de produtividade (tCV/tgusa) - $C_{c/inj+Ptv.}$	0,418
Taxa de injeção (tCVfino/tgusa) - $T_{inj.}$	0,154
Taxa de substituição (tCV enornado/tCVfino) - $T_{subst.}$	0,90
Aumento de produtividade - Ptv	0,20 (máx.)

Fonte: ACESITA.

Para entender melhor os cálculos que serão apresentados a seguir, é preciso imaginar que não está sendo realizada nenhuma injeção. Então existe um consumo específico de carvão vegetal ($C_{s/inj.}$) e uma produção (P), ambos sem injeção. A partir do momento que se inicia a injeção, o novo consumo específico pode ser calculado pela Equação 5.1:

$$C_{c/inj.} = C_{s/inj.} - (T_{subst.} * T_{inj.}) \quad (\text{Equação 5.1})$$

Esse novo consumo específico permite calcular o consumo total de carvão vegetal enornado (C) com a ICVP para a produção (P). A Equação 5.2 mostra esse consumo:

$$C = C_{c/inj.} * P \quad (\text{Equação 5.2})$$

Entretanto, a ICVP promove aumento de produtividade, que é calculado pela Equação 5.3:

$$P_{c/inj.} = P * (1 + Ptv) \quad (\text{Equação 5.3})$$

É importante notar que o aumento de produtividade ocorre sem alterar o consumo total de carvão vegetal enornado (C). Assim, o consumo específico vai ser modificado e poderá ser encontrado através da Equação 5.4:

$$C_{c/inj.+Ptv} = \frac{C}{P_{c/inj.}} \quad (\text{Equação 5.4})$$

O novo consumo específico, que acaba de ser encontrado, inclui a ICVP e o aumento de produtividade e corresponde ao valor apresentado na Tabela 5.1.

Para determinar a economia de carvão vegetal enornado com a ICVP (e o respectivo aumento de produtividade), é necessário encontrar o consumo específico sem ICVP ($C_{s/inj.}$), ou seja, aquele no início de nossa explicação. Assim, terá que ser feito exatamente o cálculo inverso que o apresentado.

Inicia-se calculando o consumo total de carvão vegetal enornado com a ICVP (C), que pode ser obtido pela Equação 5.5:

$$C = C_{c/inj. + Ptv} * P_{c/inj.} \quad (\text{Equação 5.5})$$

Com os dados da Tabela 5.1, encontra-se:

$$C = 77.330 \text{ t CV enornado}$$

Em seguida, determina-se a produção sem aumento de produtividade (P) pela Equação 5.6:

$$P = \frac{P_{c/inj.}}{(1 + Ptv)} \quad (\text{Equação 5.6})$$

Substituindo os valores apresentados na Tabela 5.1, conclui-se que:

$$P = 154.167 \text{ t gusa}$$

Para encontrar o consumo específico de carvão vegetal considerando apenas a injeção ($C_{c/inj.}$), utiliza-se a Equação 5.7:

$$C_{c/inj.} = \frac{C}{P} \quad (\text{Equação 5.7})$$

Substituindo os valores encontrados anteriormente na Equação 5.7, tem-se que:

$$C_{c/inj.} = 0,502 \text{ t CV/t gusa}$$

Com o consumo específico que acaba de ser encontrado, pode ser calculado o consumo específico sem a ICVP ($C_{s/inj.}$), através da Equação 5.8:

$$C_{s/inj.} = C_{c/inj.} + (T_{subst.} * T_{inj.}) \quad (\text{Equação 5.8})$$

Ao substituir os valores na Equação 5.8, chega-se a conclusão de que:

$$C_{s/inj.} = 0,641 \text{ t CV/ t gusa}$$

O consumo específico sem ICVP encontrado é constante, ou seja, deve ser utilizado para qualquer produção, uma vez que só depende do consumo de carvão vegetal enornado e da produção de gusa (não sofrendo interferência da ICVP). A partir desse valor, pode-se determinar a economia de carvão vegetal enornado através da Equação 5.9:

$$E = P_{c/inj.} * (C_{s/inj.} - C_{c/inj.-Plv.}) \quad (\text{Equação 5.9})$$

Substituindo os valores já encontrados, conclui-se que a economia de carvão vegetal enornado com a ICVP em 1997 na ACESITA é:

$$E = 41.255 \text{ t CV enornado}$$

Este valor representa cerca de 35% do consumo total de carvão vegetal enornado pela usina caso não houvesse ICVP (que seria de 118.585 t CV para produzir 185.000 t gusa) em 1997.

Como a densidade do carvão vegetal enornado (granulado) é $0,23 \text{ t/m}^3$ (fornecida pela ACESITA), a economia desse energético com a ICVP em 1997 é de 179.370 m^3 CV enornado. A relação entre o CV enornado (granulado) e o CV bruto é de 1,819 : 2,663. Assim, a economia de CV bruto obtida com a ICP em 1997 é da ordem de 262.600 m^3 .

De acordo com as informações obtidas na ACESITA, um hectare comporta cerca de 155 m^3 de CV bruto. Então, a economia de 262.600 m^3 CV bruto representa uma economia de utilização de 1.694 ha. de terra plantada. A reserva energética da ACESITA é de cerca de 90.000 ha., onde a ICVP em 1997 permite uma economia de utilização de cerca de 2%.

Em um espaçamento 3x2 (m) pode existir cerca de 1.600 eucaliptos plantados/ha. Portanto, a ICVP em 1997 permite uma economia no corte de mais de 2,7 milhões de eucaliptos.

5.1.2.2. Alto Forno a Coque de Carvão Metalúrgico

O cálculo para contabilizar a economia do consumo de coque de carvão metalúrgico na usina com a ICVP é realizada da mesma forma que no alto forno a carvão vegetal, utilizando, neste caso, as informações específicas da produção no alto forno a coque. As informações apresentadas na Tabela 5.2 foram obtidas na ACESITA e referem-se ao ano de 1997.

Tabela 5.2: Informações sobre a injeção de carvão vegetal pulverizado no alto forno 2, a coque, da ACESITA em 1997.

Dados	Alto forno 2 (coque de carvão mineral)
Produção de ferro gusa com injeção (tgusa) - $P_{c/inj}$	377.600
Consumo específico de coque (tcoque/tgusa) com injeção e aumento de produtividade - $C_{c/inj+Ptv}$	0,458
Taxa de injeção (tCVfino/tgusa) - T_{inj}	0,120
Taxa de substituição (tcoque/tCVfino) - T_{subst}	0,75
Aumento de produtividade - P_{tv}	0,20 (máx.)

Fonte: ACESITA.

Da mesma forma que no alto forno a carvão vegetal, a produção de ferro gusa no alto forno a coque em 1997 já inclui a injeção de carvão vegetal pulverizado (ICVP). Para calcular o consumo total de coque em 1997 com a ICVP (C) é utilizada a Equação 5.5. Substituindo os valores encontrados na Tabela 5.2, conclui-se que:

$$C = 172.941 \text{ t coque}$$

Em seguida, é determinada a produção de gusa sem aumento de produtividade (P) através da Equação 5.6. Utilizando os valores disponíveis na Tabela 5.2, tem-se que:

$$P = 314.667 \text{ t gusa}$$

Para encontrar o consumo específico de coque considerando apenas a injeção ($C_{c/inj}$) aplicam-se os valores, até então encontrados, na Equação 5.7. Obtém-se que:

$$C_{c/inj} = 0,550 \text{ t coque/t gusa}$$

Com esse consumo específico é possível calcular o consumo específico sem a ICVP pela Equação 5.8. Substituindo os valores da Tabela 5.2 e o encontrado, tem-se que:

$$C_{s/inj} = 0,640 \text{ t coque/t gusa}$$

O valor encontrado é considerado constante, ou seja, deve ser utilizado para qualquer produção. Assim, pode-se determinar a economia de coque com a ICVP (e respectivo aumento de produtividade) utilizando a Equação 5.9. e os valores encontrados. Conclui-se que:

$$E = 68.723 \text{ t coque}$$

Este valor representa 28% do consumo total de coque de carvão metalúrgico na ACESITA caso não houvesse injeção (que seria 241.664 t coque para produzir 377.600 t gusa) em 1997.

5.1.3. Cálculo da Emissão Evitada de CO₂ na ACESITA com a ICVP em 1997

A partir de informações, tomadas na própria ACESITA, sobre seu consumo energético em 1997, foi possível calcular as emissões de CO₂ da usina. Utiliza-se a mesma metodologia adotada para calcular as emissões setoriais do Estado de São Paulo, com os fatores de emissão sugeridos pelo IPCC e o poder calorífico inferior fornecido pelo Balanço Energético do Estado de São Paulo (BEESP, 1997). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Emissão de CO₂ da ACESITA em 1997.

Energéticos	Consumo	Fator emissão	Emissão “C”	Emissão “C”	Fração “C” Oxidada	Emissão “C”	Emissão “CO ₂ ”
	(TJ)	(tC/TJ)	(tC)	(Gg)		(Gg)	(Gg)
Coque	5.723	27,5	157.395,6	157,4	0,99	155,82	571,35
Ól. Combustível	682	21,1	14.393,2	14,4	0,99	14,25	52,25
Ól. Diesel	309	20,1	6.249,3	6,2	0,99	6,19	22,69
GLP	1.357	17,2	23.340,4	23,3	0,99	23,11	84,73
TOTAL						199,37	731,02

Fonte: Própria.

Com a injeção de carvão vegetal pulverizado pelas ventaneiras, constata-se o aumento de produtividade e redução do consumo específico de carvão vegetal, no alto forno 1, e de coque, no alto forno 2, já calculados anteriormente. Aplicando a mesma metodologia utilizada para contabilizar as emissões da ACESITA em 1997, pôde ser encontrada a emissão evitada com a adoção da ICVP, apresentada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Emissão evitada de CO₂ com a ICVP adotada na ACESITA em 1997.

Energéticos	Consumo evitado (TJ)	Fator emissão (tC/TJ)	Emissão “C” (tC)	Emissão “C” (Gg)	Fração “C” Oxidada	Emissão “C” (Gg)	Emissão “CO ₂ ” (Gg)
Coque	-1.985	27,5	-54.587,5	-54,6	0,99	-54,04	-198,15
Carvão vegetal	-1.056	29,9	-31.574,4	-31,6	1,00	-31,57	-115,78

Fonte: Própria.

O resultado obtido mostra que a ICVP pode ser considerada uma medida de redução das emissões de CO₂ para o segmento siderúrgico. Sua adoção na ACESITA em 1997 acarretou uma emissão evitada de 198 GgCO₂ (54 GgC) no alto forno 2 (coque), que corresponde a cerca de 27% da emissão total no mesmo ano.

