

PRINCÍPIOS DE ECOLOGIA INDUSTRIAL
APLICADOS À SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL
E AOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE AÇO

Márcio Macedo da Costa

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO
DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

Aprovada por:

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

Prof. Luiz Pinguelli Rosa, D.Sc.

Prof. Aluísio Campos Machado, Ph.D.

Prof. Emílio Lèbre de la Rovere, D.Sc.

Prof. Biagio Gianetti, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, R.J. - BRASIL
DEZEMBRO DE 2002

COSTA, MÁRCIO MACEDO DA

Princípios de Ecologia Industrial
Aplicados à Sustentabilidade Ambiental e aos
Sistemas de Produção de Aço [Rio de
Janeiro] 2002

XIV, 257 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
D.Sc., Planejamento Energético, 2002)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Ecologia Industrial
2. Produção de aço
3. Poluição
4. Exergia
5. Análise de Ciclo de Vida
6. Sustentabilidade
7. Ecossistemas Industriais

I. COPPE/UFRJ

II. Título (série)

Para Christina e Isabella, minha mais nova família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos pais, Haroldo e Waldéia, que me apoiaram em todos os momentos e sempre foram os pilares de minha formação.

À Christina, por seu amor e paciência com tantos fins de semana dedicados ao trabalho. À Isabella, que dividiu comigo seu computador, por seu carinho.

À Marco Aurélio Cabral Pinto e Luciana Madeira, companheiros e incentivadores desde a primeira hora, ativos nos debates políticos, ecológicos e culturais.

Aos amigos Giovani Machado e Valéria Rodrigues, que formaram comigo em 1999 um conclave brasileiro em Berkeley, no estado da Califórnia, onde passamos um tempo festivo, de grandes descobertas, e acima de tudo bastante produtivo.

À Alexandre Szklo e Claude Cohen, cuja amizade ultrapassou as fronteiras do Fundão.

À Ricardo e Mauro, velhos amigos do PPE e novos colegas no BNDES, pelo incentivo de sempre.

Aos sempre prestativos colegas da secretaria do PPE, Sandra, Simone, Paulo e Cláudia, e da Biblioteca, Mônica e Rita.

Ao Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), centro de pesquisas de excelência, que ofereceu sua infraestrutura para o desenvolvimento de parte deste trabalho. À Universidade da Califórnia, Berkeley, onde pude encontrar todas as referências bibliográficas que busquei.

À Ernst Worrell e Lynn Price, que tão bem me receberam no LBNL, onde a experiência profissional e cultural foi marcante.

Aos amigos do BNDES, Jorge, Luciano, Josiane, Márcio e Luiz Filipe, que compartilharam um pouco da minha ansiedade na fase final da tese.

Aos meus amigos e companheiros de Os Verdes – Movimento de Ecologia Social, que tanto me ensinaram sobre Ecopolítica, na teoria e na prática.

Ao CNPq e à CAPES, que me concederam bolsas de doutorado pleno e doutorado sanduíche, respectivamente, sem as quais não teria sido possível a realização deste trabalho.

Ao professor José Ribamar Brasil Chehebe, da Universidade Federal Fluminense (UFF) e do Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), autoridade maior no Brasil em Análise de Ciclo de Vida, em especial a do aço, que sempre foi um crítico contundente e colaborador essencial para este trabalho.

À Cláudio Ulpiano, da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), notável professor de filosofia, ativador e ativista do pensamento, cujos cursos e plenárias assisti com entusiasmo no início da década de 90.

Ao professor Roberto Schaeffer, orientador e amigo, que para mim sempre foi uma referência para o rigor acadêmico, e que tanto me ajudou durante o período de Mestrado e Doutorado.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

PRINCÍPIOS DE ECOLOGIA INDUSTRIAL
APLICADOS À SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL
E AOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE AÇO

Márcio Macedo da Costa

Dezembro / 2002

Orientador: Roberto Schaeffer

Programa: Planejamento Energético

A partir de analogias biológicas com ecossistemas naturais, a Ecologia Industrial identifica e propõe novos arranjos para os fluxos de energia e materiais em sistemas industriais, tendo como princípios básicos a busca de integração das atividades econômicas e a redução da degradação ambiental.

Neste trabalho a visão sistêmica e os princípios da Ecologia Industrial servem como base para uma avaliação e comparação dos processos mais importantes de produção de aço e suas tendências tecnológicas, em uma perspectiva que inclui, além das plantas siderúrgicas, outras etapas da cadeia de produção. O foco é direcionado para emissões atmosféricas e, de modo mais abrangente, para a variável “exergia”, utilizada como unidade de medida comum para insumos energéticos e materiais, produtos e poluentes.

Para além das questões quantitativas, o programa de sustentabilidade ambiental proposto pela Ecologia Industrial ainda enfrenta o desafio de lidar com aspectos sócio-culturais e com as heterogeneidades dos sistemas econômicos. Com o objetivo de formular bases teóricas de uma Ecopolítica da Ecologia Industrial, foi elaborado um conceito de ecossistema industrial. É criticado o finalismo implícito das Economias Ambientais Neoclássica e Termodinâmica, e defendido que a busca de equidade no presente é condição fundamental para a sustentabilidade no futuro.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

INDUSTRIAL ECOLOGY PRINCIPLES
APPLIED TO ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY
AND STEEL PRODUCTION SYSTEMS

Márcio Macedo da Costa

December / 2002

Advisor: Roberto Schaeffer

Department: Energy Planning

From biological analogies with natural ecosystems, Industrial Ecology identify and propose reorganization of the energy and material flows in industrial systems. The basic principles of Industrial Ecology include integration of economic activities and environmental impacts reduction.

In this dissertation, Industrial Ecology principles are used to evaluate and compare the most important steel production processes and its technological trends, not only for steelworks but also for other steps in the whole production chain. The main focuses are atmospheric emission factors and the variable ‘exergy’, accounted as a common measure for energy and material inputs, products and wastes.

Beyond quantitative issues, the environmental sustainability program based on Industrial Ecology has to deal with social and cultural aspects and with heterogeneous economic systems. In order to establish a theoretical basis for an ecological policy derived from Industrial Ecology, an industrial ecosystem concept is developed. The implicit finalism of Neoclassical and Thermodynamic Environmental Economics is criticized. Finally, it is suggested that social equity issues at the present are a fundamental condition for future environmental sustainability.

ÍNDICE

Introdução	1
CAPÍTULO I: ECOLOGIA INDUSTRIAL	12
I.1 Analogia Biológica dos Ecossistemas Industriais	14
I.2 Idéias precursoras e definições	17
I.3 Princípios, metas e práticas da Ecologia Industrial	20
I.3.1 Produção Mais Limpa: Prevenção da Poluição e Projeto para o Ambiente	21
I.3.2 Princípios de Ecologia Industrial	26
I.4 Análise de Ciclo de Vida (ACV)	29
I.5 Ecologia Industrial em empresas	32
I.6 Ecologia Industrial como paradigma econômico-ambiental	36
I.7 Debates em torno da Ecologia Industrial	40
CAPÍTULO II: PERFIL AMBIENTAL DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE AÇO	44
II.1 A Indústria de Produção de Aço	44
II.1.1 Processos de produção	49
II.2 Determinação de Níveis de Emissões	53
II.2.1 Base de dados e informações	53
II.2.2 Poluentes e Alternativas de Controle e Prevenção de Poluição	54
II.2.3 As faixas de emissão	56
II.3 Pelotização	58
II.4 Sinterização	64
II.5 Coqueificação	71
II.6 Alto-forno	80
II.7 Aciaria a Oxigênio	87
II.8 Aciaria Elétrica	97
II.9 Lingotamento e Laminação	104
II.10 Redução direta (ferro esponja)	105
II.11 Fusão redutora (COREX)	107
II.12 Sucata	109
II.13 Outras etapas de produção	111
II.14 Efluentes Líquidos	112
II.15 Resíduos Sólidos	113
CAPÍTULO III: INVENTÁRIO DOS FLUXOS DE ENERGIA E MATERIAIS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE AÇO	115
III.1 Escopo e premissas principais	115

III.2	Descrição do modelo	120
III.3	Caso Base	125
III.4	Simulações	140
III.4.1	Geração de energia elétrica: <i>mix</i> de fontes e autoprodução	140
III.4.2	Ferro-esponja (DRI) na carga dos fornos elétricos da rota semi-integrada	142
III.4.3	Carga de Pelotas/Sinter nos Altos-fornos	143
III.5	Discussão final dos resultados	143

CAPÍTULO IV: INVENTÁRIO EXERGÉTICO DOS FLUXOS DE ENERGIA E MATERIAIS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE AÇO **147**

IV.1	O Conceito de Exergia	148
IV.1.1	A função exergia	149
IV.1.2	Trabalho máximo e exergia perdida	152
IV.2	O Balanço de Exergia	154
IV.3	Resultados	156
IV.4	Análise de sensibilidade	161
IV.4.1	Rota de produção Integrada Convencional	162
IV.4.2	Rota de produção semi-integrada	163
IV.4.3	Rota de produção integrada com fusão redutora COREX	164
IV.5	Discussão dos resultados	165
IV.6	Conclusões	169

CAPÍTULO V: ECOSSISTEMAS INDUSTRIAIS: DA ANALOGIA BIOLÓGICA À ECOPOLÍTICA **174**

V.1	Ecosistema Industrial: uma abordagem conceitual	176
V.1.1	As quatro causas aristotélicas	176
V.1.2	Pólos, eixos e causas – o diagrama do ecossistema industrial	179
V.1.3	Teleomático, teleonômico e teleológico	185
V.1.4	Ecosistemas Industriais como sistemas autopoieticos	187
V.2	Sustentabilidade e distribuição ecológica	192
V.2.1	Organização e dissipação entrópica em sistemas econômicos	193
V.2.2	Economia Ambiental Neoclássica e o imperativo tecnológico	196
V.2.3	Economia termodinâmica e o imperativo ambiental	201
V.3	Sistemas de produção de aço como ecossistemas industriais	205

CAPÍTULO VI: ECOSSISTEMAS INDUSTRIAIS: OS PRIMEIROS E O ENÉSIMO PASSO **210**

VI.1	Ecologia Industrial da produção de aço	213
VI.2	Ecosistemas industriais e Ecopolítica	224

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **227**

ANEXO A **245**

ANEXO B **252**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático da estrutura da tese em capítulos _____	11
Figura 2 – Rotas para os materiais poluentes para um processo de produção _____	22
Figura 3 – Diagrama de atividades de redução de poluição na fonte de geração dos poluentes _____	26
Figura 4 – Evolução da produção mundial de aço (IISI, 2001) _____	45
Figura 5 - Esquema simplificado dos principais processos, integrado e semi-integrado, de produção de aço _____	52
Figura 6 – Esquema simplificado das emissões da etapa de pelletização _____	59
Figura 7 – Esquema simplificado dos insumos e emissões atmosféricas da etapa de sinterização _____	65
Figura 8 - Esquema simplificado da etapa de coqueificação _____	72
Figura 9 - Diagrama esquemático da etapa de produção de ferro-gusa no Alto-forno _____	81
Figura 10 - Sistemas de despoeiramento da Aciaria Elétrica _____	99
Figura 11 - Diagrama esquemático de uma planta de fusão redutora COREX _____	108
Figura 12 - Fluxos de sucata na indústria de ferro e aço (os números da produção mundial indicam a oferta e a participação de cada tipo de sucata, respectivamente, para o ano de 1998) _____	110
Figura 13 – Diagrama esquemático de uma planta integrada convencional (as etapas de Lingotamento e Laminação, não avaliadas, geralmente fazem parte das plantas siderúrgicas) _____	117
Figura 14 – Diagrama esquemático de uma planta semi-integrada (as etapas de Lingotamento e Laminação, não avaliadas neste trabalho, geralmente fazem parte das plantas siderúrgicas) _____	118
Figura 15 - Usina Integrada Com Fusão-Redutora (Corex) e Aciaria a Oxigênio ou Elétrica (as etapas de Lingotamento e Laminação, não avaliadas neste trabalho, geralmente fazem parte das plantas siderúrgicas) _____	119
Figura 16 – Emissões de particulados, SO ₂ e NO _x para a rota integrada por etapa de produção para o nível Médio _____	130
Figura 17 - Emissões de particulados, SO ₂ e NO _x para a rota integrada por etapa de produção para o nível Alto _____	130
Figura 18 - Emissões de particulados, SO ₂ e NO _x para a rota Semi-integrada por etapa de produção para o nível Médio _____	131
Figura 19 - Emissões de particulados, SO ₂ e NO _x para a rota Semi-integrada por etapa de produção para o nível Alto _____	131
Figura 20 - Emissões de particulados, SO ₂ e NO _x para a rota integrada com fusão redutora COREX e Aciaria a Oxigênio por etapa de produção para o nível Médio _____	132
Figura 21 - Emissões de particulados, SO ₂ e NO _x para a rota integrada com fusão redutora COREX e Aciaria Elétrica por etapa de produção para o nível Médio _____	132
Figura 22 – Emissões de material particulado de plantas siderúrgicas por nível de emissões _____	133
Figura 23 - Emissões de material particulado de rotas de produção por nível de emissões _____	134
Figura 24 - Emissões de SO ₂ de plantas siderúrgicas por nível de emissões _____	134
Figura 25 - Emissões de SO ₂ de rotas de produção por nível de emissões _____	135