Além disso, conclui-se que a ICVP pode proporcionar não apenas uma emissão evitada, mas também a absorção de CO₂ decorrente do uso de carvão vegetal. De acordo com informações da ACESITA, é realizada uma estimativa do consumo de carvão vegetal para o ano, incluindo uma reserva no caso de aumento da produção ou imprevistos. Assim, é realizado o corte das árvores com base nessa estimativa de consumo. Ao final de sete anos, o tronco é cortado e volta a brotar, absorvendo CO₂. Depois de realizado três cortes, totalizando um ciclo de 21 anos, a árvore não é mais utilizada. A absorção de CO₂ estará na reserva incluída na estimativa e que não foi utilizada, representando um importante sumidouro desse gás que deve ser considerado.

5.2. COSIPA

A COSIPA fica localizada em Cubatão, São Paulo, a 70 km do maior pólo econômico do país e possui um porto privado próprio que a coloca em posição privilegiada na rota do Mercosul. Ela é responsável por 14% da produção nacional de aço. Sua linha de produtos é composta por placas, chapas grossas, laminados quente e laminados frio. Ao contrário das placas, um produto primário dentro da siderurgia que tem 96% da produção da COSIPA destinada ao mercado externo, os laminados frio representam a linha nobre e têm 98% da produção absorvidos no mercado interno, principalmente entre os fabricantes de autopeças, móveis e utilidades domésticas, embalagens e montadoras de veículos.

Trinta anos após ter permanecido como estatal, a COSIPA retornou à iniciativa privada em 20 de agosto de 1993, quando foram leiloadas, na Bolsa de Valores de São Paulo, 80% das ações ordinárias. Foram assegurados outros 15% aos funcionários da empresa, através do Clube de Investimentos dos Empregados da COSIPA, e 5% à Fundação COSIPA de Seguridade Social.

Nessa época, o controle acionário da empresa ficou com o grupo liderado pela Brastubo Construções Metálicas S.A., pelo Banco Bozano Simonsen S.A. e por um consórcio de clientes. A busca por um suporte tecnológico e financeiro ensejou o oferecimento de participação na sociedade à Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais (USIMINAS), que adquiriu 49,78% das ações ordinárias.

5.2.1. Processo de Produção

A COSIPA é classificada como usina integrada a coque de carvão metalúrgico. Ela realiza todas as três etapas da produção de aço: redução, refino e laminação. Na primeira etapa, o ferro gusa é produzido em dois altos fornos abastecidos com coque, minério de ferro e fundentes. O coque é gerado na planta de coqueria, composta por cinco baterias de fornos. Infelizmente, o coque produzido não supre as necessidades dos altos fornos, sendo necessário importá-lo. O minério de ferro é enornado sob a forma de sinter, produzido na planta de sinterização da usina.

Em seguida, o ferro gusa produzido passa pela etapa de refino, constituída de dois conversores LD (que o transformam em aço), da metalurgia secundária (onde são ajustadas as composições de algumas substâncias) e do lingotamento. Na usina é realizado tanto o lingotamento convencional quanto o lingotamento contínuo.

Na última etapa, os lingotes provenientes do lingotamento convencional são reaquecidos em forno-poço e laminados em placas. Do lingotamento contínuo já saem placas, que se juntam às formadas pelo lingotamento convencional e seguem em direção ao forno contínuo de reaquecimento. Dependendo da demanda, são produzidas chapas grossas ou tiras. Para produzir chapas grossas, as placas reaquecidas no forno contínuo são levadas ao laminador de chapas grossas, à linha de tesouras (que dá acabamento às placas) e também ao tratamento térmico.

Para produzir tiras, as placas provenientes do forno contínuo de reaquecimento passam pelo laminador de tiras a quente e podem: ser levadas à linha de tesouras para produzir chapas finas a quente; ou ser laminadas no laminador de acabamento e bobinadas, gerando bobinas a quente. Dependendo da especificação do cliente, as bobinas podem passar para a área de laminação a frio, onde são decapadas, laminadas e rebobinadas (formando bobinas a frio) ou cortadas pela linha de tesouras (produzindo chapas finas a frio).

5.2.2. Injeção de Gás Natural

A injeção de gás natural nos altos fornos da COSIPA iniciou-se em 1994, com o objetivo de reduzir o consumo específico de coque para reduzir também a importação desse energético. Ela serviu como ponto de partida para a posterior injeção de carvão mineral pulverizado, que iniciou-se em junho deste ano. Como a injeção de carvão pulverizado ainda está na fase inicial, onde estão sendo injetados cerca de 100kg/tgusa, e espera-se dobrar a taxa de injeção atual, serão analisadas as emissões evitadas com a injeção apenas de gás natural nos altos fornos.

Inicialmente é realizado o cálculo da redução do consumo de coque nos dois altos fornos da COSIPA com a prática de injeção de gás natural em 1997. Em seguida, é contabilizada a emissão de CO₂, a partir do consumo energético da usina, e a emissão evitada com a injeção de gás natural no mesmo ano.

5.2.2.1. Altos Fornos a Coque de Carvão Metalúrgico

A partir das informações obtidas na visita a COSIPA quanto a produção de ferro gusa; taxas de injeção de gás natural e de substituição; e produtividade, é realizado o cálculo da economia do consumo de coque nos altos fornos 1 e 2 da usina. Esses dados estão apresentados na Tabela 5.5. A metodologia aplicada ao cálculo da redução de consumo de combustível na ACESITA é aplicada também na COSIPA.

Tabela 5.5: Informações sobre a injeção de gás natural (GN) nos altos fornos a coque, da COSIPA em 1997.

Dados	Alto forno 1	Alto forno 2
Produção de ferro gusa com injeção (tgusa) - $P_{e/inj}$	1.449.580	2.206.834
Consumo específico de coque com injeção e aumento de produtividade (tcoque/tgusa) - $C_{e/inj+Ptv}$	0,484	0,467
Taxa de injeção (tGN/tgusa) - T_{inj}	0,0231	0,0282
Taxa de substituição (tcoque/tGN) - T_{subst}	1,20	1,20
Aumento de produtividade - Ptv	0,07	0,09

Fonte: COSIPA.

A taxa de produtividade adotada para o cálculo foi obtida pela regressão linear da taxa de injeção x produtividade em trabalho realizado pela COSIPA (Martins et al, 1996).

Nos cálculos apresentados a seguir, está definido que todos os índices com número 1 se referem ao alto forno 1, e conseqüentemente, todos com número 2 se referem ao alto forno 2.

A produção de ferro gusa e o consumo específico de coque nos dois altos fornos, apresentados na Tabela 5.5, já incluem a injeção de gás natural e o respectivo aumento de produtividade. Para determinar o consumo específico de coque nos altos fornos sem a injeção é necessário seguir os passos apresentados a seguir (cuja explicação está apresentada na seção 5.1.2.1).

Inicialmente, é calculado o consumo total de coque com a injeção, em 1997, através da Equação 5.5. Substituindo os valores da Tabela 5.5, tem-se que:

$$C1 = 701.597 \text{ t coque}$$

$$C2 = 1.030.591 \text{ t coque}$$

Em seguida, é definida a produção de ferro gusa caso não houvesse aumento de produtividade. Para tanto, utiliza-se a Equação 5.6 e os dados da Tabela 5.5, onde conclui-se que:

$$P1 = 1.354.748 \text{ t gusa}$$

$$P2 = 2.024.618 \text{ t gusa}$$

O consumo específico de coque sem considerar o aumento de produtividade é calculado pela Equação 5.7. Aplicando os valores encontrados na equação, obtém-se:

$$C1_{c/inj.} = 0,518 \text{ t coque/t gusa}$$

$$C2_{c/inj.} = 0,509 \text{ t coque/ t gusa}$$

Com esses valores é possível calcular o consumo específico sem a injeção de gás natural nos dois altos fornos. Para tanto, é utilizada a Equação 5.8, onde conclui-se que:

$$C1_{s/inj.} = 0,546 \text{ t coque/t gusa}$$

$$C2_{s/inj.} = 0,543 \text{ t coque/ t gusa}$$

O consumo específico sem injeção deve ser considerado constante já que depende apenas do consumo de coque e da produção de ferro gusa. A economia de redução do consumo de coque com a injeção é determinada pela Equação 5.9. Substituindo os valores encontrados, têm-se:

$$E1 = 89.874 \text{ t coque}$$

$$E2 = 167.719 \text{ t coque}$$

Assim, a economia total no consumo de coque nos dois altos fornos em 1997 é definida pela Equação 5.10:

$$E = E1 + E2 \quad (\text{Equação 5.10})$$

Aplicando os respectivos valores encontrados, obtém-se:

$$E = 257.593 \text{ t coque.}$$

Considerando que a relação de carvão metalúrgico:coque seja 1:0,775, informação esta obtida na COSIPA, a economia em 1997 é de:

$$E = 332.378 \text{ t carvão metalúrgico}$$

Este valor representa 13% do consumo total de carvão metalúrgico na COSIPA caso não houvesse injeção nos dois altos fornos (que seria de 2.567.460 t de carvão metalúrgico) em 1997.

5.2.3. Cálculo da Emissão Evitada de CO₂ na COSIPA com a Injeção de Gás Natural em 1997

Inicialmente são contabilizadas as emissões de CO₂ da COSIPA a partir do seu consumo energético em 1997 (Fernandez et al, 1998). Para tanto, é utilizada a mesma metodologia adotada para calcular as emissões setoriais do Estado de São Paulo e da ACESITA, com os fatores de emissão sugeridos pelo IPCC e o poder calorífico inferior obtido no Balanço Energético do Estado de São Paulo (BEESP, 1997). Os resultados encontrados estão na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Emissão de CO₂ da COSIPA em 1997.

Energéticos	Consumo (TJ)	Fator emissão (tC/TJ)	Emissão "C" (tC)	Emissão "C" (Gg)	Fração "C" Oxidada	Emissão "C" (Gg)	Emissão "CO ₂ " (Gg)
Carvão metalúrgico	67.142	25,8	1.732.262,0	1.732,2	0,98	1.697,62	6.224,59
Coque de petróleo	2.529	20,0	50.580,5	50,6	0,99	50,07	183,61
Ól. combustível	2.015	21,1	42.509,2	42,5	0,99	42,08	154,31
Gás natural	10.063	15,3	153.963,9	154,0	1,00	154,00	564,56
GLP	70	17,2	1.204,0	1,2	0,99	1,19	4,37
Ól. diesel	69	20,2	1.404,0	1,2	0,99	1,39	5,10
Gasolina	4	18,9	77,7	0,1	0,99	0,08	0,28
TOTAL						1946,43	7136,82

Fonte: Própria.

Como foi observado anteriormente, a injeção de gás natural promove aumento de produtividade, redução do consumo específico de coque e, conseqüentemente, do consumo de carvão metalúrgico. Entretanto, em se tratando de um combustível fóssil, sua utilização acarreta redução da emissão de CO₂ proveniente do consumo de carvão metalúrgico mas, ao mesmo tempo, gera uma emissão de CO₂. Esta emissão é menor, comparada a do carvão metalúrgico, pois o gás natural possui poder calorífico maior (conseqüentemente é consumido em menores quantidades para fornecer a mesma quantidade de energia) e fator de emissão menor. Para contabilizar a emissão evitada com tal medida na COSIPA em 1997, é adotada a mesma metodologia aplicada acima (e no cálculo da ACESITA) e introduzidos os valores encontrados na subseção anterior. A Tabela 5.7 mostra os resultados obtidos.

Tabela 5.7: Emissão evitada de CO₂ com a injeção de gás natural na COSIPA em 1997.

Energéticos	Consumo (TJ)	Fator emissão (tC/TJ)	Emissão “C” (tC)	Emissão “C” (Gg)	Fração “C” Oxidada	Emissão “C” (Gg)	Emissão “CO ₂ ” (Gg)
Carvão metalúrgico	-10.331	25,8	-266.539,8	-266,5	0,98	-261,17	-957,62
Gás natural	4.709	15,3	72.047,7	72,0	1,00	72,00	264,17
TOTAL						-189,17	-693,45

Fonte: Própria.

O resultado apresentado na Tabela 5.7 mostra que a injeção de gás natural nos altos fornos da COSIPA permitiu uma emissão evitada de 693 GgCO₂ (189 GgC) em 1997. Este valor representa quase 10% da emissão da usina no mesmo ano, vista na Tabela 5.6.

Como já foi mencionado, a injeção de gás natural na COSIPA teve o objetivo de reduzir o consumo específico de coque por questões financeiras, já que a usina não é auto-suficiente quanto à produção deste energético. Por isso, como não havia o objetivo de aumentar a produtividade, a taxa de injeção de gás natural não atingiu os valores que podem ser praticados, como por exemplo a injeção de 0,069 tGN/tgusa obtido através de simulação em modelo matemático desenvolvido pela White Martins/Praxair Inc. (Moraes et al, 1996), que, segundo Martins et al (1996) pode chegar a 20% de aumento de produtividade. Além disso, esta medida de conservação foi, desde seu início, considerada temporária pois a COSIPA estava se preparando para injetar carvão mineral pulverizado, que se iniciou em junho de 1998.

As vantagens da injeção de carvão mineral pulverizado são:

- o carvão mineral a ser pulverizado não precisa ser o metalúrgico (com características específicas quanto a composição - teor de cinzas, umidade, voláteis, etc...), que é utilizado na coqueria para produzir coque;
- para taxa de injeção de 0,13 tcarvão pulverizado/tgusa e taxa de substituição de 0,85 tcoque/tcarvão pulverizado, aplicadas atualmente na COSIPA, pode-se chegar a reduzir o consumo específico de coque em cerca de 0,11 tcoque/tgusa, valor este que representa cerca

de 20% do consumo específico sem qualquer medida de injeção (calculada na subseção anterior).

Analisando o potencial de redução das emissões de CO₂ com a injeção de combustível auxiliar na ACESITA e COSIPA em 1997, conclui-se que é evitada uma emissão de 890 GgCO₂. Este valor representa cerca de 2% da emissão nacional deste segmento em 1994 (que foi de 43.560 GgCO₂).

5.3. Aspectos Econômicos da Injeção de Gás Natural em Alto Forno

De acordo com aspectos técnicos e ambientais já apresentados, a injeção de combustível auxiliar pelas ventaneiras do alto forno proporciona, redução do consumo de coque, aumento da produtividade e, conseqüentemente, redução das emissões de CO₂. Entretanto, a decisão de investimento nessa medida de conservação irá depender também dos aspectos econômicos, que serão apresentados a seguir.

5.3.1. Parâmetros Utilizados

A viabilidade econômica da injeção de gás natural depende, principalmente, dos preços de coque, de combustível auxiliar e de oxigênio. Esses fatores irão influenciar diretamente na economia de consumo de coque e nos custos de consumo de combustível auxiliar e de oxigênio. Para fazer uma avaliação de sua viabilidade, são consideradas as condições de injeção de gás natural no alto forno 1 da COSIPA, com produção (com injeção) de cerca de 1,45 milhões de toneladas de ferro gusa em 1997.

A injeção de gás natural só atinge seu objetivo (reduzir o consumo de combustível enforcado) se houver enriquecimento do ar soprado com oxigênio (seção 4.2.1). De acordo com informações obtidas na COSIPA, a injeção proporcionou um aumento de consumo de oxigênio da ordem de 2.000 Nm³/h no alto forno 1 em 1997. Considerando que a usina opera 24 horas/dia e 354 dias/ano, ocorreu um aumento de consumo de $1,699 \times 10^7$ Nm³ O₂ neste mesmo ano.

O investimento inicial, realizado no ano zero, foi avaliado em R\$ 3.445.110,50. Segundo Sampaio (1993 b) ele é resultado da soma do investimento na participação no ramal do gasoduto e do investimento na construção da rede interna, conversão de equipamentos e aquisição de tecnologia.

A receita engloba a economia do consumo de coque com a injeção de gás natural e com o aumento da produtividade (calculados na seção 5.2.2.1); e o ganho de produção de ferro gusa obtido (considerando o alto forno 1 da COSIPA). As despesas compreendem os custos com o consumo de gás natural e oxigênio. Considera-se que não haverá custo de manutenção nem de mão-de-obra, admitindo que a equipe já existente absorverá essas atividades.

A partir dos parâmetros apresentados na Tabela 5.8, pode-se calcular a receita e a despesa anuais com a injeção de gás natural em alto forno.

Tabela 5.8: Parâmetros utilizados para o cálculo da receita e do custo com injeção de gás natural (GN) em alto forno, referentes às considerações feitas para o alto forno 1 da COSIPA em 1997.

Parâmetros	Unidade	Valor
Economia do consumo de coque (E)	t/ano	89.874
Produção de ferro gusa ($P_{c/inj.}$)	t/ano	1.449.580
Aumento de produtividade (P_{tv})	-	0,07
Taxa de injeção GN ($T_{inj.}$)	tGN/tgusa	0,0231
Densidade GN (d)	Kg/Nm ³	0,661
Consumo de oxigênio (C_{O_2})	Nm ³ /ano	1,699*10 ⁷
Preço de gás natural (P_{GN})	R\$/ Nm ³ GN	0,14
Preço de oxigênio (P_{O_2})	R\$/ Nm ³ O ₂	0,10
Preço de ferro gusa (P_{gusa})	R\$/ t gusa	110,00
Preço de coque (P_{coque})	R\$/ t coque	125,00

Fonte: Própria, baseada em informações da COSIPA.

5.3.1.1 Cálculo da Receita Anual

A economia de coque com a injeção de gás natural e aumento de produtividade pode ser calculada pela Equação 5.11:

$$E_1 = E * P_{coque} \quad (\text{Equação 5.11})$$

Então, com os dados da Tabela 5.8, a economia de coque será de :

$$E_1 = \text{R\$ } 11.234.250,00 \text{ /ano}$$

O ganho de produção de gusa com a injeção pode ser encontrado pela Equação 5.12:

$$G = P_{c/inj.} * \left[1 - \frac{1}{1 + P_{tv}} \right] * P_{gusa} \quad (\text{Equação 5.12})$$

Substituindo os valores da Tabela 5.8, conclui-se que:

$$G = \text{R\$ } 10.431.557,00 \text{ /ano}$$

Dessa forma, a receita anual será expressa pela Equação 5.13:

$$R = E_1 + G \quad (\text{Equação 5.13})$$

Com os valores encontrados, tem-se que:

$$R = \text{R\$ } 21.665.807,00 \text{ /ano}$$

5.3.1.2. Cálculo da Despesa Anual

A despesa com o consumo de gás natural é calculada pela Equação 5.14:

$$D_{GN} = \frac{T_{inj.} * P_{c/inj.} * 1000 * P_{GN}}{d} \quad (\text{Equação 5.14})$$

Então, aplicando os dados da Tabela 5.8, conclui-se que a despesa com gás natural será de:

$$D_{GN} = \text{R\$ } 7.092.196,00 \text{ /ano}$$

A despesa com o enriquecimento de ar com oxigênio pode ser calculada pela equação 5.15:

$$D_{O_2} = C_{O_2} * P_{O_2} \quad (\text{Equação 5.15})$$

Considerando os valores da Tabela 5.8, a despesa com o enriquecimento com oxigênio será de:

$$D_{O_2} = \text{R\$ } 1.699.000,00 \text{ /ano}$$

E dessa forma, a despesa anual será expressa pela equação 5.16:

$$D = D_{GN} + D_{O_2} \quad (\text{Equação 5.16})$$

Ou seja, a despesa anual com a injeção de gás natural em alto forno será de:

$$D = \text{R\$ } 8.791.196,00 \text{ /ano}$$

5.3.2. Análise de Viabilidade Econômica

A atratividade do projeto será calculada pelo Método do Valor Presente Líquido, considerando uma vida útil de 15 anos e uma taxa mínima de atratividade de 10%.

A rentabilidade do investimento é determinada pela taxa interna de retorno (TIR), que representa a taxa em que os benefícios futuros, trazidos à valor presente, e o investimento inicial se igualam, implicando no Valor Presente Líquido igual a zero.

Calcula-se também o tempo de retorno (TR), ou “pay-back”, que consiste no período mínimo de tempo em que as receitas líquidas recuperam o investimento inicial, levando em consideração a mudança do valor do capital ao longo do tempo.

O investimento inicial foi considerado como realizado no ano zero, havendo benefícios uniformes nos anos seguintes. Como foi mencionado, o investimento inicial representa a soma de investimentos no ramal do gasoduto (I_{ramal}) e na construção da rede interna, conversão de equipamentos e aquisição de tecnologia (I_{interno}). O valor referente ao I_{ramal} foi considerado como equivalente à despesa com o consumo de dois meses de gás natural (Sampaio, 1993 b). A Equação 5.17 permite calcular I_{ramal} :

$$I_{\text{ramal}} = \frac{D_{GN} * 2}{12} \quad (\text{Equação 5.17})$$

Substituindo os valores encontrados, tem-se que:

$$I_{\text{ramal}} = \text{R\$ } 1.182.032,67$$

O valor referente ao I_{interno} , que no caso específico se destina à injeção de gás natural em apenas um alto forno, foi considerado como 40% do valor apresentado por Sampaio (1993 b) para a COSIPA (US\$ 3.550.000,00 em 1993, incluindo os dois altos fornos). A escolha dessa percentagem está relacionada à participação da produção do alto forno 1 na produção total da COSIPA (40%).

Para atualizar o valor de I_{interno} , que se encontra em dólares de 1993, para 1998, ou seja 5 anos (l) foi considerada a inflação média do dólar (i_d) de 6% ao ano e adotou-se a relação dólar:real de 1:1,1909 (O Estado de São Paulo, 1998) referente a 11/11/1998. Através da Equação 5.18 pode-se calcular I_{interno} :

$$I_{\text{interno}} = 0,40 * 3.550.000 * 1,1909 * (1 + i_d)^l \quad (\text{Equação 5.18})$$

Substituindo os valores encontra-se que I_{interno} é de:

$$I_{\text{interno}} = \text{R\$ } 2.263.043,83$$

Assim, o investimento inicial (I) será a soma de I_{ramal} e I_{interno} , cujo valor será:

$$I = \text{R\$ } 3.445.076,50$$

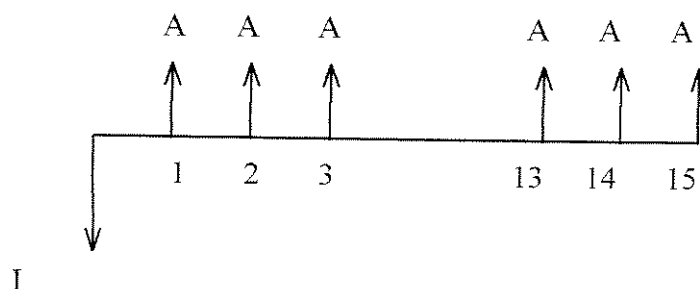
A Tabela 5.9 mostra os parâmetros utilizados para o cálculo do Valor Presente Líquido.