Figura 26 - Emissões de NOx de plantas siderúrgicas por nível de emissões _____	135
Figura 27 - Emissões de NOx de rotas de produção por nível de emissões _____	136
Figura 28 - Emissões de CO de plantas siderúrgicas por nível de emissões _____	136
Figura 29 - Emissões de CO de rotas de produção por nível de emissões _____	137
Figura 30 - Emissões de HCl e HF para a rota integrada por etapa de produção para o nível Médio _____	137
Figura 31 - Emissões de HCl e HF para a rota integrada com fusão redutora COREX por etapa de produção para o nível Médio _____	138
Figura 32 - Emissões de HCl para rotas de produção por nível de emissões _____	139
Figura 33 - Emissões de HF para rotas de produção por nível de emissões _____	139
Figura 34 – Emissões de SO ₂ para as rotas de produção no caso de geração elétrica com térmicas a carvão _____	141
Figura 35 - Emissões de NOx para as rotas de produção no caso de geração elétrica com térmicas a carvão _____	141
Figura 36 – O sistema A e o ambiente A ₀ com variáveis intensivas e extensivas _____	151
Figura 37 – Diagrama de um sistema termodinâmico que realiza trabalho a partir do absorção de calor proveniente de um ambiente na temperatura T ₀ _____	153
Figura 38 - Balanço exergético para uma etapa de processo, representando qualquer sistema industrial, como uma etapa de processo industrial, uma planta de produção ou uma cadeia de produção de um produto referência. _____	155
Figura 39 - Balanço exergético para etapas de produção selecionadas (GJ/unidade de produto). E-energia; M-materiais; R-resíduos (emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos); Pr- produtos e sub-produtos; Pe-perdas. _____	158
Figura 40 – Faixas de perdas de exergia para as rotas de produção selecionadas (GJ/ ton de aço líquido) _____	164
Figura 41 – Faixas de perdas de exergia para plantas siderúrgicas selecionadas (GJ/ ton de aço líquido) _____	165
Figura 42 – Faixas de eficiências exergéticas Ψ_2 para plantas siderúrgicas somente (%) ____	165
Figura 43 – Diagrama esquemático das causas e componentes do ecossistema industrial _	181
Figura 44 - Representação esquemática qualitativa/quantitativa e conceitual/prática dos vários temas da Ecologia Industrial. Elaboração própria a partir de Marstrander et al. (1999)	211
Figura 45 - Diagrama esquemático com a evolução dos processos de produção de aço a partir do período de predominância das aciarias Open Hearth (Freuhan, 1996) _____	215

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre as características de organismos biológicos e organismos industriais _____	16
Tabela 2 – Dualidade de objetivos do conceito de Projeto para o Ambiente (U.S. Congress, 1992b) _____	24
Tabela 3 – Princípios de Ecologia Industrial selecionados por três categorias _____	27
Tabela 4 - Paradigmas econômico-ambientais selecionados _____	37
Tabela 5 – Comparação de características selecionadas da prevenção da Poluição e Ecologia Industrial (Oldenburg e Geiser, 1997) _____	41
Tabela 6 – Participação dos diversos processos de produção de aço em países selecionados _____	46
Tabela 7 – Características de usinas integradas e semi-integradas (Andrade et al., 2000a) _____	50
Tabela 8 – Principais insumos e produtos energéticos e materiais na produção aço _____	51
Tabela 9 - Insumos em plantas de pelletização ^a (EIPPCB, 1999) _____	60
Tabela 10 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para plantas de pelletização _____	64
Tabela 11 – Fatores de emissões atmosféricas em plantas de pelletização para níveis selecionados. _____	64
Tabela 12 - Insumos em plantas de sinterização (EIPPCB, 1999) _____	66
Tabela 13 - Insumos energéticos em 7 plantas de sinterização (IISI, 1998) _____	66
Tabela 14 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para plantas de sinterização. _____	70
Tabela 15 – Fatores de emissões atmosféricas em plantas de sinterização para níveis selecionados. _____	71
Tabela 16 – Insumos, produtos e sub-produtos em plantas de coque ^a (EIPPCB, 1999) _____	73
Tabela 17 – Insumos energéticos em 4 plantas de coque (IISI, 1998) _____	73
Tabela 18 – Emissões sem controle de poluentes selecionados por etapa de processo nas plantas de coque em g/t coque (EPA, 1995) _____	76
Tabela 19 – Emissões de plantas de coque antigas (Hein et al., 1996) _____	76
Tabela 20 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para coquerias _____	77
Tabela 21 – Fatores de emissão atmosféricas em plantas de coque para níveis selecionados. _____	80
Tabela 22 – Insumos em Altos-fornos (EIPPCB, 1999) _____	82
Tabela 23 – Consumo residual de coque a diferentes valores de PCI _____	82
Tabela 24 – Fatores de emissão adotados por estágio de produção nos altos-fornos para os níveis de emissão Baixo, Médio e Alto. _____	85
Tabela 25 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para Altos-fornos _____	86
Tabela 26 – Fatores de emissão atmosféricas em altos-fornos para níveis selecionados. _____	87
Tabela 27 – Insumos e produtos para 5 aciarias a oxigênio (IISI, 1998) _____	89
Tabela 28 – Insumos e produtos energéticos em 4 Aciarias a oxigênio na Europa ^a (EIPPCB, 1999) _____	90
Tabela 29 – Fatores de emissão de particulados depois do abatimento para etapas e tipo de operações em aciarias a oxigênio _____	94
Tabela 30 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para Aciaria a oxigênio _____	96
Tabela 31 – Fatores de emissão atmosféricas em Aciarias a oxigênio para níveis selecionados. _____	96
Tabela 32 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para Aciaria elétrica _____	103
Tabela 33 - Fatores de emissão atmosféricas em Aciarias Elétricas para níveis selecionados _____	104
Tabela 34 - Insumos e fatores de emissão da etapa de Laminação a Quente _____	105

Tabela 35 – Características de processos de redução direta (Infomil, 1997; IISI eUNEP, 1997)	107
Tabela 36 – Insumos em plantas de redução direta Midrex (Midrex, 1999)	107
Tabela 37 - Insumos e emissões para a produção de metal COREX (VAI, 1997)	109
Tabela 38 - Consumo mundial de sucata por unidade metalúrgica	111
Tabela 39 - Fatores de emissão utilizados no Caso base (valores em gramas por unidade de produto)	112
Tabela 40 – Valores de geração e reciclagem de resíduos sólidos nas plantas siderúrgicas	113
Tabela 41 – Matrizes A com os principais fluxos de energia e materiais da rota de produção integrada convencional para o nível Médio	122
Tabela 42 – Matrizes A com os principais fluxos de energia e materiais da rota de produção semi-integrada para o nível Médio	123
Tabela 43 – Matrizes A com os principais fluxos de energia e materiais da rota de produção integrada com fusão redutora (COREX-Aciaria a oxigênio) para o nível Médio	123
Tabela 44 – Matrizes A com os principais fluxos de energia e materiais da rota de produção integrada com fusão redutora (COREX-Aciaria a oxigênio) para o nível Médio	124
Tabela 45 – Total de produtos por tonelada de aço líquido das rotas de produção por processo	125
Tabela 46 – Emissões totais para as rotas de produção e plantas siderúrgicas de processos de produção de aço (nível Médio)	126
Tabela 47 – Comparação percentual entre emissões das rotas de produção e das plantas siderúrgicas (planta / rota)	129
Tabela 48 – Variação percentual de emissões da geração elétrica a carvão e hidroelétrica em relação ao Caso Base por rota de produção para o nível Médio	142
Tabela 49 - Efeito da carga de DRI em fornos elétricos sobre as emissões atmosféricas da rota de produção semi-integrada	143
Tabela 50 - Quadro comparativo de diversos potenciais termodinâmicos	150
Tabela 51 – Perdas de exergia para as etapas de produção da rota Integrada Convencional (Caso Base)	159
Tabela 52 – Perdas de exergia para as etapas de produção da rota semi-integrada com forno elétrico a arco (Caso Base)	159
Tabela 53 – Perdas de exergia para as etapas de produção da rota integrada com fusão redutora (COREX-aciaria a oxigênio) no Caso Base	160
Tabela 54 – Perdas de exergia para as etapas de produção da rota integrada com fusão redutora (COREX-aciaria elétrica FEA) no Caso Base	160
Tabela 55 – Eficiências exergéticas e perdas de exergia para rotas e plantas de produção distintas	161
Tabela 56 - Perdas de exergia da rota de produção semi-integrada conforme a carga metálica no forno elétrico e o tipo de geração de energia elétrica	163
Tabela 57 - Descrição de estudos selecionados de inventário exergético de sistemas de produção de aço	166
Tabela 58 – Valores exergéticos de saída para plantas siderúrgicas selecionadas	168
Tabela 59 – Valores específicos e totais de exergia para emissões atmosféricas e efluentes líquidos selecionados para uma planta integrada convencional.	171
Tabela 60 – Valores de exergia específicos e totais para os sub-produtos da coqueria	172
Tabela 61 – Valores específicos e totais de resíduos sólidos gerados no Alto-forno e Aciaria a oxigênio	172

Tabela 62 - Elementos de Termoeconomia e as causas aristotélicas (Valero e Serrano, 1994)	179
Tabela 63 - Elementos dos pólos dos ecossistemas industriais de acordo com níveis selecionados de descrição econômica	184
Tabela 64 – Atividades tele em sistemas biológicos	185
Tabela 65 - Principais aspectos ambientais de cada etapa dos sistemas de produção de aço	216
Tabela 67 - Aspectos energéticos, ambientais e tecnológicos das rotas de produção de aço	217
Tabela 66 - Principais resultados comparativos dos processos analisados para emissões atmosféricas e perdas/eficiências exergéticas	218
Tabela 68 - Estimativa de fatores de emissões atmosféricas para 1 tonelada de aço, incluindo etapas de laminação e acabamento (não estudadas em detalhe nesta dissertação) para o nível de emissão Médio	223
Tabela 69 - Valores de perdas exergéticas ampliadas (GJ/t aço laminado)	224

INTRODUÇÃO

Esta tese tem dois objetivos distintos, ambos vinculados ao campo de conhecimento da Ecologia Industrial. O primeiro, quantitativo, é voltado para sistemas de produção de aço, e o segundo, conceitual, para a formulação das bases teóricas de uma Ecopolítica da Ecologia Industrial.

Partimos da analogia fundadora da Ecologia Industrial, qual seja, a de que a reestruturação dos sistemas industriais em direção à sustentabilidade ambiental deveria ter como base os princípios organizacionais dos ecossistemas naturais. Assim como estes se caracterizam pela reciclagem dos materiais, pela interdependência das espécies e pela utilização da fonte energética solar, os sistemas industriais deveriam otimizar o uso de energia, utilizar fontes renováveis, e promover o fechamento do ciclo de materiais por intermédio de múltiplas conexões das atividades de produção e consumo.

Portanto, na linha do primeiro objetivo, são aplicados princípios de Ecologia Industrial, que de modo geral visam minimizar os impactos ambientais das atividades econômicas, para avaliar e comparar os processos mais importantes de produção de aço e suas tendências tecnológicas, em uma perspectiva que inclui, além das plantas siderúrgicas, outras etapas da cadeia de produção. O foco é direcionado para indicadores de emissões atmosféricas e, de modo mais abrangente, para o indicador “exergia”, utilizado como unidade de medida comum para insumos energéticos/materiais, produtos e poluentes.

Na linha do segundo objetivo, partimos da noção de ecossistema industrial, derivada da analogia biológica, e identificamos a sua serventia para a definição das fronteiras espaço-temporais do objeto de estudo da Ecologia Industrial, no presente caso, os sistemas de produção de aço. Todavia, verificamos o limite de tal perspectiva, quando confrontada com outros aspectos relevantes para a reestruturação das atividades econômicas, ensejada pela Ecologia Industrial. Tais aspectos são variados e incluem as estruturas de produção e consumo das economias, os valores e símbolos da sociedade, as demandas por determinados produtos e serviços, a preferência dos consumidores, o estágio das tecnologias de produção etc. Elaboramos, então, um conceito de ecossistema industrial que tenta reconhecer e incluir estes aspectos, e a partir deste conceito chegamos às formulações ecopolíticas que julgamos úteis para o programa de sustentabilidade da Ecologia Industrial.

A Indústria de Ferro e Aço

Nas últimas três décadas o objetivo de aumento da eficiência energética no setor industrial levou à adoção de tecnologias de menor consumo energético baseadas em novos equipamentos, materiais e procedimentos operacionais. Apesar das melhorias significativas, a “onda de eficiência energética” ainda tem um longo caminho pela frente pois o potencial de “conservação de energia” ainda é bastante elevado em todos os setores da sociedade. Ao que tudo indica, o mesmo caminho estará sendo trilhado pela “onda de redução da poluição”.

Para as empresas, a estratégia ambiental tem mudado desde os anos 70, época em que a abordagem era calcada na realocação ou diluição dos poluentes, realizadas no sentido da minimização dos impactos locais. Em uma nova fase, a crescente proliferação de valores ecológicos na sociedade estimulou gradativamente os setores produtivos a adotar equipamentos de controle de poluição. Uma abordagem mais recente se baseia no conceito de Produção Mais Limpa, que significa a prevenção e minimização da geração de poluentes e adoção de tecnologias mais eficientes no uso de energia e materiais.

O setor de Ferro e Aço constitui um caso clássico de evolução tecnológica, em particular nos aspectos ambientais. Em primeiro lugar, o setor é altamente intensivo em energia e envolve grandes volumes de insumos materiais, poluentes e rejeitos. Segundo, enfrenta o desafio da competição com outros materiais, tanto no que se refere aos custos de produção quanto à *performance* dos produtos (Freuhan, 1996). Terceiro, as crescentes exigências expressas na legislação ambiental têm afetado as opções e o desenvolvimento tecnológico. Hoje, entre as empresas siderúrgicas já é possível identificar tendências para a integração das variáveis competitividade, qualidade de produto e redução do impacto ambiental (IISI, 1998). Apesar de grandes investimentos realizados para o controle de poluição – os quais levaram a significativas reduções na emissão de poluentes – melhorias e mudanças tecnológicas adicionais são necessárias para que as variáveis citadas se integrem de fato. A saudável e bem-vinda preocupação oriunda de associações industriais, agências ambientais e da sociedade de modo geral revela uma mudança gradual para uma perspectiva de prevenção da poluição (AISI, 1997; EPA, 1996; OECD, 1991).