Tabela 5.9: Parâmetros econômicos utilizados para o cálculo do valor presente líquido.

Parâmetros	Unidades	Valor
Investimento inicial (I)	R\$	3.445.076,50
Receita anual	R\$/ano	21.665.807,00
Despesa anual	R\$/ano	8.791.196,00
Benefícios futuros (A) $A = R - D$	R\$/ano	12.874.611,00
Vida útil (n)	anos	15
Taxa mínima de atratividade (i)	%	10,0

Fonte: Própria.

O fluxo de caixa é apresentado abaixo:



Para calcular o valor presente dos benefícios em série uniforme, deve-se usar a Equação 5.19:

$$P = A * \left[\frac{(1 + i)^n - 1}{i \times (1 + i)^n} \right] \quad (\text{Equação 5.19})$$

onde: P = valor presente dos benefícios (R\$);

Com os valores da Tabela 5.9, pode-se calcular o valor presente dos benefícios do empreendimento:

$$P = \text{R\$ } 97.925.031,57$$

Então, o Valor Presente Líquido pode ser expresso pela equação 5.20:

$$\text{VPL} = P - I \quad (\text{Equação 5.20})$$

Ao substituir os valores, tem-se que:

$$\text{VPL} = \text{R\$ } 94.479.955,03$$

Como seu valor é maior que zero, o empreendimento é considerado atrativo.

A rentabilidade do investimento é determinada pela taxa interna de retorno (TIR), que pode ser encontrada pela Equação 5.21:

$$P = I \quad (\text{Equação 5.21})$$

A TIR foi obtida através da planilha do Excel 7.0 e seu valor corresponde a:

$$TIR = 374 \%$$

Como a TIR encontrada é maior que a taxa mínima de atratividade, pode-se dizer que este projeto é rentável.

Foi calculado também o tempo de retorno (TR), ou “pay-back”, adotando-se uma taxa mínima de atratividade de 10%. Assim, o valor do tempo de retorno é:

$$TR = 3 \text{ meses e } 12 \text{ dias}$$

Para verificar a robustez das soluções encontradas, analisa-se o comportamento dos parâmetros econômicos adotados considerando parâmetros extremos que poderiam conduzir a inviabilidade do investimento. Ao analisar os parâmetros econômicos, observa-se a grande influência da receita anual nas análises realizadas. Essa influência deve-se principalmente ao aumento de produtividade obtido com a injeção. Assim, decidiu-se alterar o parâmetro técnico aumento de produtividade de 7% para 4%, mantendo os demais parâmetros inalterados. Os resultados mostram que:

$$VPL = \text{R\$ } 73.917.109,23$$

$$TIR = 295 \%$$

$$TR = 4 \text{ meses e } 9 \text{ dias}$$

Verifica-se que mesmo supondo um aumento de produtividade bem menor, a análise de viabilidade mostra que a injeção de gás natural em alto forno é atrativa, rentável e robusta. É importante frisar que a viabilidade da medida foi determinada mesmo sem considerar o benefício obtido ao se evitar a emissão de CO₂, caso fossem aplicadas taxas de emissão. Assim, pode-se considerar, do ponto de vista econômico, como uma ação factível de realização.

Capítulo 6

Considerações Finais e Recomendações para Estudos Futuros

Neste capítulo são apresentadas as considerações finais, alcançadas no decorrer do estudo apresentado, e as recomendações para estudos futuros. Ao fim deste capítulo podem ser encontrados a bibliografia utilizada e o anexo contendo algumas tabelas citadas no estudo.

6.1. Considerações Finais

A preocupação com as mudanças climáticas tem se tornado cada vez maior. O risco de aquecimento global em função do aumento da concentração de gases do efeito estufa vem sendo afirmado por milhares de cientistas que revisaram os relatórios de avaliação apresentados pelo IPCC. Essa nova postura tem levado as Partes, da Convenção de Mudança Climática, à discussão sobre os limites de redução das emissões de CO₂ pelos países desenvolvidos (principais responsáveis pelos atuais níveis de concentração deste gás), definido pelo Protocolo de Kioto. Entretanto, muitos países garantem que só ratificarão o documento após a regulamentação dos mecanismos de flexibilização do Protocolo de Kioto. Entre eles, destaca-se o mecanismo de comércio de emissões e o de desenvolvimento limpo.

A contribuição do Brasil nas emissões mundiais ainda é pequena quando comparada às dos países desenvolvidos. A maior parte das emissões nacionais são decorrentes da alteração do uso do solo na Amazônia, enquanto que o sistema energético brasileiro contribui levemente para a

intensificação do efeito estufa, uma vez que há uma grande participação de fontes renováveis no Balanço Energético Nacional. Entretanto, ao analisar as emissões de cada segmento do sistema energético, observa-se a importante participação do segmento siderúrgico do setor industrial, tanto em nível nacional quanto no Estado de São Paulo. Os cálculos preliminares das emissões dos setores nacionais de atividade, apresentados no Capítulo 2 (subseção 2.3.2.1), mostram que o segmento siderúrgico contribui com 16% das emissões nacionais em 1994, provenientes de combustíveis fósseis, e que cerca de 8.600 GgCO₂ são emitidos com o consumo de lenha de origem nativa no mesmo ano. No Estado de São Paulo, este segmento responde por 12% das emissões de CO₂ em 1994. A intensa participação deve-se ao alto consumo de coque de carvão metalúrgico no balanço energético siderúrgico, mostrando o predomínio de usinas integradas a coque na produção nacional e estadual de aço.

Esse predomínio interfere no consumo específico de energia do segmento. Atualmente, o consumo específico está em torno de 29,3 GJ/t; entretanto, segundo Worrell et al (1997), esse consumo já foi de 32,2 GJ/t em 1980. No período 1980-1991, ocorreu uma ligeira queda do consumo específico, de 32,2 GJ/t para 31,7 GJ/t. A redução, de cerca de 2%, deve-se ao pequeno aumento da eficiência energética do processo de produção, caracterizando a falta de preocupação com conservação de energia, típico da época. Desde então, algumas alterações do processo de produção e a melhoria de eficiência de processo permitiram fazer com que o consumo específico de energia chegasse ao valor atual, que ainda é considerado alto quando comparado a países como Alemanha e Japão.

Ao estudar o processo de produção de aço, constata-se que a etapa de redução é responsável pela maior parte da energia total consumida nas usinas, cerca de 65%. O alto consumo desta etapa deve-se principalmente à utilização de coque de carvão metalúrgico (ou carvão vegetal) como redutor e insumo energético no alto forno, onde são produzidos ferro gusa, escória e gás de alto forno (considerado uma relevante fonte de emissão de CO₂, uma vez que cerca de 56% do carbono proveniente do coque de carvão metalúrgico empregado é emitido como gás de alto forno - subseção 2.3.1.1). Por isso, é nesta etapa que se concentram as medidas de conservação de energia e, conseqüentemente, de redução de emissões de carbono. Entre elas, destaca-se a injeção de combustível auxiliar em alto forno, medida esta que já vem sendo adotada pelas grandes

usinas siderúrgicas nacionais pois permite não apenas redução do consumo específico de coque (ou de carvão vegetal), mas também o aumento da produtividade. Assim, para analisar a possibilidade de redução de emissão de CO_2 no segmento siderúrgico, opta-se, no presente trabalho, pela injeção de combustível auxiliar em altos fornos.

A realização da pesquisa de campo proporcionou a obtenção de informações das usinas siderúrgicas ACESITA e COSIPA sobre seus consumos energéticos, taxas de injeção e outras importantes. Em mãos dessas informações, calculam-se as emissões de CO_2 em 1997 e as emissões evitadas com a injeção de combustível auxiliar. Esse levantamento de dados primários teve o objetivo de aumentar a confiabilidade das estimativas de emissões de CO_2 realizadas pelo setor siderúrgico nacional, além de proporcionar uma visão realística dos principais processos envolvidos na produção de ferro gusa e aço.

Na ACESITA observa-se que a injeção de carvão vegetal pulverizado nos altos fornos a carvão vegetal (alto forno 1) e coque (alto forno 2), proporciona um aumento significativo de produtividade, e a redução dos seus consumos específicos em 1997. No alto forno a coque há uma economia de 28% do consumo total desse energético (sem injeção), que permite uma emissão evitada de 198 GgCO_2 , ou seja, 27% da emissão total da usina no mesmo ano. No alto forno a carvão vegetal, a ICP promove a redução de 35% do consumo total desse energético (sem injeção). Além disso, conclui-se que a ICP pode proporcionar não apenas uma emissão evitada, mas também a absorção de CO_2 decorrente do uso de carvão vegetal. Essa absorção poderá ser observada quando a estimativa de consumo de lenha para o carvoejamento incluir uma reserva que não for utilizada, representando um importante sumidouro desse gás que deve ser considerado.

Na COSIPA, a injeção de gás natural também proporciona a redução do consumo total de coque nos dois altos fornos. A economia obtida é de cerca de 332.000 toneladas carvão metalúrgico em 1997. A emissão evitada com essa economia de consumo (693 GgCO_2) corresponde a quase 10% da emissão total da usina no mesmo ano. É importante salientar que a substituição do coque enornado é realizada por outro combustível fóssil, o gás natural. Por isso, não se pode esperar emissões evitadas da mesma proporção encontrada na ACESITA, onde

injeta-se carvão vegetal pulverizado. Espera-se que com a injeção de carvão mineral pulverizado, já em realização, consiga-se reduzir ainda mais as emissões de CO₂ na COSIPA, uma vez que, para a taxa de injeção e taxa de substituição atualmente utilizadas (e que não correspondem aos valores máximos) consegue-se reduzir o consumo específico de coque em pelo menos 0,11 t/tgusa produzido (sem considerar aumento de produtividade).

Somando os valores encontrados para a ACESITA e COSIPA, conclui-se que a adoção da medida de injeção de combustível auxiliar nessas usinas permitiu uma emissão evitada de cerca de 890 GgCO₂ em 1997, que representa 2% das emissões do segmento siderúrgico nacional em 1994. Este valor não deve ser considerado pequeno pois a produção da ACESITA é relativamente bem menor que as das grandes usinas siderúrgicas como a COSIPA. Espera-se que, quando forem computadas todas as emissões evitadas em todas as grandes usinas nacionais, este valor seja bem maior.

Além dos aspectos técnico e ambiental, são apresentadas estimativas quanto a viabilidade econômica da injeção de gás natural em alto forno. Tomando como base as considerações realizadas para o alto forno 1 da COSIPA e informações disponíveis na literatura, conclui-se que essa medida se apresenta atrativa e rentável. Sua robustez é estimada quando altera-se o aumento de produtividade de 7% para 4% e verifica-se que, mesmo assim, a medida apresenta-se como rentável e atrativa, não apresentando alterações que sejam consideradas significativas e possam inviabilizar sua adoção. Por isso, pode ser considerada, do ponto de vista econômico, como uma ação factível de realização. É importante frisar que a viabilidade da medida foi determinada mesmo sem considerar o benefício obtido ao se evitar a emissão de CO₂, caso fossem aplicadas taxas de emissão.

Isso mostra que a injeção de combustível auxiliar em altos fornos deve ser considerada uma importante medida de redução da emissão de CO₂ no segmento siderúrgico.

Felizmente vêm sendo realizados outros estudos sobre o potencial de redução da emissões de CO₂ do segmento siderúrgico mundial. Esses estudos incluem desde aumento da eficiência

energética e alteração total do processo produtivo de aço, até a recuperação de CO_2 para ser utilizado em processos químicos, como a produção de metanol.

Segundo Sakamoto et al (1997), o processo conhecido como HPS (Hybrid Pellet Sinter) produz um sinter composto de grupamentos de pelotas, que ao ser injetado no alto forno ¹¹ permite reduzir o consumo específico de coque em 2,5% e aumenta a produtividade em 6%. Foram feitos cálculos preliminares com base nessas informações e constata-se que essa medida tem o potencial de reduzir as emissões de CO_2 em cerca de 8%.

A substituição do processo de produção de aço pelo processo elétrico (FEA) também permite reduzir as emissões de CO_2 . Segundo Gutman (1998), se a produção nacional de aço via FEA tivesse sua participação de 17,2%, em 1994, para 37%, como ocorre nos Estados Unidos, haveria o potencial de reduzir 11% da emissão total do setor no mesmo ano.

Estudos realizados na Holanda mostram que é possível a recuperação de CO_2 , principalmente do gás de alto forno da siderurgia, através de uma coluna de absorção (Farla et al, 1995). O CO_2 recuperado poderia ser utilizado na produção de metanol através do processo Carnol¹². Este processo já vem sendo praticado comercialmente nos Estados Unidos em pequena escala, devido principalmente à existência de poucas reservas de CO_2 recuperado (Steinberg, 1996).

6.2. Recomendações para Estudos Futuros

Imaginando que esta dissertação possa ser evoluída em trabalhos futuros, são apresentadas recomendações quanto ao estudo sobre o potencial de redução das emissões de CO_2 do segmento siderúrgico.

A injeção de combustível auxiliar em alto forno mostrou-se extremamente interessante no tocante à redução das emissões de CO_2 do segmento siderúrgico e à viabilidade econômica.

¹¹ (substituindo parcialmente a fração de sinter na proporção de 50% de HPS e 50% de sinter)

¹² Este processo consiste na decomposição de metano para a formação de hidrogênio, que é utilizado em reação catalítica com o CO_2 recuperado para produzir metanol.

Entretanto, a injeção de combustível auxiliar é limitada e seu aumento de produtividade reduz para altas taxas de injeção. Por isso, seria importante determinar qual a taxa de injeção de gás natural que inviabiliza sua adoção no caso analisado para o alto forno 1 da COSIPA (seção 5.3).

A injeção de carvão vegetal pulverizado na ACESITA revelou um potencial de redução relevante (subseção 5.1.3). Assim, seria interessante aprofundar o estudo analisando a viabilidade econômica da injeção de carvão vegetal pulverizado nas principais usinas siderúrgicas nacionais que utilizam coque de carvão metalúrgico.

Seria interessante também retornar à COSIPA e determinar a redução das emissões com a injeção de carvão mineral pulverizado, que se iniciou em junho de 1998. Como foi mencionado (subseção 5.2.3) existe o potencial de reduzir cerca de 20% do consumo específico de coque sem a injeção, e conseqüentemente, de reduzir as emissões de CO₂.

Os estudos que vêm sendo realizados no segmento siderúrgico, apresentados anteriormente, poderiam ser analisados de forma a determinar a sua viabilidade técnica e econômica para o contexto nacional de produção de aço.

Pode-se observar que a maioria das medidas de redução das emissões de CO₂ do segmento siderúrgico tem como objetivo a questão econômica de redução de investimentos (FEA, Capítulo 3) ou de custos do consumo específico do combustível no processo de produção de aço. A redução permite, como consequência, a redução da emissão de CO₂. Essa mesma característica é verificada em praticamente todos os segmentos de todas as atividades. Seria muito interessante que, no atual contexto de preocupação com as mudanças climáticas, as indústrias siderúrgicas (e todos os outros segmentos) comesçassem a priorizar a emissão de CO₂ em suas decisões empresariais. Isto poderia permitir o desenvolvimento sustentável de todos os setores de atividades e garantir a nossa própria evolução enquanto seres humanos.

Referências Bibliográficas

- ABM. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. (1996) Mercado Mundial de Ferro Gusa Alterado pela China. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v.52, n.450, p.100, Fev. 1996.
- (1997 a) Aumentou 6,8% a Produção de Aço em Todo o Mundo. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v.53, n.469, p.422, Set. 1997.
- (1997 b) Brasil já é o Sétimo Produtor Mundial de Aço. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v.53, n.462, p.58, Fev.1997.
- (1997 c) Mannesmann Comprova que Carvão Vegetal é Viável. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v.53, n.466, p.280-281, Jun.1997.
- (1998 a) Tendência Mundial por Forno Elétrico Deve Ser Debatida pela Siderurgia Nacional. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v.54, n.475, p.166-167, Abril. 1998.
- (1998 b) Melhoria dos Negócios Depende do Desempenho da Economia. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v.54, n.478, p.340-342, Jul. 1998.
- (1998 c) Associação entre ACESITA e USINOR. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v.54, n. 476, p.214, Maio 1998.

- (1998 d) ACESITA Eleva Produção de Aço Inoxidável. **Metalurgia & Materiais**, São Paulo, v.54, n.477, p.270-272, Jun. 1998.
- ARAÚJO, L. A. (1997) **Manual de siderurgia**. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 1997, v.1., Cap. 8: Alto forno. p. 195-258.
- ASTIER, J. E. (1991) Competitividade da Indústria Siderúrgica dos Países em Desenvolvimento. **Metalurgia - ABM**, São Paulo, v. 47, n. 393, p. 26-32, Fev. 1991.
- BAJAY, S. V. et al (1995) Análise do Consumo, por Usos Finais, dos Principais Energéticos nos Segmentos Industriais Energo-Intensivos no País e a Sua Projeção no Curto, Médio e Longo Prazos, no Contexto de Cenários Macroeconômicos. **Convênio ELETROBRÁS/ UNICAMP/ FUNCAMP**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 1995.
- BARKER, T.; EKINS, P.; JOHNSTONE, N. (1995) Introduction. In: **GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE PROGRAMME. Global Warming and Energy Demand**. London: Routledge, 1995. P.1-16.
- BEN. (1995) **Balanço Energético Nacional 1995**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 1995. 141p.
- (1998) **Balanço Energético Nacional 1997**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 1998. 152p.
- BEESP. (1997) **Balanço Energético do Estado de São Paulo 1997**. Secretaria de Energia. São Paulo, 1997. 208p.
- BENDING, R.; CATTELL, R.K. (1987) Energy and Structural Changes in the United Kingdom and Western Europe. **Annual Review of Energy**, 1987. V.12, p.99-144.

BOYLER, H., GALL, T.L. (1985) **Metals Handbook**. Ohio: American Society for Metals, 1985. p.22.1-22.10.

CAMARGOS, R. P. (1996) Emissão de CO₂ para o Setor Industrial de Minas Gerais até 2010. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 7, 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1996. v.2, p.694-710.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. (1991) **Nosso Futuro Comum**. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991. 430p.

COPPE. COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA - UFRJ. (1997) **Relatório Metodológico das Emissões de CO₂: Abordagem “Top-down”**. MCT, 22/10/97. Referência disponível na Internet.
<http://www.mct.gov.br/gabin/cpmg/climate/programa/port/enrgm6.htm>

——— (1998 a) **Relatório das Emissões Derivadas do Sistema Energético – Abordagem “Top-down”**. MCT, 10/11/98. Referência disponível na Internet.
<http://www.mct.gov.br/gabin/cpmg/climate/programa/port/energia1.htm>

——— (1998 b) **Descrição da Metodologia do IPCC**. MCT, 12/11/98. Referência disponível na Internet.
http://www.mct.gov.br/gabin/cpmg/climate/programa/port/ener19_2.htm

——— (1998 c) **Conclusões e Recomendações**. MCT, 12/11/98. Referência disponível na Internet.
<http://www.mct.gov.br/gabin/cpmg/climate/programa/port/energi17.htm>

——— (1998 d) **Indicadores de Desempenho do Sistema Energético Brasileiro sob o Ponto de Vista das Emissões de CO₂**. MCT, 12/11/98. Referência disponível na Internet.
<http://www.mct.gov.br/gabin/cpmg/climate/programa/port/energi16.htm>

- CUNHA, M. F., GONÇALVES, L., JANSOHN, K. (1993) Sistemas de Injeção de Carvão Pulverizado e/ou Outros Materiais em Altos Fornos. In: ASSIS, P. S. **Injeção de Materiais Pulverizados em Alto Forno**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1993. p. 163-190.
- DUARTE, A. L., VASCONCELOS, E. C., BECHTLUFFT, P.C.T. (1995) Potencial de Redução do Consumo de Carvão Vegetal no Setor Não-Integrado de Ferro Gusa. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 2, 1995, Campinas. **Anais...** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1995. p.319-327.
- E.I.A. - ENERGY INTERNATIONAL AGENCY. (1998) **Climate Change: Negotiation to Set New Targets are Slated to Begin**. 22/01/1998. Referência disponível na Internet.
<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo97/world.html#ClimateChange>
- EL PAÍS (1998) **La Reunión de Buenos Aires Aplaza las Principales Medidas de Reducción de Gases**. Madrid, 15/12/1998.
- FARLA, J.C.M., HENDRIKS, C.A., BLOK, K. (1995) Carbon Dioxide Recovery from Industrial Process. **Energy Conversion and Management**, London, v.36, n.6-9, p.827-830, Jun-Sep. 1995.
- FERNANDEZ, M.J.F., SAGASETA, M.A.M., MARTINEZ, F.G. (1998) Balanço Energético Global da COSIPA. In: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 20, 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1998. P.225-270.
- FEARNISIDE, P.M. (1998) Forest and Global Warming Mitigation in Brazil: Opportunities in the Brazilian Forest Sector for Responses to Global Warming under the “Clean Development Mechanism” and “Joint Implementation” Programs. In: **The Aspen Global Forum**, São Paulo, 1998. p.1-28.