Embora os primeiros e rudimentares alto-fornos tenham sido construídos há 400-500 anos, as raízes da tecnologia siderúrgica remontam à Revolução Industrial no século 19, e a modernidade teve o aço como um de seus principais pilares. A partir dos anos 50, a Indústria Siderúrgica experimentou um crescimento vertiginoso e, na virada do milênio, vive um período de reestruturação tecnológica, comercial e societária. Expectativas apontam para uma siderurgia do futuro mais compacta, mais eficiente energeticamente, altamente flexível em termos operacionais, que possa explorar sinergias de materiais com outras unidades industriais e que tenha um mínimo impacto ambiental (Szekely, 1995). Este poderia constituir o salto tecnológico e organizacional para a siderurgia do século 21.

De modo geral, o custo dos investimentos em controle e prevenção de poluição podem ser bastante significativos. Todavia, com o advento das crises do petróleo dos anos 70, o crescente combate ao desperdício energético mostrou ao longo dos anos o quanto a produtividade dos recursos energéticos e materiais ainda poderia crescer. A regulação ambiental e o cenário de taxas sobre emissões e custos crescentes de disposição de resíduos têm estimulado inovações que permitem a melhoria das posições competitivas das empresas (Porter e van der Linde, 1995a).

Tecnicamente, muitos avanços relacionados à eficiência no uso de energia e materiais já se encontram disponíveis, embora não tenham sido largamente disseminados (WEC, 1995). Os setores industriais cada vez mais conseguem obter retorno econômico com investimentos em tecnologias limpas, reciclagem e aproveitamento de rejeitos. Devemos levar em consideração os custos de oportunidade e a falta de recursos financeiros para investimentos, principalmente por parte dos setores industriais de países menos desenvolvidos. Os recursos são de fato escassos, e torna-se um desafio dar saltos qualitativos em direção a um melhor desempenho ambiental e maior competitividade na indústria. Trata-se de uma questão de estratégia de longo prazo que desde já precisa ser enfrentada (IHDP, 1999).

O que realmente estimula as firmas é a redução de custos e/ou a diferenciação de seus produtos (com qualidade superior ou como ecologicamente corretos) que lhe permitam obter vantagens no mercado consumidor. Pelo lado social, os benefícios obtidos com a manutenção do ar e dos corpos hídricos em boas condições no campo e, principalmente, próximo dos centros urbanos, muitas vezes se mostram prioritários por seus impactos na saúde da população (Wijetilleke e Karunaratne, 1995).

Esta tese é voltada para uma visão dos sistemas de produção de aço sob o prisma da Ecologia Industrial. Proveniente do universo da Engenharia, a Ecologia Industrial toma forma no fim dos anos 80 como campo de conhecimento, como “ciência da sustentabilidade ambiental” (Allenby, 1992), como programa sistemático de novos princípios organizacionais e tecnológicos que podem ser aplicados por economias inteiras e por firmas, individualmente ou em conjunto.

Ecologia Industrial

A partir de analogias biológicas com ecossistemas naturais, a Ecologia Industrial identifica e propõe novos arranjos para os fluxos de energia e materiais em sistemas industriais; busca também a integração das atividades econômicas e a redução da degradação ambiental (recursos e poluição). A Ecologia Industrial reúne conceitos já existentes, como Prevenção da Poluição e Produção Mais Limpa, e cria uma nova agenda de reorganização das atividades industriais, entendidas no seu contexto mais amplo de atividades econômicas, não restrito ao setor industrial propriamente dito. De modo geral, adota princípios de fechamento do ciclo de materiais e desmaterialização crescente da economia. O espectro de alcance da Ecologia Industrial, ainda sem definição completa e consensual, parece ser vasto: da dimensão micro, ligada às vantagens econômicas para as empresas da redução da geração de poluentes e aproveitamento de resíduos em outras unidades, até à dimensão macro, em que um novo paradigma econômico-ambiental é construído na direção das práticas de sustentabilidade¹. Não é de surpreender a permanência de tais incertezas, posto que a Ecologia Industrial é um campo de conhecimento de criação recente, ainda em formação. Há certos debates que tentaremos explicitar, a saber, se a Ecologia Industrial deve ser bem definida, como a Prevenção da Poluição, ou, de modo mais abrangente, como um paradigma econômico-ambiental; se a Ecologia Industrial deve se situar no campo analítico ou prescritivo, objetivo ou normativo; e sobre as vantagens para os agentes econômicos privados da aplicação de princípios da Ecologia Industrial.

¹ Assumimos neste trabalho o conceito de sustentabilidade forte, para o qual a capacidade de substituição do capital natural pelo capital humano é limitada, ou seja, em oposição à sustentabilidade fraca do arcabouço neoclássico, a noção de irreversibilidade está presente e implica restrições a processos como o aumento da concentração de gases do efeito estufa na atmosfera ou o acúmulo de substâncias tóxicas persistentes.

Embora muitos dos princípios da Ecologia Industrial ligados à reciclagem interna e externa sejam adotados nos sistemas de produção de aço, ainda se espera que a evolução dos processos siderúrgicos se dê em direção ao “esverdeamento” de toda a cadeia de produção e consumo (Szekely, 1995).

Emissões atmosféricas de sistemas de produção de aço

Ao investigar os aspectos ambientais de diferentes rotas de produção de aço, optou-se por privilegiar as emissões atmosféricas em razão de sua importância na caracterização do perfil ambiental da indústria. As emissões de efluentes líquidos e a geração de resíduos sólidos são em parte determinados pelo tipo de tecnologia adotada para o controle e prevenção dos poluentes atmosféricos. Além disso, a base de dados para emissões atmosféricas é mais robusta e apresenta maior detalhamento técnico

Foi desenvolvida uma metodologia, baseada em álgebra matricial, para simular os fluxos de energia e materiais, com enfoque nos fatores de emissões atmosféricas. Uma espécie de cartografia do setor foi realizada com a determinação de 4 níveis de emissão para cada etapa de produção de aço, assim como a inclusão das emissões de outras etapas que não se localizam nas plantas siderúrgicas. Por intermédio do método de Análise de Ciclo de Vida, foram calculadas as emissões para cada um dos processos de produção.

De antemão sabemos que os processos de produção integrados convencionais, que incluem Coqueria, Alto-forno e Aciaria a oxigênio, são mais poluentes que os processos semi-integrados que utilizam ferro-esponja e sucata em fornos elétricos a arco. No entanto, os perfis ambientais da produção de aço apontam para problemas ainda de difícil solução em todas as rotas de produção. O que nos leva às primeiras perguntas que tentaremos responder:

- 1. Para cada um dos processos tecnológicos, quais os fatores de emissão por tonelada de aço líquido dos poluentes atmosféricos nas plantas siderúrgicas e nas rotas de produção? Quais as etapas de produção mais importantes no que se refere às emissões atmosféricas?*
- 2. Qual o cenário de evolução tecnológica para cada uma das etapas de produção com relação à prevenção e controle de poluição?*
- 3. Quais os limites das faixas de emissão de cada um dos processos e como estes podem ser comparados?*

4. *Quais os prós e contras das diversas opções tecnológicas para redução de poluição?*

Perdas e eficiências exergeticas

A exergia é o mais geral dos potenciais termodinâmicos (Evans, 1969) e pode ser usada para contabilizar, com base em uma única unidade de medida, os vetores energéticos, insumos materiais, produtos e poluentes (Wall, 1977; Szargut et al., 1988). No conceito de exergia são incorporadas a primeira e segunda leis da termodinâmica. Além das quantidades de energia, determinadas nos balanços energéticos de cada processo, a qualidade da energia, a disponibilidade e as irreversibilidades geradas são consideradas na análise exergetica. Daí a importância da contabilidade exergetica para a Ecologia Industrial. De um ponto de vista físico, torna-se possível verificar as eficiências e perdas exergeticas das atividades econômicas na transformação dos materiais, no consumo de bens e na prestação de serviços. A reorganização das atividades econômicas em bases sustentáveis, ensejada pela Ecologia Industrial, em muito pode se beneficiar desta metodologia de análise.

Apesar dos recentes desenvolvimentos, a análise exergetica ainda é marginal em relação a outros métodos consagrados da análise energética. As razões são variadas e vão desde a desinformação geral sobre o método até as dificuldades da obtenção de dados apropriados, que de fato são bastante significativas. Não obstante, a análise exergetica se presta a uma série de aplicações:

- ❖ Até hoje a utilização mais profícua e extensiva da análise exergetica se deu nos estudos e projetos de otimização de sistemas térmicos, principalmente para equipamentos industriais (Gyftopoulos et al., 1974; van Gool, 1992; Valero et al., 1996);
- ❖ Uma outra vertente de autores da área aplicou o método de contabilidade exergetica para fluxos energéticos e materiais das economias nacionais (Wall, 1990; Schaeffer e Wirtshafter, 1992; Wall et al., 1994);
- ❖ Trabalhos que, a partir do método do consumo exergetico cumulativo (Szargut, 1987), realizam Análises de Ciclo de Vida com base na contabilidade exergetica dos fluxos de energia e materiais, incluindo poluentes (Bisio, 1993; Ayres et al., 1996; Michaelis et al., 1998; Costa et al., 2001);

- ❖ Aplicação em sistemas ecológicos, especialmente os aquáticos e os agrícolas (Jørgensen, 1992 e 1997).

E as perguntas para o nosso trabalho são as seguintes:

5. *Em que etapas das rotas de produção de aço são maiores as perdas exergéticas?*
6. *Quais as eficiências exergéticas de cada um dos processos? Qual o arranjo mais eficiente? Em que medida os pontos extremos das faixas de eficiência exergética podem afetar estes resultados?*
7. *Em que medida um sistema de produção de aço pode ter o seu ciclo de materiais fechado?*
8. *Quanto em exergia por tonelada de aço produzida é perdido com os poluentes? Qual a importância relativa destas perdas diante da exergia dos produtos, subprodutos e das perdas pelas irreversibilidades? Qual a diferença das perdas exergéticas entre os poluentes?*

Um conceito de ecossistema industrial

A partir das noções derivadas da Biologia, a Ecologia Industrial concebe os ecossistemas industriais como um conjunto de unidades de produção e consumo no qual os fluxos energéticos e materiais perpassam as unidades tal como nos níveis tróficos de um ecossistema natural (Graedel, 1996). Existiria, portanto, um metabolismo industrial (Ayres, 1996) constituindo uma base biofísica da economia, e de modo mais explícito nos sistemas industriais. Todavia, como tentaremos mostrar, a analogia biológica, apesar de provocativa e fundadora de um olhar operacional para as tarefas da sustentabilidade, não encerra o programa da Ecologia Industrial.

O ecossistema industrial pode ser definido em função de um produto, de um material, de uma região específica, e por conseguinte estabelece as fronteiras do sistema que engloba os fluxos de energia e materiais (Richards et al, 1994). Há um esforço permanente entre os adeptos das linhas de pesquisa da Ecologia Industrial em mapear estas fronteiras e adotar uma visão sistêmica. No entanto, do nosso ponto de vista, para além da identificação de limites geográficos, setoriais ou de processos, importa para um ecossistema industrial os seus

elementos constituintes, os determinantes de sua mudança. Podemos identificar os ecossistemas industriais em três domínios distintos: o primeiro descreve o conjunto de interações físico-químicas energéticas e materiais das unidades de produção e consumo; o segundo se refere ao universo econômico das firmas e dos consumidores; e o terceiro destaca a conexão entre a rede de negócios e o seu ambiente social e ecológico.

Se coloca, portanto, para o programa de sustentabilidade da Ecologia Industrial, desafios que ultrapassam a oposição de um campo de conhecimento “objetivo-normativo”. Como a Ecologia Industrial pode contribuir para a constituição de uma política ecológica aberta aos determinantes sociais e econômicos? Qual o fundamento da multiplicidade e da unidade dos ecossistemas industriais em sua permanente transformação? O desafio, ao nosso ver, requer um passo filosófico na direção da tradição escolástica das causas. Trata-se de um suporte, de um ponto de partida para uma visão que seja transversal ao otimismo tecnológico e à escatologia termodinâmica. Não para encontrar, por intermédio de uma solução dialética, uma terceira posição, mas sim para formular um guia ecopolítico para a concepção e elaboração de novas organizações sócio-econômicas.

O ecossistema industrial será descrito por uma multiplicidade de elementos materiais/energéticos, processuais, simbólicos e organizacionais, e pela unidade dos sistemas que produzem a si mesmos, os sistemas autopoieticos, tal como abordados no campo da Biologia por Maturana e Varela (1973). As quatro causas aristotélicas – material, formal, final e eficiente – serão chamadas para indicar os eixos sobre os quais se sustentam e se transformam os ecossistemas industriais. Vamos tentar mostrar que tanto a economia ambiental neoclássica quanto a economia ambiental de base termodinâmica estão profundamente calcadas na primazia das causas finais. Há uma teleologia, um finalismo implícito em ambas, expresso no princípio diretor da mudança: a tendência ao equilíbrio.

Como o nosso intento é justamente descer para o patamar ontológico para dali tirar uma visão e práticas ecopolíticas, temos que verificar como a teleologia se manifesta nas proposições ecopolíticas para cada uma das economias ambientais citadas. O mecanicismo reversível dos neoclássicos, apontado em Mirowski (1989) e Söllner (1997), por exemplo, apresenta-se, em sua vertente ambiental, como resposta aos alarmes ambientalistas e deposita confiança absoluta na capacidade tecnológica para resolver os problemas da escassez de recursos e dos efeitos do aumento da poluição. Dirige-se neste campo um olhar certamente

depreciativo para a alternativa da economia termodinâmica. O problema da sustentabilidade ou não existe ou então é tratado marginalmente. É preciso, claro, identificar as nuances existentes em cada pólo. A incorporação de restrições ambientais no arcabouço teórico neoclássico, ligadas principalmente aos limites e às irreversibilidades termodinâmicas, representa uma posição que tenta precificar os bens e serviços ambientais, ou seja, tenta internalizar tais restrições na mecânica da tendência ao equilíbrio.