- FLETCHER, S. R. (1998) **Analisis del Protocolo de Kioto**. Global Issues, 25/06/98. Referência disponível na Internet.
<http://www.usia.gov/journals/itgic/0498/ijgs/gj-9.htm>
- FREITAS, M. A. V. (1996) O Uso do Solo e da Biomassa nos Trópicos e sua Contribuição ao Equilíbrio Climático Planetário: o Caso da Amazônia Brasileira. In: DUTRA, L. E. D. **Pesquisas Recentes em Energia, Meio Ambiente e Tecnologia**. Rio de Janeiro: Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia - UFRJ, 1996. p.115-133.
- GRUBB, M. (1996) Seeking Fair Weather: Ethics and the International Debate on Climate Change. In: ROSA, L.P., SANTOS, M.A. **Greenhouse Gas Emissions under Developing Countries Point of View**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1996.p.226-260.
- GUTMAN, J. (1998) **Emissões de Gases de Efeito Estufa no Setor Siderúrgico no Período 1980-1995 e Cenários Futuros**. Rio de Janeiro: PPE, COPPE/UFRJ, 1998. Dissertação (Mestrado) – Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998. p.1-9, 65-84.
- HOGAN, W. T. (1998) A Siderurgia do Próximo Século. **Metalurgia & Materiais – ABM**, São Paulo, v.52, n.472, p.708-709, Jan, 1998.
- HOUGHTON, J. (1994) The Climate Convention and the Latest Scientific Understanding of Climate Change. **Renewable Energy**. Great Britain, v.5, part.1, p.1-4, 1994.
- IBGE. FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1994) **Anuário Estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro, 1994.
- IBS. INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA (1998). **Anuário Estatístico 1998**. Rio de Janeiro: IBS, 1998.

INPE. - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. (1989) **Avaliação da Cobertura Florestal na Amazônia Legal Utilizando Sensoriamento Remoto Orbital**. São José dos Campos, 1989.

——— (1998) **Amazônia: Desflorestamento 1995-1997**. 10/11/1998. Referência disponível na Internet.

<http://www.inpe.br/amz-11.htm>

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (1990) **Climate Change: The IPCC Scientific Assessment**. London, 1990.

——— (1995) **Greenhouse Gas Inventory Workbook**. London, 1995. v.2, p.1-18.

JANNUZZI, G. M. (1989) A Conservação de Energia e o Meio Ambiente: A Crescente Preocupação com a Liberação de CO₂ em Países em Desenvolvimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 1, 1989, Campinas. **Anais...** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1989. v.4, p.341-359.

——— (1996) A Política Energética e o Meio Ambiente: Instrumentos de Mercado e Regulação. In: ROMEIRO, A. R. **Economia do Meio Ambiente: Teoria, Políticas e a Gestão de Espaços Regionais**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1996. p.151-160.

KOPP, R. J. (1998) **The Kyoto Protocol: The Realities of Implementation**. Weathervane, 15/01/98. Referência disponível na Internet.

<http://www.weathervane.rff.org/featurcs/feature027.html>

MARQUES, M. (1994) Demanda Interna Puxa Aumento de Produção. **Brasil Mineral**, n.119, 1994.

- MARTINS, J.G.P., BENTO, W.S., QUITES, E.E.C. (1996) Análise da Injeção de Gás Natural no Alto Forno II da COSIPA. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO, 27, 1996, Santos, SP. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996. P.227-238.
- MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia. (1998) **Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima: Contexto**. 15/01/1998. Referência disponível na Internet. <http://www.mct.gov.br/gabin/cpmg/climate/programa/programa/port/leaflet.htm>
- MEI, P. R. , SILVA, A. L. C. (1988) **Aços e Ligas Especiais**. São Paulo: Eletrometal S. A. Metais Especiais, 1988. 527 p.
- MORAES, R.L., SILVA, R. C., LIMA, W.O. (1996) Gás Natural e a “Matriz Energética Brasileira”. In: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 18, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, Jul. 1996. p.147-168
- O ESTADO DE SÃO PAULO (1998) **Economia**. São Paulo, 15/11/1998, p.B-4.
- O GLOBO (1998) **Redução dos Gases Poluentes fica para 2000**. Rio de Janeiro, 15/12/1998.
- OLIVEIRA, M. A. G. (1993) Operação de Altos Fornos com Injeção de Carvão e/ou Outros Materiais Pulverizados Carbonosos. In: ASSIS, P. S. **Injeção de Materiais Pulverizados em Alto Forno**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1993. p. 105-144.
- PEREIRA, E.A.C. (1998) Análise Histórica do Impacto da Siderurgia a Carvão Vegetal. **Metalurgia & Materiais - ABM**, São Paulo, v.54, n.472, p.704-707, Jan.1998.
- REID, W. V. , GOLDEMBERG, J. (1997) Are Developing Countries Already Doing as Much as Industrialized Countries to Slow Climate Change? **World Resources Institute: Climate Notes**, Washington. 5p. July, 1997.

- REIS, E. J. , GUZMAN, R. M. (1992) **An Econometric Model of Amazon Deforestation**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada - I.P.E.A., 1992.
- ROSA, L. P. , SCHECHTMAN, R. , CECCHI, J. C. (1990) **Global Climate Change and Social Science: an International Assessment - the Brazilian Case**. Rio de Janeiro: Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia - UFRJ, 1990.
- ROSA, L. P. (1996) Carbon Dioxide and Methane Emissions: Indices Definitions and Applications to Brazil Energy System. In: ROSA, L.P., SANTOS, M. A. **Greenhouse Gas Emissions under Developing Countries Point of View**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1996. P.163-178.
- SAKAMOTO, N., NODA, H., TAKEMOTO, K., KOMATSU, O. (1997) Produção Comercial de Sinter HPS. **Metalurgia e Materiais – ABM**, São Paulo, v.53, n.469, p.542-544, Set. 1997.
- SAMPAIO, R. S. (1993 a) Inovações Técnicas na Produção de Aço e Seus Reflexos na Obtenção de Ferro Primário. **Metalurgia e Materiais - ABM**, São Paulo, v. 49, n. 416, p. 285-294, Abr. 1993.
- (1993 b) **Utilização de Gás Natural na Siderurgia**. Belo Horizonte: Secretaria de Estado e Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Minas Gerais, 1993.
- SEADE – FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. (1996) **Anuário Estatístico do Estado de São Paulo 1996**. São Paulo, 1996.
- SMA. (1993) Secretaria de Estado e Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Minas Gerais. **Utilização de Gás Natural na Siderurgia**, 1993.
- SMA. (1997) Secretaria do Meio Ambiente. **Inventário de Gases do Efeito Estufa**. São Paulo, 1997. 36p.

STEINBERG, M. (1996) The Carnot Process for CO₂ Mitigation from Power Plants and The Transportation Sector. **Energy Conversion and Management**, London, v.37, n.6-8, p.843-848, Jun-Aug. , 1996.

SZWARCFITER, L. et al (1996) Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa na Matriz Energética Brasileira do ano 2000: O Caso da Geração Fotovoltaica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 7, 1996, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 1996. v.2, p.935-948.

TAVARES, R. P. (1993) Termodinâmica e Cinética da Injeção de Carvão e Outros Materiais no Alto Forno. In: ASSIS, P. S. **Injeção de Materiais Pulverizados em Altos Fornos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1993. p. 35-104.

TOLMASQUIM, M. T. (1996) CO₂ Emissions from Energy Systems: Comparing Trends in Brazil with Trends in Some OECD Countries. In: ROSA, L. P. **Carbon Dioxide and Methane Emissions: a Developing Country Perspective**. Rio de Janeiro: Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia - UFRJ, 1996. p.35-44.

TOXOPEUS, H. (1996) Otimização e Racionalização de Alto Fornos. **Metalurgia e Materiais - ABM**, São Paulo, v. 52, n. 450, p. 108-114, Fev. 1996.

TURKENBURG, W.C. (1997) Sustainable Development, Climate Change and Carbon Dioxide Removal (CDR). **Energy Conversion & Management**, Cambridge, v.38, Suppl., p.S3-S12, September, 1996.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Information Unit for Conventions (IUC)** (1998 a). 15/01/1998. Referência disponível na Internet.

<http://www.cop3.org/fccc/climate/fact17.htm>

——— (1998 b) 15/01/1998. Referência disponível na Internet.

<http://www.cop3.org/fccc/info/backgrod.htm>

——— (1998 c) 15/01/1998. Referência disponível na Internet.

<http://www.cop3.org/fccc/climate/fact18.htm>

——— (1998 d) 15/01/1998. Referência disponível na Internet.

<http://www.cop3.org/fccc/climate/fact20.htm>

——— (1998 e) 15/01/1998. Referência disponível na Internet.

<http://www.cop3.org/fccc/climate/fact21.htm>

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE.

(1997) **Antropogenic CO₂ Emissions, Excluding Land-use Change and Forestry, 1990.**

UNFCCC, 22/10/97. Referência disponível na Internet.

<http://www.unfccc.de/fccc/emiss/file08.htm#emis90>

——— (1998) **COP-4 Presskits and Accreditation Forms.** UNFCCC, 09/11/98. Referência disponível na Internet.

<http://www.cop4.org/>

URIA, L.A. B., SCHAEFFER, R. (1997) Efeito Radioativo das Emissões de Gases de Efeito Estufa por parte de Automóveis no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, Rio de Janeiro. V.6, n.1, p.7-29, 1º semestre, 1997.

U.S. DEPARTMENT OF STATE. (1995) **Climate Action Report: Submission of the United States of America under the United Nations Framework Convention on Climate Change.** Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1995. Cap1: Introduction and Overview. P.4-17.

VIOLA, E. (1997) O GEF e o Brasil: Institucionalidade e Oportunidades de Financiamento. In: JACOBI, P.R., LEIS, H.R., FERREIRA, L. C. **Ambiente & Sociedade.** Campinas: NEPAM/UNICAMP, 1997. p.5-25.

WORRELL, E., PRICE, L., MARTIN, N., FARLA, J., SCHAEFFER, R. (1997) Energy Intensity in the Iron and Steel Industry: a Comparison of Physical and Economic Indicators. **Energy Policy**, UK, v.25, n.7-9, p.727-744, Jun-Jul. 1997.

WORLD BANK. (1998) **Climate Change Debate Heats up in Kyoto**. 23/01/1998. Referência disponível na Internet.

<http://www.worldbank.org/html/extdr/extcs/w120497c.htm#kyoto>

Anexo

Tabela 1: Inventário Nacional de emissão de CO₂ - 1994 (COPPE, 1998 a).
Sub-module: CO₂ from Energy Sources (Reference Approach)

Worksheet 1-1

Fuel Types	STEP 1					STEP 2	
	A - Production (1,000 toe)	B - Imports (1,000 toe)	C - Exports (1,000 toe)	D - International Bunkers (1,000 toe)	E - Stock Change (1,000 toe)	F - Apparent Consumption (1,000 toe) F=A+B-C-D-E	G - Conversion Factor (tJ/Unit) H=ExG
Liquid Fossil	Primary Fuels	33804	27957	0	0	61812	42,96
	Natural Gas Liquids	1026	0	0	0	1026	42,96
	Gasoline	23	2315	0	0	-2118	42,96
	Jet Querosene	333	43	590	0	-255	42,96
	Other Querosene	0	31	0	0	-3	42,96
	Diesel Oil	2770	694	103	183	1790	42,96
	Residual Fuel Oil	2728	1530	1047	25	126	42,96
	LPG	1875	0	0	-22	1897	42,96
	Ethane	0	0	0	0	0	42,96
	Naphtha	2474	203	0	32	2239	42,96
	Bitumen	35	0	0	-12	-23	42,96
	Lubricants	11	81	0	-42	-28	42,96
	Petroleum Coke	0	0	0	16	-16	42,96
	Refinery Feedstocks	0	0	0	0	0	42,96
Solid Fossil	Other Secondary Oil Products	0	0	0	0	0	42,96
	Other Non-Energy Oil Products	92	46	0	0	52	42,96
	Liquid Fossil Totals	34830	38263	4978	1740	66499	2856797
	Primary Fuels	75	8219	0	0	8276	42,96
	Coking Coal	1910	59	0	0	1934	42,96
	Steam Coal	0	0	0	0	0	42,96
	Other Bit. Coal	0	0	0	0	0	42,96
	Lignite	0	0	0	0	0	42,96
	Peat	0	0	0	0	0	42,96
	Tars	0	0	0	0	0	42,96
	Coke	1985	1000	0	-11	1011	42,96
	Solid Fossil Totals	1985	9278	0	0	11221	482054
Gaseous Fossil	Natural Gas (Dry)	3974	0	0	0	3974	40,70
	Refinery Gas	0	0	0	0	0	40,70
	Gaseous Fossil Totals	3974	0	0	0	3974	161742
	Other Primary Fossil Sources	358	0	0	0	358	42,96
	Fossil Fuel Totals	41147	47541	4978	1740	82052	3515973
Biomass Fuel	Firewood (Direct Burning) 1	13719	0	0	0	13719	42,96
	Firewood (Charcoal Product) 2	10828	0	0	0	10828	42,96
	Sugar Cane Bagasse	14743	0	0	0	14743	42,96
	Crop Residues	632	0	0	0	632	42,96
	Solid Biomass Totals	39922	0	0	0	39922	1715049
Liquid Biomass	Sugar Cane Juice	5642	0	0	0	5642	42,96
	Molasses	1050	0	0	0	1050	42,96
	Anhydrous Ethanol	212	0	0	-24	236	42,96
	Hydrated Ethanol	723	145	0	71	507	42,96
	Black Liquor	1977	0	0	0	1977	42,96
	Liquid Biomass Totals	8669	145	0	47	9412	404340
	Gas Biomass	0	0	0	0	0	40,70
	Biomass Fuel Totals	48591	935	145	47	49334	2119389

Tabela 1 (continuação)
Sub-module: CO2 from Energy Sources (Reference Approach)

Worksheet 1-1

Worksheet 1-1											
Sheet: 2 of 2											
Fuel Types	STEP 3			STEP 4			STEP 5		STEP 6		
	I - Carbon Emission Factor (tC/tJ)	J - Carbon Content (t C)	K - Carbon Content (Gg C) K = J/1000	L - Carbon Stored (Gg C)	M - Net Carbon Emissions (Gg C) M = K - L	N - Fraction of Carbon Oxidized	O - Actual Carbon Emissions (Gg C) O = MN	P - Actual CO2 Emissions (Gg CO2) P = [Ox(44/12)]			
Liquid Fossil	Primary Fuels	20.0	53108870	53109	0	53109	0.990	52578	192785		
	Secondary Fuels	Crude Oil	17.2	758124	758	0	758	0.990	751	2752	
		Natural Gas Liquids	18.9	-1719697	-1720	0	-1720	0.990	-1703	-6243	
		Gasoline	19.5	-213619	-214	0	-214	0.990	-211	-775	
		Jet Querosene	19.6	-2526	-3	26	-29	0.990	-28	-104	
		Other Querosene	20.2	1553348	1553	0	1553	0.990	1538	5639	
		Diesel Oil	21.1	114213	114	0	114	0.990	113	415	
		Residual Fuel Oil	17.2	1401716	1402	0	1402	0.990	1388	5088	
		LPG	16.8	0	0	0	0	0.990	0	0	
		Ethane	20.0	1923749	1924	4067	-2143	0.990	-2122	-7780	
		Naphtha	22.0	-21738	-22	1177	-1199	0.990	-1187	-4351	
		Bitumen	20.0	-24058	-24	269	-293	0.800	-234	-860	
		Lubricants	27.5	-18902	-19	0	-19	0.990	-19	-69	
Petroleum Coke	20.0	0	0	0	0	0.990	0	0			
Refinery Feedstocks	20.0	0	0	0	0	0.990	0	0			
Other Secondary Oil Products	20.0	44678	45	1039	-994	0.990	-984	-3609			
Other Non-Energy Oil Products	20.0										
Liquid Fossil Totals											
Solid Fossil	Primary Fuels	25.8	9172854	9173	0	9173	0.980	8989	32961		
	Secondary Fuels	Coking Coal	25.8	2143584	2144	0	2144	0.980	2101	7703	
		Steam Coal	25.8	0	0	0	0	0.980	0	0	
		Other Bit. Coal	27.6	0	0	0	0	0.980	0	0	
		Lignite	28.9	0	0	0	0	0.990	0	0	
		Peat	25.8	0	0	62	-62	0.980	-61	-223	
		Tar	27.5	1194395	1194	0	1194	0.990	1182	4336	
Solid Fossil Totals											
Gaseous Fossil		15.3	2474650	2475	197	2278	0.995	2266	8310		
	Natural Gas (Dry)	15.3	0	0	131	-131	0.995	-130	-478		
Gaseous Fossil Totals											
Other Primary Fossil Sources											
FOSSIL FUEL TOTALS											
Biomass Fuel		20.0	307594	308	0	308	0.995	306	1122		
			72197235	72197	6968	65229		64532	236619		
Solid Biomass	Firewood (Direct Burning) 1	29.9	17622110	17622	0	17622	0.870	15331	56215		
	Firewood (Charcoal Prodn.) 2	29.9	13908609	13909	0	13909	0.891	12393	45439		
	Sugar Cane Bagasse	29.9	18937442	18937	0	18937	0.870	16476	60410		
	Crop Residues	29.9	811807	812	0	812	0.870	706	2590		
			51279969	51280	0	51280		44906	164654		
Solid Biomass Totals											
Liquid Biomass	Sugar Cane Juice	20.0	4847606	4848	0	4848	0.995	4823	17686		
	Molasses	20.0	902160	902	0	902	0.995	898	3291		
	Anhydrous Ethanol	20.0	202771	203	0	203	0.995	202	740		
	Hydrated Ethanol	20.0	435614	436	0	436	0.995	433	1589		
	Black Liquor	20.0	1698638	1699	0	1699	0.995	1690	6197		
Liquid Biomass Totals											
Gas Biomass											
BIOMASS FUEL TOTALS											

Tabela 2: Inventário de Emissões de CO2 por Fontes de Energia - Análise Top-Down (SMA, 1997).

COMBUSTÍVEL	PRODUÇÃO (10 ⁹ kcal)	IMPORT. (10 ⁹ kcal)	IMPORT. ESTADUAL (10 ⁹ kcal)	VAR. ESTOQUES (10 ⁹ kcal)	EXPORT. (10 ⁹ kcal)	EXPORT. ESTADUAL (10 ⁹ kcal)	CONSUMO (10 ⁹ kcal)	CONVERSÃO (10 ⁹ kcal = 4,18611)
Fóssil Líquido								
Comb. Primários	0	123189	170262	0	0	0	293451	1228386
Comb. Secundários	0	257	0	273	-17224	-10875	-27569	-115404
Petróleo	0	401	205	319	-385	-2332	-1792	-7501
Gasolina	0	0	0	0	0	0	0	0
Querosene (Avião)	0	6549	0	-2027	-4522	-53182	-53182	-222620
Querosene Iluminação	0	10882	0	-1497	-4120	-1421	3844	16091
Óleo Diesel	0	7516	0	396	0	-10504	-2592	-10850
Óleo Combustível	0	0	0	0	0	-2880	-2880	-12056
GLP	0	0	0	0	0	0	0	0
Nafta	0	0	0	0	0	0	0	0
Gás de Refinaria	0	0	0	0	0	0	0	0
Outros Energéticos	0	0	0	-265	0	-239	-504	-2110
Total de Fósseis Líquidos	0	148794	170467	-2801	-26251	-81433	208776	873936
Fóssil Sólido								
Comb. Primários	0	0	924	-100	0	0	824	3449
Comb. Secundários	0	16602	0	-297	0	0	16305	68253
Carvão Vapor	0	4568	0	-380	0	0	4188	17531
Carvão Metalúrgico	0	21170	924	-777	0	0	21317	89233
Coque de C. Mineral	0	0	0	0	0	0	0	0
Total de Fósseis Sólidos	0	21170	924	-777	0	0	21317	89233
Fóssil Gasoso								
Gás Natural	4178	0	1799	0	0	0	5977	25020
Gás Canalizado	0	0	0	0	0	0	0	0
Gás de Coqueira	0	0	0	0	0	0	0	0
Total de Fósseis Gasosos	4178	0	1799	0	0	0	5977	25020
TOTAL GERAL DE FÓSSEIS	4178	169964	173190	-3578	-26251	-81433	236070	988189
Biomassa								
Biomassa Sólida								
Primárias	8664	0	1727	0	0	0	10391	43497
Outras Primárias	7452	0	0	0	0	0	7452	31194
Cana de açúcar	136737	0	0	0	0	0	136737	572381
Bagaçó da C. Açúcar	0	0	0	0	0	0	0	0
Carvão Vegetal	0	0	387	0	0	0	387	1620
Secundárias	0	0	0	0	0	0	0	0
Biomassa Líquida	0	0	0	1200	-157	-6707	-5664	-23710
Alcool Amido	0	0	0	0	-501	-11433	-12541	-52497
Alcool Hidratado	0	0	0	-607	-501	-11433	-12541	-52497
Total de Biomassa	152853	0	2114	593	-658	-18140	136762	572486
Energia Hidráulica - Energia Primária	51202	0	0	0	0	0	51202	214332
Eleticidade - Energia Secundária	0	0	27561	0	0	-725	26836	112335
Total de Energia Elétrica	51202	0	27561	0	0	-725	78038	326667

Tabela 2 (cont.): Inventário de Emissões de CO2 por Fontes de Energia - Análise Top-Down