A proposição ecológica da economia de base termodinâmica aponta, em seu caso extremo, para a necessidade de redução, em termos absolutos, da degradação entrópica das atividades econômicas (Georgescu-Roegen, 1971; Rifkin, 1980). Seria uma forma de adiar o quanto possível o inelutável: a tendência de anulação dos gradientes que permitem a manutenção das sociedades humanas. A noção de limite é a decisiva aqui. Não haveria como se sustentar uma economia em permanente crescimento. O conflito intertemporal entre os direitos das gerações presentes e futuras marca as ações e perspectivas ecológicas. Daí uma certa primazia das questões de: *i)* padrões de consumo perdulários, típicos dos países desenvolvidos do Hemisfério Norte e dos grupos sociais privilegiados dos países menos desenvolvidos do Sul; e *ii)* controle populacional para reduzir a pressão sobre os recursos naturais.

O eixo de trabalho da Ecologia Industrial se apóia firmemente em uma base termodinâmica no privilégio do inventário de fluxos energéticos e materiais, na formulação de um programa de sustentabilidade para as firmas, conjuntos de firmas e economia em geral, como realizado nesta dissertação. Todavia, é mister ressaltar que recusamos o caráter finalista expresso nas visões teleológicas apontadas e nos voltamos para uma visão que privilegia as causas materiais e eficientes, no âmbito do conceito de ecossistema industrial, com seus desdobramentos ecológicos que valorizam a abertura irreduzível dos sistemas sócio-econômico-naturais para novos arranjos e organizações, em consonância com a sustentabilidade das gerações presentes e futuras. Não há solução, caminho ou destino pré-determinados, este é o sentido da passagem do conceito de ecossistemas industriais para uma formulação ecológica.

Trata-se, ao final, de um deslocamento do tradicional embate entre os otimistas tecnológicos e os alarmistas ambientais. Embora claramente vinculado à perspectiva termodinâmica, que partilha das preocupações e objetivos ambientalistas, o presente trabalho

ênfatiza as heterogeneidades, os aspectos distributivos dos sistemas econômicos. É um reconhecimento da capacidade destes sistemas de promover reorganizações locais favoráveis à própria sustentação, como se fossem ilhas de sustentabilidade em meio a um oceano de dissipação entrópica insustentável dados os limites do planeta e da velocidade das transformações. Este reconhecimento é importante para elaborar uma Ecopolítica da Ecologia Industrial. A tensão entre os custos e benefícios das opções tecnológicas permeia o programa de sustentabilidade ambiental.

Só haverá sustentabilidade futura na medida em que uma redistribuição ecológica dos recursos, benesses e prejuízos ambientais seja colocada em pauta e em prática, hoje. A equidade torna-se, neste sentido, não uma meta a ser atingida, mas sim uma tarefa ambiental sem a qual todos os esforços de garantia de recursos para as gerações futuras poderão estar condenados à reprodução do quadro atual de disparidades sociais acentuadas.

A estrutura da tese

A estrutura da tese é mostrada na Figura 1. As duas linhas de trabalho têm focos e alcances diferentes mas ambas derivam da conceitos e princípios da Ecologia Industrial, apresentados no Capítulo I. A linha quantitativa consiste em um estudo de caso para o setor de Ferro e Aço, mas o ultrapassa por intermédio da metodologia de análise de ciclo de vida, aplicada para emissões atmosféricas e para os fluxos de energia e materiais em geral (exergia), mostrada no Capítulo II, III e IV. A perspectiva ecopolítica, derivada do conceito de ecossistema industrial, é independente dos sistemas considerados e se aplica à sustentabilidade ambiental no Capítulo V. As conclusões são apresentadas no Capítulo VI.

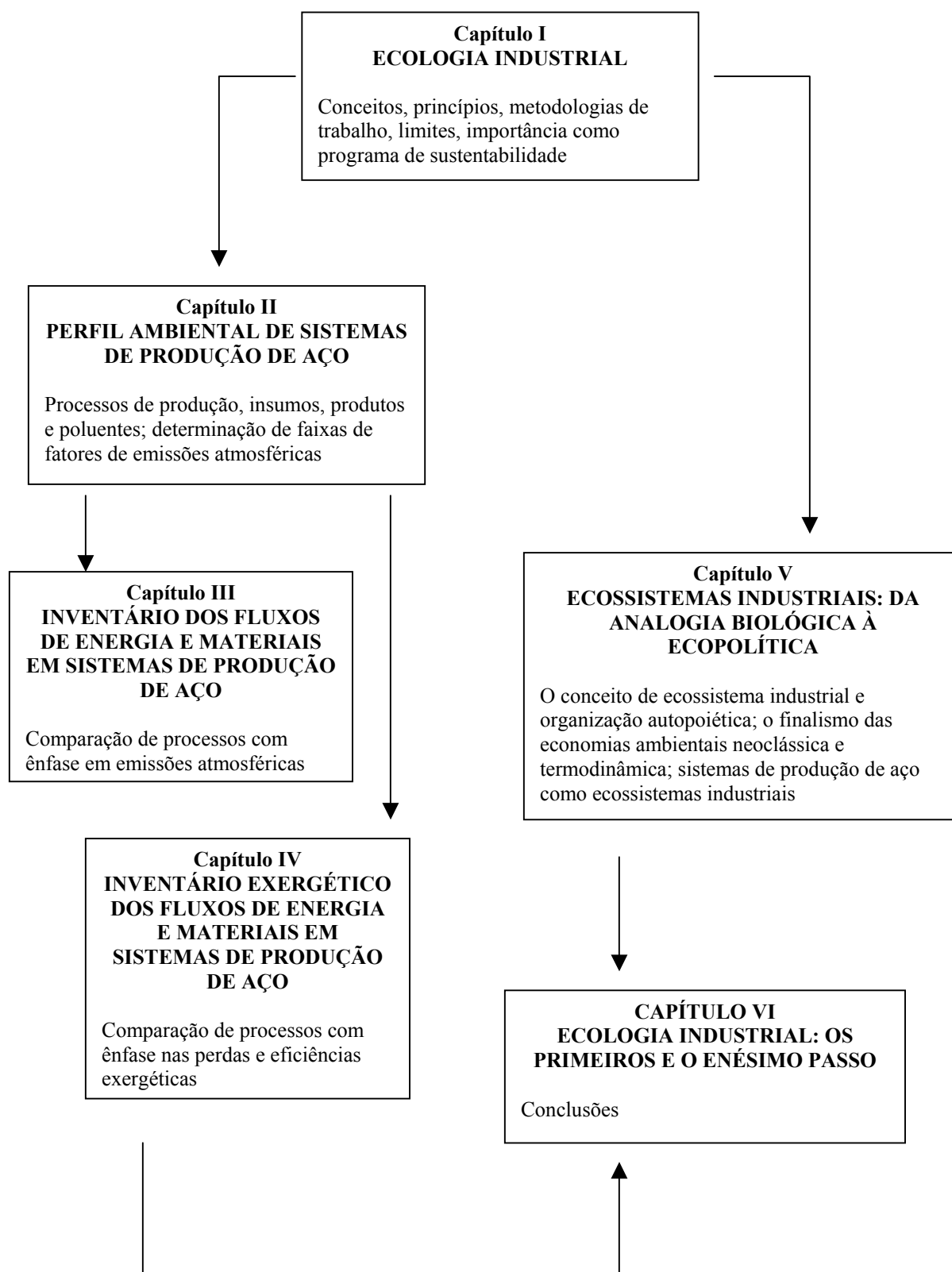


Figura 1 – Diagrama esquemático da estrutura da tese em capítulos

Capítulo I

ECOLOGIA INDUSTRIAL

O campo de estudos da Ecologia Industrial começou a ser desenvolvido recentemente. As primeiras idéias do que hoje se agrupa sob a designação de Ecologia Industrial datam do final da década de 80 e início da década de 90 (Erkman, 1997). A expressão provoca certa estranheza a princípio pois as atividades industriais, principalmente a partir dos anos 70, estiveram associadas à geração de poluentes e degradação de recursos. A Ecologia Industrial assume uma premissa distinta. As atividades industriais podem ser consideradas como ecossistemas nos quais as etapas de produção equivalem a níveis tróficos e para os quais a promoção de reciclagem de materiais se torna um objetivo maior em direção a sistemas sustentáveis. As noções de Ecologia Industrial provêm do universo da engenharia e se constituem em uma resposta ao impacto destrutivo dos sistemas industriais² nos ecossistemas naturais, dos quais os primeiros dependem.

A partir de analogias biológicas com ecossistemas naturais, são identificados e propostos arranjos para os fluxos de energia e materiais em sistemas econômicos. A Ecologia Industrial surge com princípios bem definidos ligados à integração de atividades produtivas e reciclagem de recursos. A rede de conexões que caracteriza os fluxos de energia e materiais – na qual um determinado nível trófico aproveita os rejeitos de um outro nível, de forma que o ciclo de materiais do sistema ampliado tenda para o fechamento – serve como um modelo para os sistemas industriais na sua evolução tecnológica e organizacional. Ou seja, os modelos e metas da Ecologia Industrial apontam para um modo de organização da economia segundo princípios de defesa do meio ambiente e exploração sustentável dos recursos naturais.

Embora não sejam novidades vários dos conceitos e metodologias incorporados pela Ecologia Industrial, como “Produção Mais Limpa”, “Prevenção de Poluição”, “Projeto para o

² O termo industrial é interpretado de forma bem abrangente, ou seja, inclui todas as atividades produtivas e de consumo, como mineração, manufatura, agricultura, transporte, geração de energia, prestação de serviços, reciclagem e deposição de materiais.

Ambiente”, “Análise de Ciclo de Vida”³, a sistematização de linhas de pesquisa em torno da Ecologia Industrial é bastante recente. Prova disso é que somente em 1997 foi lançada uma revista científica especializada, denominada *Journal of Industrial Ecology*, que trata especificamente de tais estudos. Em 2001, foi criada a *International Society for Industrial Ecology*, que reúne pesquisadores, empresas e estudantes com objetivo de estabelecer e disseminar a Ecologia Industrial como conceito, disciplina e campo de estudos. Hoje, uma série de universidades em todo o mundo já oferecem cursos de Ecologia Industrial e seus conceitos e aplicações são discutidos em seminários e agências governamentais (Moriguchi, 2000; Rodenburg, 2000; Ehrenfeld, 2001).

Descendente da Análise Energética (IFIAS, 1974), que se desenvolveu a partir da crise energética dos anos 70, a Ecologia Industrial se beneficiou dos princípios de sistematização e contabilização de fluxos de recursos daquela. A Análise Energética apresentou uma nova dimensão das atividades econômicas, reconhecidamente fundamental para a explicação de seu desenvolvimento e restrições. Inicialmente, a grande preocupação era o estudo das fontes energéticas, principalmente a capacidade de oferta de energia para atender à demanda crescente. Pode-se identificar também uma segunda fase na qual o estudo da demanda cresceu em importância, focalizando os usos energéticos pelos consumidores, principalmente no que se refere à busca por uma maior eficiência.

O objetivo principal deste capítulo é oferecer uma visão geral da Ecologia Industrial, com relação tanto aos seus princípios básicos como às suas aplicações em políticas tecnológicas e ambientais, além das suas limitações e controvérsias. O alcance do termo Ecologia Industrial ainda não é consensual, pois pode ser aplicado de maneiras bem diversas. Frequentemente é associado a uma abordagem mais estreita, por exemplo aquela voltada para a reciclagem de resíduos. Outras vezes assume um contexto bem mais amplo, ligado à reorganização de atividades econômicas, até mesmo no nível planetário.

A Ecologia Industrial seria uma ferramenta na tomada de decisões ou paradigma de organização biofísica das atividades econômicas? Seria um campo de estudos e pesquisas objetivo ou normativo? Deve se ater somente aos aspectos físicos da reestruturação dos sistemas econômicos ou precisa incorporar aspectos sociais e culturais, como os conflitos de

³ Respectivamente, em inglês, *Cleaner Production (CP)*, *Pollution Prevention (PP)*, *Design for Environment (DfE)* e *Life Cycle Assessment (LCA)*, siglas muito utilizadas na literatura internacional.

interesse? Portanto, este capítulo trata das diferentes abordagens conceituais, das estratégias e das ferramentas utilizadas no amplo campo da Ecologia Industrial.

I.1 Analogia Biológica dos Ecossistemas Industriais

O ponto de partida da Ecologia Industrial é reconhecer a analogia entre os ecossistemas biológicos e o conjunto de atividades industriais que formam o que se denomina ecossistemas industriais. Um ecossistema industrial pode ser definido geograficamente (uma área urbana, um conjunto de atividades de produção e consumo em uma região ou país determinados), por setor produtivo (o conjunto de plantas de um mesmo setor industrial), por tipo de produto ou material (o conjunto de etapas de produção e consumo envolvidas) ou até mesmo para designar o conjunto de atividades em uma perspectiva global. É possível pensar no planeta Terra como um conjunto de ecossistemas interrelacionados; portanto, podemos falar dos ecossistemas industriais em termos de uma rede integrada de sub-ecossistemas industriais (Richards et al., 1994).

Na Ecologia Industrial, as unidades de produção (indústrias e processos) são sistemas integrados e não isolados. Esta visão sistêmica permite pensar nas conexões entre as atividades produtivas como em uma rede que busca minimizar a quantidade total de rejeitos direcionados para a deposição de resíduos. Ao invés de focalizar o controle de poluição somente nas plantas industriais, importa a minimização de rejeitos de todo o ecossistema industrial.

Há um complexo conjunto de interações entre ecossistemas naturais e industriais que ainda está para ser estudado com maior detalhe. Por enquanto ainda estamos na fase de utilização dos conceitos de ecologia biológica no estudo de ecossistemas industriais. Em vertente política, o objetivo é assegurar as bases teóricas e empíricas de uma nova orientação das atividades econômicas a ser perseguida por firmas, governos e cidadãos.

No contexto biológico, metabolismo se refere aos processos internos dos organismos vivos que utilizam as biomoléculas dos alimentos para as atividades anabólicas (síntese) e catabólicas (degradação). Além dos organismos individuais, estas atividades metabólicas também podem ser vistas em seu conjunto, sob a perspectiva dos ecossistemas biológicos hierarquizados segundo cadeias tróficas em uma rede de produtores, consumidores e decompositores. Os produtores são plantas e algumas bactérias capazes de realizar fotossíntese

e síntese química. Os consumidores são animais que consomem produtores e outros consumidores. E os decompositores são fungos e bactérias que decompõem a matéria orgânica de produtores e consumidores em substâncias inorgânicas utilizadas pelos produtores. Utilizando a fonte energética solar, os ecossistemas biológicos reciclam os materiais continuamente (Husar, 1994).

Nos ecossistemas naturais há compartimentos nos quais são mantidos estoques de materiais, que por sua vez estão conectados por fluxos de materiais. O solo contém nutrientes para os produtores e a atmosfera mantém estoques de dióxido de carbono. A quantidade de materiais em cada compartimento se mantém relativamente estacionária devido aos ciclos que promovem o fechamento dos sistemas.

Analogamente aos ecossistemas naturais, os processos produtivos nos sistemas industriais consomem materiais e energia do meio ambiente, transformam esses materiais em bens de maior utilidade para as atividades humanas e rejeitam materiais e energia para o meio ambiente. Portanto, podemos nos referir ao *metabolismo industrial* como o conjunto de processos físicos e químicos que converte, juntamente com o trabalho humano, matérias primas em produtos e rejeitos (Ayres, 1994a). O metabolismo industrial pode ser identificado em diversos níveis de descrição, desde processos e firmas até regiões, países ou mesmo a economia global (Ayres e Simonis, 1992).

Seguindo a analogia, a Ecologia Industrial utiliza então a idéia de ecossistemas industriais como um modelo para a reestruturação dos sistemas econômicos, tendo como base a integração das atividades e a reciclagem de materiais⁴. O ecossistema industrial se caracteriza como uma cadeia de extratores de matérias-primas do ambiente, transformadores de materiais primários, fabricantes de componentes, montadores de produtos, consumidores de bens e serviços e recicladores.

A analogia entre organismos biológicos e industriais (a fábrica, incluindo equipamentos e trabalhadores), segundo características selecionadas, é mostrada na Tabela 1. Ambos usam e rejeitam energia e materiais, e respondem a estímulos externos, ainda que de formas diferentes. A analogia mostra limitações nos itens de crescimento e reprodução, o que indica a necessidade da inclusão de condições adicionais.

Tabela 1 – Comparação entre as características de organismos biológicos e organismos industriais

Características	Organismo biológico	Organismo industrial
Unidade básica	Organismo vivo	Fábrica / ecossistema industrial
Uso de energia e materiais	Transformação de energia e materiais em formas adequadas que permitem crescimento e manutenção do organismo	Transformação de energia e materiais em formas adequadas ao uso de outros organismos industriais e/ou consumidores
Degradação de energia e materiais	Rejeição de calor e resíduos	Rejeição de calor e resíduos
Reprodução / produção	Capacidade de reprodução de organismos da mesma espécie	Capacidade de produção de bens e prestação de serviços. A reprodução não é função de um organismo individual mas de fatores externos no âmbito econômico e cultural
Resposta a estímulos externos	Resposta à mudanças de temperatura, umidade, disponibilidade de recursos, presença de predadores e parceiros reprodutivos	Resposta à mudanças de preços de fatores de produção, demandas dos clientes, disponibilidade de recursos, tipo de clientes
Crescimento	A partir de uma célula, os organismos multicelulares passam por várias etapas de crescimento	Passam por transformações mas não seguem a progressão de etapas pré-estabelecidas de crescimento
Duração de ‘vida’	Tempo de vida variável mas sempre finito	Tempo de ‘vida’ variável mas sempre finito, embora a reposição de equipamentos e trabalhadores possa estender este tempo

Fonte: Elaboração própria a partir de Graedel (1996)

Husar (1994) sustenta que a metáfora do metabolismo industrial pode contribuir para a reestruturação dos processos industriais. O modelo do produtor-consumidor-decompositor é adequado para investigar como os ecossistemas industriais podem “se fechar”. A fragilidade da metáfora se transforma em um objetivo a ser alcançado. Como os antropossistemas não apresentam ainda decompositores ou recicladores capazes de promover o fechamento, a busca se concentra em superar tal fragilidade.

O modelo dos ecossistemas naturais a ser utilizado pelos ecossistemas industriais tem como característica principal o fechamento do ciclo de materiais calcado na energia solar como insumo primário e na rejeição de calor. A sustentabilidade do ecossistema global biológico, tal como se desenvolveu ao longo de milhões de anos, estaria justamente na utilização de rejeitos de um componente como insumo de outros componentes em uma rede

⁴ Veremos adiante o histórico das diversas perspectivas da Ecologia Industrial que ultrapassam a noção de reciclagem interna e externa de rejeitos, sejam as noções de prevenção da poluição, produção limpa e substituição de materiais.

que inclui as cadeias tróficas dos seres vivos e os grandes ciclos de elementos, tais como carbono e nitrogênio.

No texto que talvez seja o mais citado na literatura sobre Ecologia Industrial, Frosch e Gallopoulos (1989) chamam a atenção justamente para a analogia entre os ecossistemas biológicos e os industriais. Segundo os autores, em seu seminal artigo, os ecossistemas industriais deveriam ser vistos como interdependentes e partes de um todo maior. A analogia entre os dois tipos de ecossistemas não seria perfeita, no entanto um grande avanço se daria se os ecossistemas industriais imitassem seus análogos biológico/naturais⁵.

Segundo Graedel (1994), existiriam três tipos de fluxos de materiais na perspectiva ecológica. O Tipo I é um modelo de fluxo linear (em apenas um sentido) de materiais e energia no qual a produção, uso e disposição final ocorrem sem reciclagem ou re-uso de materiais. No Tipo II ocorre alguma ciclagem interna de materiais mas ainda existe a necessidade de entrada de recursos energéticos e materiais, e os rejeitos continuam a ser lançados para o exterior. O Tipo II é mais eficiente que o Tipo I, mas ainda assim não garante a sustentabilidade de longo prazo. O modelo do Tipo III poderia ser denominado como um ecossistema sem resíduos, em que a reciclagem interna permite que apenas a energia solar garanta a manutenção do ecossistema.

Os atuais ecossistemas industriais seriam uma mistura dos Tipos I e II. O objetivo limite de emissão zero, mais próximo do Tipo III, estaria longe de ser alcançado dado o estágio tecnológico atual, no entanto, na medida em que este objetivo fosse perseguido, a tendência seria o aumento dos níveis de reciclagem e reutilização dos materiais em um contexto global. Em resumo, a Ecologia Industrial em sua origem como campo de estudos, calcado na analogia biológica, sugere que as atividades econômicas sejam integradas no sentido do fechamento do ciclo de materiais.

I.2 Idéias precursoras e definições

O artigo de Frosch e Gallopoulos (1989) constitui um marco na disseminação do conceito de Ecologia Industrial. Eles utilizam a metáfora biológica e apontam para a transformação do modo tradicional de atividade industrial, no qual firmas individuais

⁵ Na seção I.2 o texto de Frosch e Gallopoulos é inserido em um histórico das idéias sobre Ecologia Industrial.

consomem insumos para fabricar os produtos e geram emissões e resíduos. No que eles definem como ecossistema industrial, o sistema de produção é mais integrado, pois o consumo de energia e materiais é otimizado e os resíduos de um processo servem como insumos para outros processos. A publicação do artigo em uma conhecida revista científica, *a Scientific American*, contribuiu para o impacto e difusão das noções de Ecologia Industrial para o público de outras áreas científicas.

No entanto, pode-se traçar um longo percurso das idéias que se cristalizaram no campo de estudos da Ecologia Industrial. Visões históricas reportam idéias primevas sobre metabolismo na sociedade (Fischer-Kowalski, 1998). A noção de metabolismo industrial aponta para o conjunto de fluxos de energia e materiais que perpassam e constituem os sistemas industriais. É essencialmente uma abordagem descritiva baseada nos balanços de massa que tenta analisar tais fluxos no âmbito das atividades humanas globais e dos ciclos biogeoquímicos (Ayres, 1978; Ayres e Simonis, 1994; Ayres e Ayres, 1996; Socollow, 1994), e particularmente na esfera nacional (Ayres e Ayres, 1994; Wernick e Ausubel, 1995) e na esfera regional (Stigliani e Anderberg, 1992).

Segundo Erkman (1997), a Ecologia Industrial dá um passo adiante do Metabolismo Industrial porque não apenas analisa o funcionamento e regulação dos sistemas industriais e suas interações com a biosfera, mas também propõe o modo de reestruturação compatível com os ecossistemas naturais e a perspectiva da sustentabilidade. Ele cita extensivamente uma série de publicações que já manifestavam intuitivamente as noções que seriam reunidas no início dos anos 90 sob o signo da Ecologia Industrial⁶, destacando, porém, dois trabalhos coletivos.

Em primeiro lugar, um ensaio coletivo de autores alinhados politicamente com grupos de esquerda (Billen et al., 1983) adota a expressão Ecologia Industrial tendo como base quantitativa o que foi denominado de ‘L’Écosystème Belgique’. A idéia básica era dar uma visão geral da economia belga tomando as estatísticas de produção em termos de fluxos de energia e materiais, e não de unidades monetárias. Os sistemas industriais são tidos como ecossistemas constituídos por redes de produção, distribuição e consumo de bens, e que incluem também os resíduos e as reservas de materiais primários e energia. Apontam, com exemplos e estudos de caso (um deles para a indústria siderúrgica belga), para a desconexão

⁶ É muito interessante acompanhar o breve relato histórico de Erkman (1997) sobre as inúmeras publicações que desde os anos 70 lançaram idéias como ecossistema industrial e Ecologia Industrial.

entre estágios de produção na Bélgica e para a importância da organização do sistema industrial como um todo, em especial no que se refere à produção energética e destino dos resíduos. Embora, destaca Erkman (1997), o trabalho resumisse as idéias básicas da Ecologia Industrial com clareza, não despertou o merecido interesse e foi esquecido.

Em segundo lugar é citado um trabalho iniciado no fim dos anos 60 no Japão, de aproximadamente 50 especialistas de áreas diversas comissionados pelo MITI (*Ministry of International Trade and Industry*) para elaborar um documento prospectivo frente aos custos ambientais da industrialização, incluindo aspectos de escassez de recursos e poluição (Watanabe, 1972). O estudo tratou da atividade econômica dentro de um contexto ecológico e, com os desdobramentos do choque do petróleo, o grupo seguiu elaborando programas na área energética que foram aplicados nas estratégias de política tecnológica japonesa nas décadas seguintes. Novamente Erkman (1997) comenta que apesar de a ênfase no investimento tecnológico para substituir recursos materiais não ser propriamente original, merece destaque o caráter de longo prazo e larga escala, adotado no estudo, para as estratégias industriais a ser adotadas pelo Japão.

As publicações se multiplicaram a partir de Frosch e Gallopoulos (1989), um autêntico catalisador para os grupos e pessoas que já trabalhavam nas áreas afins. Um grande impulso foi dado a partir das discussões em um congresso da *National Academy of Engineering* nos Estados Unidos em 1992, publicadas em Richards et al. (1994), reunindo aqueles que mais tarde criariam a revista *Journal of Industrial Ecology*. A primeira tese de doutorado em Ecologia Industrial foi apresentada por Allenby (1992) sobre Projeto para o Ambiente, e um pequeno resumo de Tibbs (1993) sobre a nova agenda ambiental para o setor industrial contribuiu para a disseminação do conceito pelos círculos empresariais.

Um evidente e ainda atual problema para a Ecologia Industrial é a sua amplitude, o que leva a inúmeros alcances e definições. Allenby (1992) estabeleceu uma agenda ambiciosa para a Ecologia Industrial, a qual:

“(...) pode ser definida como os meios pelos quais um estado de desenvolvimento sustentável é atingido e mantido. Consiste em uma visão sistêmica das atividades econômicas e suas relações com os sistemas biológicos, químicos e físicos com o objetivo de alcançar e manter a espécie humana em um nível que pode ser sustentado indefinidamente, dadas as evoluções econômica, cultural e tecnológica.”

O foco de Jelinsky et al. (1992) é mais estreito, voltado para eficiência dos fluxos de materiais e desmaterialização de sistemas industriais específicos. A Ecologia Industrial é definida como:

“(…) uma nova abordagem para o projeto de produtos e processos e para a implementação de estratégias de sistemas de produção industrial sustentáveis. É um conceito em que os sistemas industriais são vistos em interação com o meio ambiente que o envolve. O objetivo é a otimização do ciclo de materiais, desde a extração até a deposição final.”

Portanto, é possível falar de Ecologia Industrial tanto voltada para os ganhos adicionais de eficiência na indústria como para um novo paradigma tecno-econômico⁷. Hoje, três grandes linhas de estudos podem ser divisadas no campo da Ecologia Industrial, cada uma com um tratamento específico. A primeira se refere aos fluxos de materiais através de um determinado sistema industrial com o intuito de identificar, avaliar e implementar alternativas de maior eficiência no uso dos recursos naturais em direção à “desmaterialização” da produção. A segunda tem com referência bens tangíveis e analisa os modos pelos quais diferentes fluxos materiais de um determinado produto podem ser modificados ou redirecionados para otimizar a interação entre produto e meio ambiente. A terceira abordagem tem um foco regional, e privilegia a rede de energia e materiais dos chamados *ecoparques*, que reúnem plantas industriais intercambiando recursos e rejeitos de produção⁸.

I.3 Princípios, metas e práticas da Ecologia Industrial

Apesar de as primeiras idéias de Ecologia Industrial estarem relacionadas à reciclagem de resíduos e integração dos sistemas industriais, ao conceito foram incorporadas outras noções com alcance prático já existentes, como Prevenção da Poluição, Projeto para o Ambiente e Produção Limpa, dentro do que se pode chamar de uma reestruturação ambiental dos sistemas industriais, e de busca de sistemas produtivos sustentáveis, ambos como metas a serem alcançadas. Sendo assim, o conceito de Ecologia Industrial se torna abrangente mas

⁷ Oldenburg e Geiser (1997) e O'Rourke et al. (1997) criticam severamente esta amplitude excessiva, em particular a vertente global do programa, segundo eles por demais ambiciosa. Acusam a falta de uma definição teórica precisa e de práticas mais eficazes dos preceitos da Ecologia Industrial. Ver item I.7 para uma discussão mais aprofundada sobre os debates críticos em torno da Ecologia Industrial.