COMBUSTÍVEL	F. EMISSÃO "C" QUANT. "C" QUANT. "C" "C" ARMAZ. EMISSÃO FRAÇÃO "C" EMISSÕES "C" EMISSÕES CO2						
	(tC)	(Gg de C)	(Gg de C)	(Gg de C)	OXIDADO	(Gg de C)	(Gg de CO2)
Fóssil Líquido							
Comb. Primários	20,0	24567718	24568	644	23924	23684	86843
Comb. Secundários	18,9	-2181132	-2181		-2181	-2159	-7918
Petróleo	19,5	-146276	-146		-146	-145	-531
Querosene (Avião)	19,6	0	0		0	0	0
Querosene Iluminação	20,2	-4496921	-4497		-4497	-4452	-16324
Óleo Diesel	21,1	339520	340		340	336	1232
Óleo Combustível	17,2	-186622	-187		-187	-185	-677
GLP	20,0	-241114	-241	812	-1053	-1043	-3823
Nafta	15,3	0	0	700	-700	-697	-2554
Gás de Refinaria	20,0	-42195	-42		-42	-42	-153
Outros Energéticos	20,0	0	17613		15457	15299	56096
Total de Fósseis Líquidos		0	0				
Fóssil Sólido							
Comb. Primários	25,8	88991	89		89	87	320
Comb. Secundários	25,8	1760920	1761		1761	1726	6328
Carvão Metalúrgico	27,5	482102	482		482	477	1750
Coque de C. Mineral		0	2332		2332	2290	8397
Total de Fósseis Sólidos		0	0				
Fóssil Gasoso							
Gás Natural	15,3	382802	383		383	381	1397
Gás Canalizado	15,3	0	0		0	0	0
Gás de Coqueira	17,2	0	0		0	0	0
Total de Fósseis Gasosos		0	383		383	381	1397
TOTAL GERAL DE FÓSSEIS	0,0	0	20328	2156	18172	17970	65890
Biomassa							
Biomassa Sólida	29,9	1300552	1301		1301	1159	4249
Primárias	29,9	932703	933		933	928	3403
Outras Primárias	29,9	17114194	17114	3032	14082	14012	51377
Cana de açúcar	29,9	0	0	196	-196	-171	-625
Bagaço da C. Açúcar	29,9	48437	48	3	45	45	166
Carvão Vegetal	20,0	-474190	-474		-474	-472	-1730
Alcool Anidro	20,0	-1049933	-1050		-1050	-1045	-3831
Alcool Hidratado		0	17872		14641	14457	53008
Total de Biomassa		0	0				
Energia Hidráulica - Energia Primária	0,0	0	0		0	0	0
Eleticidade - Energia Secundária	0,0	0	0		0	0	0
Total de Energia Elétrica	0	0	0		0	0	0

Tabela 3. Emissão de CO₂ do Estado de São Paulo em 1994 - Metodologia "Bottom-up".

Fontes Energéticas	Consumo Final (10 ⁹ kcal)	Conversão (10 ⁹ kcal=4,186 TJ)	Fator de Emissão "C" (tC/TJ)	Quantidade de "C" (tC)	Quantidade de "C" (Gg)	Fração de "C" Oxidado	Emissões de "C" (Gg)	Emissões de "CO ₂ " (Gg)	Consumo Final Não Energético (10 ⁹ Kcal)	Emissões de "CO ₂ " Gg)
Petróleo	0	0,000E+00	20,0	0,000E+00	0	0,990	0,0	0,0	0	0
Gasolina	32.391	1,356E+05	18,9	2,563E+06	2.563	0,990	2.537,0	9.302,3	0	0
Querosene	10.373	4,342E+04	19,6	8,511E+05	851	0,990	842,5	3.089,3	0	0
Óleo diesel	56.976	2,385E+05	20,2	4,818E+06	4.818	0,990	4.769,6	17.488,4	0	0
Óleo combustível	45.941	1,923E+05	21,1	4,058E+06	4.058	0,990	4.017,1	14.729,5	0	0
GLP	16.444	6,883E+04	17,2	1,184E+06	1.184	0,990	1.172,1	4.297,8	0	0
Nafía	14.259	5,969E+04	20,0	1,194E+06	1.194	0,990	1.181,8	4.333,4	12.123	3.684
Outras secundárias	4.493	1,881E+04	20,0	3,762E+05	376	0,990	372,4	1.365,4	0	0
Carvão vapor	800	3,349E+03	25,8	8,640E+04	86	0,980	84,7	310,5	0	0
Carvão metalúrgico	0	0,000E+00	25,8	0,000E+00	0	0,980	0,0	0,0	0	0
Coque de carvão metalúrgico	14.110	5,906E+04	27,5	1,624E+06	1.624	0,990	1.608,0	5.896,1	0	0
Gás natural	5.775	2,417E+04	15,3	3,699E+05	370	0,995	368,0	1.349,4	0	0
Gás canalizado	651	2,725E+03	15,3	4,169E+04	42	0,995	41,5	152,1	0	0
Gás de refinaria	13.840	5,793E+04	15,3	8,864E+05	886	0,995	882,0	3.233,9	8.356	2.195
Gás de coque	2.904	1,216E+04	17,2	2,091E+05	209	0,995	208,0	762,8	0	0
TOTAL DE FÓSSEIS	218.957	9,194E+05		1,826E+07	18.261		18.084,8	66.310,9	20.479	5.637

Fonte: SMA, 1997.

Tabela 4: Emissão de CO₂ (Gg) por setor do Estado de São Paulo em 1994 (metodologia "Bottom-up")

Fontes Energéticas	Consumo Final		Setores:							
	Energético		Energético	Residencial	Comercial e Público	Agropecuário	Transportes	Industrial		
Petróleo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gasolina	9.302	0	0	0	0	92	9.211	0	0	0
Querosene	3.089	0	0	22	41	2	2.909	114	0	0
Óleo diesel	17.488	0	27	0	351	2.526	14.340	245	0	0
Óleo combustível	14.730	0	1.896	0	137	3	2.006	10.687	0	0
GLP	4.298	11	3.706	0	536	13	0	32	0	0
Nafta	649	0	0	0	0	0	0	649	0	0
Outras secundárias	1.365	0	0	0	0	0	0	1.365	0	0
Carvão vapor	310	0	0	0	0	0	0	310	0	0
Carvão metalúrgico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coque de carvão metalúrgico	5.896	0	0	0	0	0	0	5.896	0	0
Gás natural	1.349	0	0	29	25	0	37	1.257	0	0
Gás canalizado	152	1	82	0	57	0	0	12	0	0
Gás de refinaria	1.281	1.281	0	0	0	0	0	0	0	0
Gás de coque	763	169	0	0	0	0	0	594	0	0
TOTAL DE FÓSSAIS	60.674	3.385	3.840	1.148	2.636	28.504	21.162	0	0	0

Fonte: SMA, 1997.

Tabela 5: Emissão de CO₂ (Gg) por segmento industrial do Estado de São Paulo em 1994 (metodologia "Bottom-up")

Fontes Energéticas	Segmentos:										Outros
	Cimento	Ferro Gusa e Aço	Mineração e Pelotização	Não Ferr. /Out. Metais	Químico	Alimentos e Bebidas	Têxtil	Papel e Celulose	Cerâmica		
Petróleo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Gasolina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Querosene	0	19	2	10	41	2	2	5	5	27	
Óleo diesel	3	16	35	0	35	88	5	5	5	53	
Óleo combustível	624	639	58	183	3.250	1.682	505	899	346	2.501	
GLP	0	6	0	0	14	2	2	0	5	3	
Nafta	0	0	0	0	649	0	0	0	0	0	
Outras secundárias	94	0	0	1.236	13	0	0	0	0	22	
Carvão vapor	295	0	0	0	0	8	0	0	8	0	
Carvão metalúrgico	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Coque de carvão metalúrgico	138	5.758	0	0	0	0	0	0	0	0	
Gás natural	4	0	0	291	279	102	63	114	108	297	
Gás canalizado	0	0	0	7	0	5	0	0	0	0	
Gás de refinaria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Gás de coque	0	594	0	0	0	0	0	0	0	0	
TOTAL DE FÓSSEIS	1.158	7.033	95	1.727	4.282	1.888	577	1.023	476	2.902	

Fonte: SMA, 1997.

Fonte: SMA, 1997.

Tabela 6: Emissão de CO₂ (Gg) por setor nacional em 1994 (metodologia "Bottom-up")

Fontes Energéticas	Setores:					Transportes	Industrial
	Consumo Final Energético	Energético	Residencial	Comercial e Público	Agropecuário		
Petróleo	0	0	0	0	0	0	0
Gasolina	26.827	0	0	0	0	26.827	0
Querosene	6.449	15	232	6	0	6.086	110
Óleo diesel	73.035	753	0	775	12.314	57.747	1.446
Óleo combustível	33.697	5.281	0	2.100	201	2.619	23.497
GLP	16.013	40	14.677	451	3	0	842
Nafta	12	12	0	0	0	0	0
Não energéticos do petróleo	0	0	0	0	0	0	0
Coque de petróleo	13.856	7.959	0	73	0	0	5.824
Gás de refinaria	0	0	0	0	0	0	0
Outras primárias fósseis	1.122	0	0	0	0	0	1.122
Carvão vapor	3.342	0	0	0	0	0	3.342
Carvão metalúrgico	1.032	0	0	0	0	0	1.032
Coque de carvão metalúrgico	28.265	0	0	0	0	0	28.265
Alcatrão	777	0	0	0	0	0	777
Gás natural	6.136	2.011	59	37	0	89	3.942
Gás canalizado	304	0	209	79	0	0	16
Gás de coqueria	5.126	1.433	0	0	0	0	3.693
TOTAL DE FÓSSEIS	215.994	17.505	15.178	3.520	12.517	93.368	73.920

Fonte: Própria.

Tabela 7: Emissão de CO₂ (Gg) por segmento industrial nacional em 1994 (metodologia “Bottom-up”)

Fontes Energéticas	Segmentos:										Outros
	Cimento	Ferro Gusa e Aço	Ferro Ligas	Mineração e Pelotização	Não Ferr. /Out. Metais	Químico	Alimentos e Bebidas	Têxtil	Papel e Celulose	Cerâmica	
Petróleo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gasolina	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Querosene	3	31	0	6	0	0	28	3	6	6	28
Óleo diesel	50	123	0	413	0	211	91	6	66	22	463
Óleo combustível	3.422	1.514	0	1.991	1.214	4.551	2.764	1.122	2.211	1.563	3.146
GLP	0	78	0	3	54	38	70	8	21	354	217
Nafta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Não energético do petróleo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coque de petróleo	9	9	0	9	1.853	3.817	0	0	99	0	30
Gás de refinaria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Outras primárias fósseis	0	0	0	0	0	0	0	0	1122	0	0
Carvão vapor	1.366	36	40	0	267	482	311	16	331	327	167
Carvão metalúrgico	0	1.032	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Coque de carvão metalúrgico	0	27.142	167	588	369	0	0	0	0	0	0
Alcatrão	16	761	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gás natural	11	984	59	170	77	997	350	177	202	242	684
Gás canalizado	0	0	5	0	2	0	2	0	0	0	7
Gás de coqueria	0	3.693	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL DE FÓSSEIS	4.877	35.400	271	3.179	3.836	10.095	3.615	1.333	4.058	2.514	4.741

Fonte: Própria.