⁸ Graedel e Allenby (1995) apresentam um excelente quadro, abrangente mas bem detalhado, sobre os conceitos, propostas, metodologias e metas da Ecologia Industrial.

assume diversas linhas de atuação, baseadas em princípios que classificamos em três categorias: mudança dos fluxos de energia e materiais na produção, fechamento do ciclo dos materiais e desmaterialização.

I.3.1 Produção Mais Limpa: Prevenção da Poluição e Projeto para o Ambiente

Desde o acirramento das questões ecológicas e competitivas, as firmas industriais têm, de modo geral, modificado as respostas à degradação ambiental provocada pelos poluentes. Se inicialmente a tônica era a desqualificação do problema, mais tarde as soluções voltaram-se para a diluição das substâncias poluentes.

Um grande avanço ocorreu com a difusão de tecnologias de *controle de poluição* (tratamento de resíduos, instrumentos de mensuração e sistemas de acompanhamento), que inclusive se constituíram em um próspero ramo de atividade econômica em diversos países industrializados (Brundtland et al., 1987). O conceito de “*Produção Mais Limpa*” tem recebido grande atenção por parte de pesquisadores, empresas, governos e ambientalistas. A idéia básica se apóia no reconhecimento de que o controle de poluentes após estes terem sido gerados é mais caro do que a prevenção da poluição. O controle *end-of-pipe* significa a instalação de equipamentos como filtros, precipitadores, *scrubbers*, para o caso das emissões atmosféricas, que depois exigem o tratamento dos efluentes líquidos oriundos da “lavagem” desses equipamentos, assim como a disposição adequada dos resíduos sólidos. As diversas rotas dos materiais poluentes para um processo de produção estão mostradas na Figura 2.

A percepção de que, em primeiro lugar, o controle *end-of-pipe* envolve equipamentos e operações de alto custo, e de que, em segundo lugar, a substância controlada pode “migrar” para um outro meio⁹, ou seja, que o controle não é integralmente eficaz, levou à mudança de enfoque para o combate à poluição. Importa achar maneiras de prevenir ou minimizar a geração da substância poluente. O aumento do custo de insumos materiais e da disposição de rejeitos, o maior rigor das regulamentações ambientais e a maior consciência ambiental dos

⁹ A idéia principal é de que o controle de uma substância poluente (pós de exaustão como emissões atmosféricas, por exemplo) após ter sido gerada pode resultar em uma mudança da substância para um outro meio, sem, no entanto, eliminar o problema (efluente líquido gerado a partir da lavagem dos gases controlados).

cidadãos são fatores que levam os setores industriais a buscar estratégias para a prevenção da poluição (EPA, 1994a).

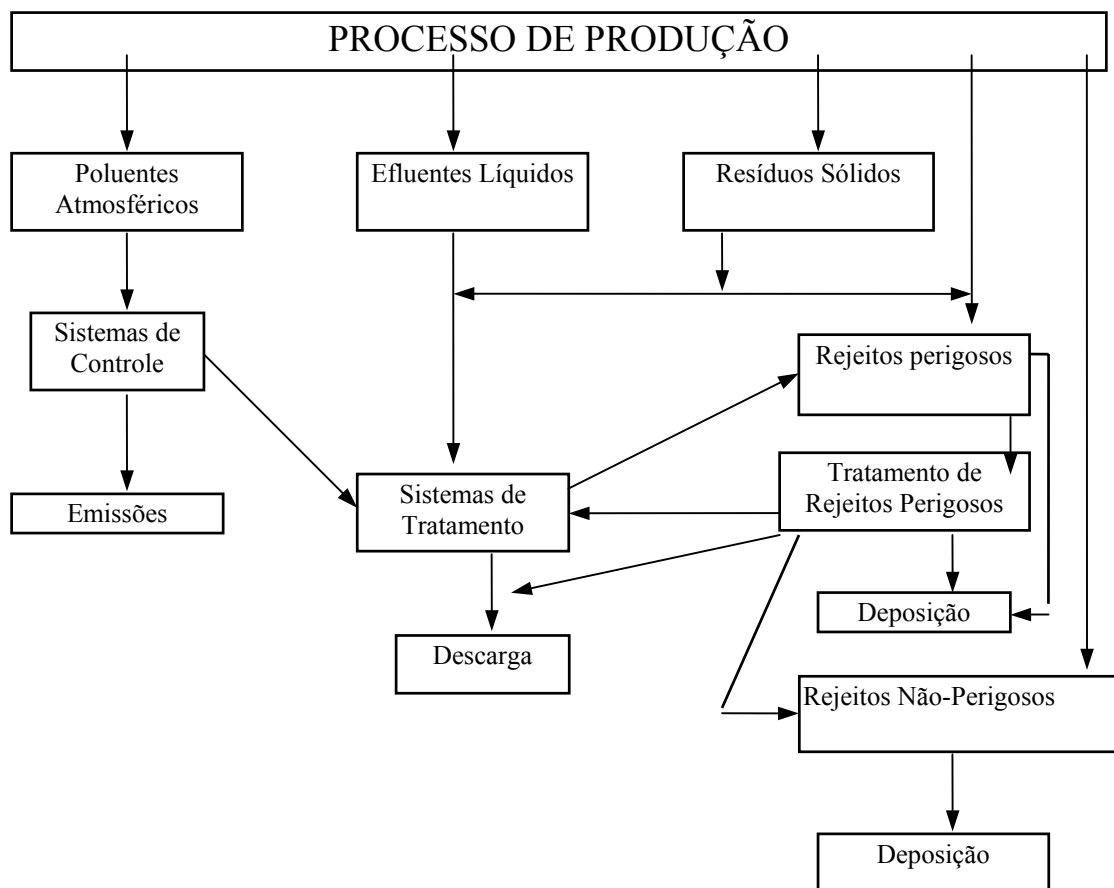


Figura 2 – Rotas para os materiais poluentes para um processo de produção

A variedade de definições e escopo das técnicas de redução da poluição causam certa confusão. Vamos adotar uma classificação em que as ações que visam evitar a geração de emissões e resíduos são categorizadas como Prevenção da Poluição (PP), Redução do Uso de Substâncias Tóxicas (RUT) e Projeto para o Ambiente (PpA), e podem ser agrupadas sob a denominação Produção Limpa.

A definição de PP sempre esteve sujeita a controvérsias. Uma definição bastante usada na Europa é a seguinte: “evitar ou minimizar a geração de emissões e resíduos (em volume e toxidez) através de alterações na fonte geradora ou de reciclagem interna” (van Berkel et al.,

1997). Uma definição similar foi adotada pelo Congresso dos Estados Unidos (US Congress, 1990):

“Prevenção de Poluição é qualquer prática, anterior à reciclagem, tratamento e deposição, que reduza a quantidade de qualquer substância perigosa, poluente ou contaminante entrando em fluxos de resíduos ou então lançados para o meio ambiente (incluindo emissões fugitivas), de forma a reduzir o perigo para a saúde pública e o ambiente...”

Um grande “divisor de águas” nessas controvérsias sobre definição de PP é a inclusão ou não das várias formas de reciclagem de materiais e resíduos (Oldenburg e Geiser, 1997). A Associação de Fabricantes Químicos (*Chemical Manufacturers Association*) nos Estados Unidos estabelece uma hierarquia de PP que inclui redução na fonte, reciclagem, recuperação de energia e tratamento (CMA, 1994).

Na presente dissertação incluímos como PP as técnicas e medidas que levam a modificações de equipamentos e tecnologias, modificações de processo, reformulação e novos projetos para os produtos, substituição de insumos materiais e energéticos, melhorias operacionais e de manutenção e reciclagem interna (van Berkel et al., 1997). No entanto, como vamos observar, as definições semânticas são menos importantes que as definições do sistema considerado. Isso porque a maior parte das controvérsias se refere a orientações para as empresas individuais em suas ações para a redução de poluição. Mas ao serem considerados sistemas maiores, que incluem várias empresas em uma mesma região, ou mesmo na mesma cadeia de produção, a controvérsia em torno da reciclagem externa assume um outro sentido¹⁰.

A RUT na prática é similar à PP, pois a diferença está no escopo de substâncias consideradas. A RUT é atingida se uma substância incluída em uma lista de substâncias tóxicas for substituída por outra não presente, mesmo que esta última também apresente riscos potenciais¹¹. A RUT pode ser definida como “mudanças em processos ou insumos que levem, nas plantas industriais, à redução/eliminação do uso de substâncias tóxicas/perigosas ou da

¹⁰ Torna-se uma questão sobre alternativas tecnológicas, entre eliminar a geração de um determinado poluente ou utilizá-lo em outra atividade econômica. Pode ser estabelecido um conflito de interesses entre os diversos agentes ou mesmo postos em jogo os limites tecnológicos e os custos de cada alternativa.

¹¹ Ver U.S. Congress (1986) para uma discussão sobre a redução de substâncias tóxicas e U.S. Congress (1992a) para uma definição dos termos resíduos perigosos e não-perigosos. EPA (1994b) oferece uma lista com inventário de mais de 630 substâncias tóxicas. Manahan (1999) apresenta, do ponto de vista da Ecologia Industrial, um bem detalhado perfil da tipologia, produção, tratamento e disposição de substâncias químicas perigosas.

geração de sub-produtos perigosos por unidade de produto, de forma a reduzir os riscos para a saúde de trabalhadores, consumidores ou do meio ambiente, sem alterar os riscos para outros trabalhadores, consumidores e partes do meio ambiente (MGL, 1991). Seis técnicas podem ser citadas: reformulação de produtos para redução de substâncias tóxicas, substituição de insumos, modernização ou modificação de unidades de produção, melhorias operacionais e de manutenção e reciclagem interna.

Em Projeto para o Ambiente (PpA) são incluídas as ações referentes aos projetos dos produtos que incorporem objetivos ambientais com pouca ou nenhuma perda do desempenho, vida útil ou funcionalidade dos produtos. Outras terminologias são usadas de acordo com o alcance das ações, variando de ‘desenvolvimento de produtos sustentáveis’, ‘projeto de ciclo de vida’ ou ‘projeto verde de produtos’. A denominação PpA atende, ao nosso ver, a escopos bem amplos. Há duas classes de objetivos envolvidos em PpA, como mostrado na Tabela 2. Uma ligada à prevenção da geração de rejeitos com a mudança de projeto dos produtos¹² e a outra ao melhor gerenciamento de materiais após a vida útil.

Tabela 2 – Dualidade de objetivos do conceito de Projeto para o Ambiente (U.S. Congress, 1992b)

Prevenção da geração de rejeitos	Gerenciamento de materiais
❖ Redução no uso de materiais, energia e substâncias tóxicas;	❖ Facilitação de remanufatura, reciclagem, compostagem e recuperação de energia (incineração);
❖ Redução no peso dos produtos;	❖ Maior resistência à degradação no transporte
❖ Extensão da vida útil dos produtos	

A idéia de PpA parece simples, mas não há fórmulas rígidas ou hierarquias para a sua implementação, principalmente porque o que é “verde” depende fortemente do contexto em que se encontra o produto, e das fronteiras de análise da situação. Às vezes, as escolhas são claras, como no caso da proibição do uso de Clorofluorcarbonos (CFCs), mas geralmente necessitam de escopos bem definidos de classes de produtos e redes de produção. As múltiplas escolhas envolvem dilemas ambientais não apenas entre objetivos de projeto de produto e objetivos ambientais, mas também entre os próprios objetivos ambientais; por exemplo, entre

¹² Para estudos sobre PpA de automóveis e telefones, ver Klimisch (1994) e Sekutowski (1994), respectivamente.

prevenção de poluição e reciclagem, como visto anteriormente. Consideremos as modernas e leves embalagens de batatas fritas, facilmente encontradas em supermercados. A espessura da embalagem é de aproximadamente 0,005 cm e possui 9 camadas de materiais, incluindo polímeros, polipropileno, tintas, polietileno e alumínio. O uso de tantos materiais dificulta a reciclagem, mas por outro lado reduz a massa de materiais usados por ser muito leve e permite maior conservação do produto (U.S. Congress, 1992b). O maior impacto de PpA não está na mudança do produto em si, mas sim nos sistemas de produção nos quais os bens são produzidos, consumidos e levados à disposição final.

Há, portanto, uma hierarquia que privilegia a PP ao considerar as ações para redução da rejeição de poluentes para uma unidade industrial. Em segundo lugar está a Reciclagem Interna de Materiais e em seguida o Tratamento de Rejeitos. É importante assinalar que muitas vezes a reciclagem interna de materiais só é possível com o tratamento adequado destes materiais. Portanto, a etapa de Tratamento de Rejeitos serve tanto para a reciclagem interna ou externa, como para a disposição dos resíduos em terrenos apropriados para tal. As ações variam de acordo com o processo, a tecnologia disponível, o custo e o tipo de poluente. Há controvérsias sobre a inclusão da reciclagem de materiais e da recuperação de energia no que se denomina PP. De qualquer modo, é preciso assinalar que os benefícios ambientais podem ser obtidos tanto através de redução de poluentes na fonte, como da reciclagem, tratamento e deposição adequada de substâncias (principalmente os rejeitos perigosos). Em resumo, as alternativas de redução nas fontes de poluição podem ser voltadas para a produção ou produto, tal como indica o diagrama esquemático da Figura 3.

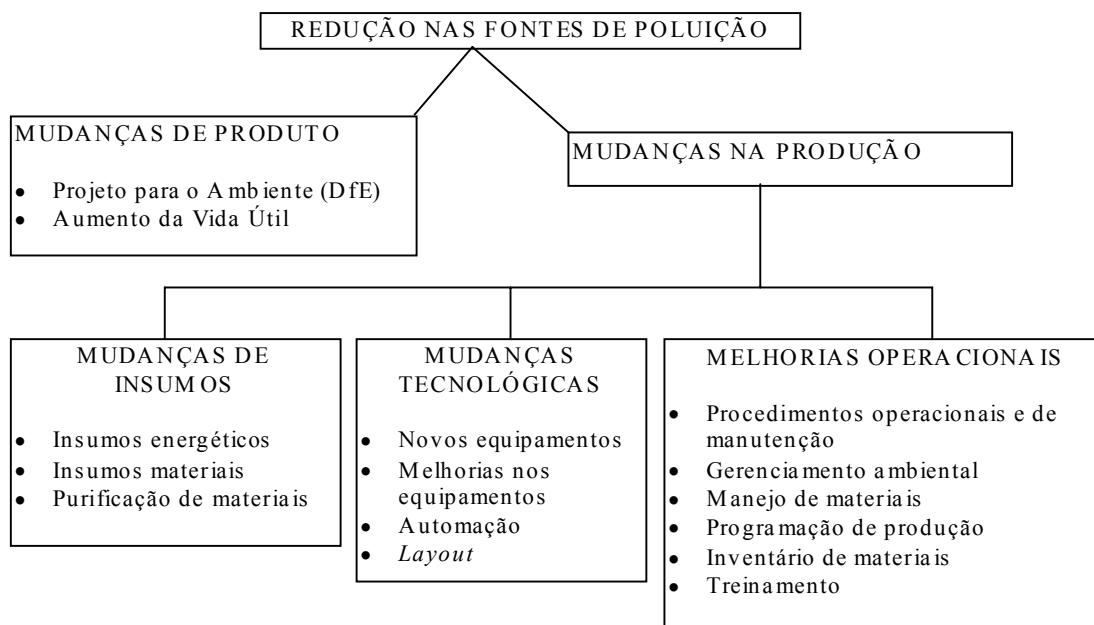


Figura 3 – Diagrama de atividades de redução de poluição na fonte de geração dos poluentes

I.3.2 Princípios de Ecologia Industrial

Apesar de a Ecologia Industrial não ter uma linha conceitual e prática bem definida, o conjunto de visões e atividades que foram incorporadas e desenvolvidas até hoje permite a elaboração de uma série de princípios, que traduzem um programa geral de atuação. Os princípios são classificados em três categorias: Otimização dos Fluxos de Energia e Materiais na Produção, Fechamento do Ciclo de Materiais e Desmaterialização (Tabela 3).

Nos capítulos II, III e IV estes princípios são aplicados para o caso dos sistemas de produção de aço. O primeiro é a identificação do metabolismo industrial característico de tais sistemas, o que vem a ser uma tarefa bastante árdua, intensiva em dados, dependendo do nível de detalhamento e dos objetivos do estudo. As tecnologias CP, a PP e a RUT são consideradas e os resultados apresentados em faixas de emissões de poluentes atmosféricos. Para a categoria de Fechamento do Ciclo de Materiais, são levados em conta no estudo os diversos usos de rejeitos siderúrgicos em outras atividades. Finalmente, na categoria de Desmaterialização, a maior eficiência no uso de energia e materiais, adquire grande importância no trabalho.

Tabela 3 – Princípios de Ecologia Industrial selecionados por três categorias

Otimização dos fluxos de energia e materiais na produção	
1. Identificação do Metabolismo Industrial	Inventário do fluxo de energia e materiais
2. Prevenção de Poluição	Ações focadas na fonte de emissão de poluentes
3. Redução do Uso de substâncias tóxicas	Similar à PP mas com ênfase em determinados poluentes
4. Controle de Poluição e Gerência de Resíduos (reciclagem externa e disposição adequada)	Controle de poluentes após a geração
5. Eficiência no Uso de Energia e Materiais	
6. Uso de Energias Renováveis	
Fechamento dos Ciclos de Materiais	
1. Re-uso, Remanufatura	Extensão da vida útil de produtos
2. Reciclagem de Produtos e/ou Materiais Componentes	Redução no uso de materiais primários
3. Reciclagem de Embalagens	Produção de embalagens que sejam recicláveis
4. Subprodutos e Resíduos como Insumos para outras atividades	Integração do fluxo de materiais entre firmas e entre indústrias
5. Sistemas Industriais Localmente Integrados	Eco-parques
Desmaterialização	
1. Oferta de Serviços	Ênfase em serviços e sociedade da informação
2. Maior Vida Útil dos Produtos	Sentido contrário ao da obsolescência planejada
3. Redução do Uso de Energia e Materiais	

Nota: Alguns princípios podem ser vinculados a mais de uma categoria, como é o caso da Eficiência e Redução do Uso de Energia e Materiais.

De modo geral, os princípios apontam, tanto na perspectiva tecnológica como na perspectiva dos recursos naturais e do meio ambiente, para a necessidade de um redirecionamento, de uma mudança de rumos no modo através do qual as atividades econômicas são conduzidas. Ayres e Ayres (1996) sugerem quatro grandes estratégias para o aumento da produtividade dos recursos materiais: Desmaterialização, Substituição de Materiais, Reciclagem de Produtos e Recuperação de Rejeitos Industriais como Insumos.

No caso da estratégia de Desmaterialização, os exemplos mais citados são os da indústria eletrônica e da indústria de comunicações. A revolução dos transistores permitiu uma grande redução de massa dos componentes eletrônicos em relação à tecnologia das válvulas. A redução dos circuitos se traduziu num círculo virtuoso de relações, no qual o desenvolvimento

de tecnologias estimulou outras mais, permitindo incrementar o desempenho e reduzir a utilização de materiais.

A estratégia de Substituição de Materiais também apresenta muitos exemplos, principalmente ligados aos materiais metálicos. Recentemente, a indústria de aço tem sido pressionada pelo aparecimento de outros materiais como alumínio, cerâmicos e plásticos. Tal ameaça estimula as indústrias siderúrgicas a desenvolverem aços de maior qualidade e com preços mais competitivos.

A estratégia de Reciclagem de Produtos há séculos é adotada, principalmente no caso das sucatas metálicas e vidros. Mais recentemente, a reciclagem de alumínio, papel e vidro tem aumentado de forma substancial em resposta aos problemas de disposição final dos grandes volumes de resíduos sólidos urbanos. No entanto, surge o questionamento quanto à efetividade da prevenção de poluição (os efeitos sobre o potencial poluidor) via reciclagem de produtos, se comparada com outras alternativas como incineração (Ayres e Ayres, 1996), ou disposição em locais e de forma adequados¹³. Além disso, como os materiais se tornam mais complexos, muitas vezes a reciclagem se torna impossível ou então muito cara. Uma outra linha de desenvolvimento é o aumento da vida útil dos produtos. Ou seja, através do re-uso (pneus, tijolos, chips), reparo (veículos, móveis de casa) e remanufatura (motores industriais), a estratégia de reciclagem seria mais efetiva num sentido ambiental ao diminuir o consumo de novos produtos. Esta linha traz à tona questões sobre o nível de crescimento econômico e a obsolescência planejada de produtos. O sistema industrial como um todo tende a rejeitar tal estratégia, por motivos inerentes à sua lógica de produzir mais produtos e serviços.

A estratégia de Recuperação de Rejeitos Industriais como Insumos apresenta, do ponto de vista da firma, aspectos vantajosos por uma questão de redução de custos. No caso das indústrias de materiais metálicos, muitas vezes as tecnologias já estão disponíveis mas a limitação de recursos para os investimentos ou mesmo a estreita visão estratégica corporativa acabam por impedir a maior recuperação de rejeitos no processo produtivo. Diante das “pressões ambientalistas” e oportunidades de redução de custos, alguns setores industriais, a exemplo do siderúrgico nos Estados Unidos (Energetics, 2000), têm apresentado um

¹³ Trata-se de um típico problema enfrentado pelo método da Análise do Ciclo de Vida (ACV), o de saber qual alternativa é ambientalmente mais vantajosa, o que de modo geral exige o estabelecimento de certas premissas e critérios de julgamento.

acentuado declínio nas emissões e rejeitos (U.S. Congress, 1992a), estimulados por um cuidado em não vincular a imagem da empresa à poluição¹⁴.

O ecoparque é o tipo de ecossistema mais claramente identificado na Ecologia Industrial porque envolve unidades de produção bem definidas com suas conexões energético-materiais. Vários modelos de ecoparques industriais, cujas firmas trocam materiais, podem ser divisados: no âmbito de uma planta, firma ou organização; entre firmas situadas em um mesmo local; entre firmas situadas em uma mesma região; e entre firmas distantes umas das outras (Côté e Cohen-Rosenthal, 1998).

Embora já se verifiquem iniciativas em vários países, o caso mais citado é o do complexo de plantas em Kalundborg na Dinamarca. Os principais participantes são uma refinaria de petróleo, uma termoeletrica a carvão, uma fábrica de produtos de gesso, uma planta farmacêutica e o núcleo urbano de Kalundborg (Chertow, 2000).

I.4 Análise de Ciclo de Vida (ACV)

Estender a fronteira do sistema industrial. Tal é o guia primordial da metodologia para análises do ciclo de vida. A ACV procura avaliar os diversos estágios de produção de um produto, quantificando os efeitos ambientais de cada estágio. A demanda de um automóvel não proporciona a geração de poluentes somente na fábrica montadora de automóveis, mas também na usina siderúrgica que produz o aço, nas mineradoras de ferro e carvão, na indústria de pneus e assim por diante. Portanto, o inventário do consumo de energia e materiais e da emissão de poluentes deve captar os fluxos diretos e indiretos relativos a cada produto.

As ACVs são utilizadas como ferramenta para caracterizar o metabolismo industrial de cadeias de produção e avaliar como os fluxos de energia e materiais estão organizados entre os componentes do sistema e do ambiente. Permitem verificar os efeitos do lançamento de rejeitos através de metodologias que normalizam os poluentes e encontram índices de impacto

¹⁴ Interessante notar que muitos ecologistas condenam como inócuos e até perigosos os preceitos relacionados à busca de aproveitamento de rejeitos industriais na própria economia. Sustentam que haveria um aumento da atividade econômica gerando mais poluição, desestimulando o alcance de tecnologias realmente limpas.

ambiental¹⁵. Encerram-se com a interpretação dos diversos efeitos de opções tecnológicas em relação a insumos e poluentes. Portanto, as ACVs se realizam através de quatro etapas¹⁶.

- Definição do Objetivo e do Escopo
- Inventário dos fluxos de energia e materiais
- Análise de Impactos Ambientais
- Avaliação dos resultados

Há uma vasta literatura sobre o tema, que se constitui em uma das principais ferramentas de análise e auxílio à decisão para a Ecologia Industrial (Ayres, 1995; Graedel et al., 1995; Curran, 1996). Nos capítulos sobre sistemas de produção de aço, vamos realizar um inventário de ciclo de vida de emissões atmosféricas e de perdas e eficiências exergéticas, em conjunto com a avaliação de algumas opções tecnológicas para processos e equipamentos. No entanto, desde já é importante destacar certos aspectos de ACV.

A SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*) lançou as bases da Life Cycle Assessment em 1990 e muitos dos conceitos elaborados (SETAC, 1993; SETAC, 1994, EPA, 1993) foram adotados nas normas ISO 14040/1/2/3, que abordam as quatro etapas principais da metodologia. Nas palavras de Chehebe (1988):

“A ACV é uma técnica para avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos associados a um produto, compreendendo etapas que vão desde a retirada da matérias-primas (...) à disposição do produto final”.

O autor destaca a freqüente discrepância de resultados quando dois estudos diferentes para o mesmo produto são realizados, o que atesta a grande importância da qualidade dos dados e do tratamento das peculiaridades de cada setor. Sendo assim, a comparação entre produtos/empresas concorrentes deve ser realizada com extremo cuidado e transparência, e se

¹⁵ Vários métodos existem para a análise de impactos ambientais mas em geral os seguintes procedimentos são adotados: elaboração de categorias ambientais, como exaustão de recursos não renováveis, aquecimento global, redução da camada de ozônio, acidificação, toxicidade humana, ecotoxicidade; agregação de poluentes através de normalização e ponderação tendo como base um poluente referência; e cálculo do índice ambiental utilizando o inventário.

¹⁶ Na ACV aqui desenvolvida, a etapa 3, Avaliação dos Impactos Ambientais, não é realizada. A discussão de resultados e comparações tomam como base somente as cargas de saída dos diversos rejeitos e emissões. Preferimos, portanto, denominar o trabalho como Inventário do Ciclo de Vida (ICV).

possível com um grupo de revisão crítica independente para garantir a credibilidades dos resultados¹⁷.

Os resultados, de forma geral, são bastante sensíveis à determinação dos limites do sistema, a qual é sempre problemática com relação às avaliações. As compensações, os prós e contras das escolhas tecnológicas, no tempo e no espaço, se cruzam com a multiplicidade irreduzível dos limites dos sistemas industriais. O método exige grande detalhamento dos dados, os quais nem sempre estão disponíveis ou padronizados.

A repetida pergunta dos caixas de supermercados dos Estados Unidos “*paper or plastic?*” revela uma novidade advinda da preocupação ambiental. Pode ser apenas uma questão de direito de escolha do consumidor, de uma opção com critérios de praticidade. Mas também pode ser uma avaliação ambiental, ligada aos poluentes produzidos, ao petróleo extraído, às árvores cortadas. Afinal, o que é mais prejudicial ao meio ambiente, a produção da sacola de papel ou a de plástico? As tentativas de resposta utilizam as metodologias ACV para situar o problema. De acordo com as premissas, dados e limites adotados, as respostas mudam e se tornam mais complexas. Provavelmente um ecologista industrial aventará uma terceira opção, esta voltada para o comportamento do consumidor, ou seja, utilizar uma sacola trazida de casa e não requisitar uma nova no supermercado.

Para a transmissão de sinais, que comparação ambiental pode ser feita entre o cabo de cobre e a fibra ótica? Se comparados por peso não são tão grandes as diferenças, mas se comparados por unidade de informação transmitida as vantagens da fibra ótica são evidentes. Tomando como referência um tubo de aspirador de pó, que material, aço ou PVC, seria preferível do ponto de vista da emissão de poluentes atmosféricos. Os resultados mostram um maior potencial para aquecimento global para o aço e um maior potencial de ecotoxidez para o PVC (Zurn e Diener, 1995). Uma escolha com base ambiental entre um secador de mãos elétrico ou toalhas de papel enfrenta problemas similares, ligados ao tipo de geração elétrica e de produção do papel. Uma outra questão interessante se refere ao chumbo como material para uma avaliação ambiental do transporte com automóveis. Um automóvel elétrico necessita de uma quantidade de chumbo, para as baterias, bastante elevada se comparada com carros com motor a combustão que utilizam o aditivo chumbo (já abolido em muitos países, inclusive no

¹⁷ Hocking (1991) avalia as dificuldades envolvidas na escolha entre produtos feitos de papel e de poliestireno.

Brasil) para aumentar a octanagem do combustível, melhorando assim sua eficiência. De um ponto de vista de liberação do material chumbo para o meio ambiente, verificamos que para o carro elétrico o chumbo está concentrado nas baterias, facilitando deste modo a reciclagem. No caso do carro a combustão interna, as emissões atmosféricas tornam a liberação do chumbo bastante difusa, portanto de difícil controle (Socolow e Thomas, 1997).

Apesar de esforços pioneiros de pesquisadores na elaboração e divulgação das técnicas e normas (Chehebe, 1998), os trabalhos de ACV no Brasil ainda são incipientes, e o campo de estudos, apesar do recente crescimento, ainda está em fase embrionária¹⁸.

1.5 Ecologia Industrial em empresas

Os princípios da Ecologia Industrial, se assimilados e postos em prática nas empresas, podem conduzir a mudanças significativas nos processos industriais. Apesar de não se esperar a redenção definitiva para os problemas de poluição e escassez de recursos, devemos dizer que tais princípios representam passos muito importantes em direção a uma nova organização das atividades produtivas que de fato leve em conta a sustentabilidade¹⁹. Esquematicamente, podemos resumir a evolução do comportamento das corporações diante dos problemas ambientais em três tempos, os quais convivem nas práticas das empresas e nos debates econômicos.

- Anos 60-70: política do enfrentamento diante das leis ambientais; diluição dos poluentes
- Anos 80: negociação de prazos e custos; investimentos em controle de poluição
- Anos 90: competitividade (redução de custos, novas tecnologias, imagem verde); prevenção da poluição

¹⁸ Ver o estudo de Almeida (1998) que apresenta o método e suas aplicações, e ressalta a ACV como ferramenta de gestão ambiental nas empresas. O trabalho de Chehebe (1998) é particularmente interessante na exposição dos limites e dificuldades do método. Ver Scholl e Nisius (1998) para uma avaliação dos benefícios ambientais da aplicação da ACV em empresas na Alemanha.

¹⁹ Van Berkel et al. (1997b) e van Berkel e Lafleur (1997) desenvolvem uma metodologia para a aplicação da ecologia industrial nas empresas. Uma série de ferramentas são apresentadas para uma das etapas de transformação industrial, como o inventário dos fluxos de energia e materiais, a avaliação de opções tecnológicas, a priorização e o gerenciamento das atividades.

Vamos nos concentrar em dois pontos: i) a integração da prevenção e do controle de poluição; e ii) a polêmica sobre a relação entre regulação ambiental e a competitividade nas empresas. Como visto anteriormente, a Ecologia Industrial aponta para a prioridade das medidas de prevenção sobre as de controle de poluição. No entanto, há de se destacar que em muitos casos a geração de poluentes não é eliminada, e assim faz-se necessário uma abordagem mais ampla. As discussões acerca das diversas estratégias e alternativas relacionadas à poluição já fazem parte da agenda internacional dos governos nacionais. Nos países da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) merece destaque um acordo conjunto recomendando a aplicação do que foi denominado Controle e Prevenção da Poluição Integrados (OECD, 1991). Os principais aspectos desta abordagem incluem:

1. Consideração do ciclo de vida das substâncias e produtos;
2. Antecipação dos efeitos ambientais das substâncias e produtos em todos os meios (ar, água e solo), incluindo as possíveis transferências de um meio para outro;
3. Minimização da quantidade e toxidez dos rejeitos;
4. Uso de metodologias como avaliação de risco para estimar e comparar problemas ambientais;
5. Uso complementar de medidas voltadas para os efeitos, como as metas de qualidade ambiental, e medidas voltadas para as fontes de poluição, como limites de emissão.

A adoção de medidas de PP pelas empresas pode resultar em redução de custos através da redução do uso de energia e materiais. As empresas economizam nos custos diretos destes insumos, reduzem os custos de deposição de resíduos e podem melhorar a imagem corporativa²⁰. Além disso, maior eficiência energética e material frequentemente aumenta a produtividade e possibilita a melhoria das condições locais de trabalho. Nesse sentido, a poluição é vista como um desperdício e um sintoma de ineficiência.

²⁰ Há várias categorias de custos ambientais nas empresas, a saber: tratamento e armazenamento; pessoal; serviços externos (pesquisa, consultoria, propaganda); receitas advindas da comercialização de resíduos e subprodutos (custos negativos); depreciação de equipamentos; multas; manutenção; financeiros; riscos (seguros, remediação de acidentes).

A título de exemplo, citamos algumas grandes empresas que obtiveram ganhos consideráveis com a adoção de medidas de Prevenção da Poluição. A Dow Chemical conseguiu a redução da geração de resíduos ao custo de US\$ 250.000 e consequente economia de US\$ 2,4 milhões/ano. Na empresa Hitachi a mudança no projeto de um modelo de máquina de lavar com objetivo de facilitar a desmontagem para a reciclagem (PpA) resultou em menores custos de produção, maior durabilidade e produtividade (Porter e van der Linde, 1995b). Na 3M Corporation, a geração de resíduos foi reduzida em 500.000 t/ano, obtendo desde 1976 economias de US\$ 426 milhões (3M Corporation, 1993).

Quando se colocam em questão os incentivos das firmas em adotar tais princípios, surge a seguinte pergunta: por que as firmas não se empenham mais em buscar e explorar oportunidades economicamente interessantes para a integração ecológica dos sistemas industriais? As firmas negligenciam oportunidades de ganhos econômicos com a redução da poluição muitas vezes por razões ligadas à falta de informação acerca dos investimentos necessários e dos benefícios a serem alcançados.

Se, por um lado, já existem inúmeros exemplos de empresas que obtiveram reduções de custos e aumento de produtividade ao adotar medidas e tecnologias para redução da poluição, ainda predomina a idéia de uma relação inversa entre regulação ambiental e competitividade das empresas. Haveria um conflito entre os benefícios sociais da redução de emissão de poluentes e os custos privados da proteção ambiental. Para cumprir as normas de emissão, realizando investimentos em novas tecnologias ambientais, as empresas incorreriam em aumento de custos, que ao final resultariam em perda da posição competitiva no mercado internacional. Em contraposição a este preceito da economia ambiental neoclássica, surge uma hipótese segundo a qual a regulação ambiental na verdade induz a inovação tecnológica, permite o aumento da produtividade dos recursos e favorece a posição competitiva das empresas (Porter e van der Linde, 1995a). O tradicional preceito estaria incorreto por adotar uma visão estática das opções tecnológicas e seus efeitos sobre a competitividade. Não estão em foco os benefícios sociais envolvidos. No argumento de Porter, as desvantagens do aumento de custos seriam mais do que compensadas por intermédio de um processo virtuoso

de inovação tecnológica, em que os benefícios privados dos investimentos em tecnologias ambientais seriam garantidos pela maior produtividade dos recursos²¹.

A regulação ambiental deve atender a certas exigências para de fato promover os ganhos de competitividade. Deve focar não estritamente em tecnologias determinadas mas sim nos resultados, ou seja, deixar as empresas descobrirem a melhor maneira de atingir os objetivos da regulação; deve estabelecer um cronograma plausível para a adoção pelas empresas das medidas necessárias; utilizar incentivos de mercado; tornar o processo regulatório estável e previsível; buscar a participação das empresas no estabelecimento de padrões; e desenvolver a capacitação técnica dos órgãos reguladores (Porter e van der Linde, 1995a e 1995b).

A maior crítica à hipótese de Porter não é exatamente empírica e se baseia na premissa que as firmas já fazem as escolhas ótimas das tecnologias e recursos utilizados mesmo na ausência de regulação ambiental, que estaria inevitavelmente associadas a maiores custos. Os agentes econômicos neste sentido já estariam operando na fronteira das possibilidades tecnológicas, e a regulação ambiental desviaria as firmas desta fronteira (Palmer et al., 1995)²². Porter e van der Linde (1995a) argumentam que isto seria verdade apenas se o espectro de informações sobre as opções tecnológicas estivesse completamente disponível e que as oportunidades de inovação lucrativa já tivessem sido descobertas e adotadas. Haveria também a inércia organizacional que dificultaria a operação na citada fronteira²³.

O debate está longe de uma definição, apesar dos muitos trabalhos recentes, em que as nuances entre as duas posições são destacadas. Hart (1997) propõe que o retorno de uma firma acima da média na indústria resulta de diferenças na capacitação ambiental, e estabelece para as empresas linhas estratégicas em direção da sustentabilidade. King e Lenox (2001)

²¹ Os chamados *innovation offsets* (os custos sendo superados pelos benefícios das novas tecnologias) seriam obtidos a partir de modos mais eficientes de produção quanto ao uso de materiais e energia, de produtos verdes (ou de maior qualidade) para os quais os consumidores estariam dispostos a pagar preços-prêmio, da redução dos custos de disposição final dos produtos e da minimização de multas ambientais (van der Linde, 1993). A idéia básica é que a poluição é uma forma de desperdício e ineficiência. Os partidários da hipótese de Porter são claramente minoritários no campo da Economia.

²² Walley e Whitehead (1994) são céticos quanto à noção dos benefícios dos investimentos ambientais para as firmas individuais.

²³ Ver Altman (2001) para um detalhado resumo do debate sobre a Hipótese de Porter. O autor argumenta que a fronteira de possibilidades de produção (“eficiência X”) é determinada pelo nível tecnológico e pelo sistema ideal de cooperação entre empresas, o qual seria obtido com a apropriada regulação ambiental.

examinaram 652 firmas nos Estados Unidos no período 1987-1996 e verificaram a correlação entre menores índices de poluição e índices financeiros, mas não conseguiram provar a direção de causalidade entre as duas variáveis. Eles atribuem as diferenças a características próprias de cada firma em particular. E resumem o artigo afirmando que talvez a pergunta mais importante não seja “Ser verde se paga?”, mas sim “Quando ser verde se paga?”.

Uma outra questão mais específica se refere à relação entre a aplicação de princípios da Ecologia Industrial e competitividade. Segundo Esty e Porter (1998), tais princípios, em particular a reciclagem de materiais, a eficiência energética e as medidas de PpA, são importantes ferramentas para aumentar produtividade dos insumos e obter vantagens competitivas, mas nem sempre podem levar à otimização de outros fatores para competitividade. Quando a regulação é imperfeita e nem todas as externalidades ambientais são internalizadas e quando os custos são muito maiores que os benefícios, a exemplo da plantas de desnitrificação na indústria siderúrgica, o controle de emissões não tem incentivos econômicos, e assim, outras alternativas são buscadas ou o investimento não é realizado. Os autores concluem que a Ecologia Industrial, apesar de importante para o aumento da produtividade de recursos, não deve ser tomada como um guia independente para a estratégia competitiva das empresas.

I.6 Ecologia Industrial como paradigma econômico-ambiental

A Ecologia Industrial, como vimos, encerra em sua abordagem voltada para a reestruturação das atividades industriais duas linhas marcantes. Uma é mais estreita, concentrando-se no aproveitamento de resíduos como insumos, ou seja, destacando a importância da reciclagem e da integração das diversas etapas de produção e consumo. Outra, mais ampla, incorpora as medidas de Produção Limpa, que incluem Prevenção da Poluição, Redução do Uso de Substâncias Tóxicas e Projeto para o Ambiente.

No outro lado do espectro podemos divisar a Ecologia Industrial como um novo paradigma de organização econômica, com base nos preceitos de fechamento do ciclo de materiais e desmaterialização, e objetivando a sustentabilidade de longo prazo (Tabela 4).

Tabela 4 - Paradigmas econômico-ambientais selecionados

ECONOMIA NEOCLÁSSICA
Há limites naturais mas não limites econômicos Crescimento econômico é sustentável (sistema de preços, substituição de fatores) Livre mercado e otimismo tecnológico
ECONOMIA DO MEIO AMBIENTE
Problemas ambientais são falhas de mercado Avaliação dos custos de oportunidade no uso do meio ambiente Proteção ambiental através do controle das externalidades (resíduos e emissões)
GERENCIAMENTO DE RECURSOS
Sistema econômico fechado Sustentabilidade fraca; manutenção do estoque de capital (combinação de capital natural e humano) Externalidades devem ser internalizadas (preços para serviços ecológicos); Desenvolvimento sustentável
ECONOMIA ECOLÓGICA (eco-desenvolvimento)
Tentativa de uma nova formulação teórica da atividade econômica a partir da Termodinâmica, da Ecologia e da teoria dos sistemas auto-organizados; incorpora restrições termodinâmicas (dissipação, finitude, irreversibilidade) na teoria econômica; Sustentabilidade forte; manutenção dos estoques de capital natural e de capital humano O problema do valor; limites do crescimento econômico; princípio da precaução
ECOLOGIA INDUSTRIAL (eco-desenvolvimento)
A partir de analogias biológicas com ecossistemas naturais, identifica e propõe novos arranjos para os fluxos de energia e materiais em sistemas industriais; busca integração das atividades econômicas e redução da degradação ambiental (recursos e poluição); Princípios: modificação dos fluxos de energia e materiais, fechamento dos ciclos de materiais, desmaterialização

Fonte: elaboração própria a partir de (Daly e Cobb, 1989; Colby, 1990; US Congress, 1992b; Ehrenfeld, 1997)

Mudam entre os paradigmas econômico-ambientais as formas de valoração do meio ambiente e de estratégias sociais. No primeiro paradigma, o da economia convencional de livre mercado, a palavra sustentabilidade não se aplica e nem possui um significado intrínseco. A substituição entre os fatores de produção garante as soluções para os problemas econômicos da escassez, caracterizando um evidente otimismo tecnológico.

O segundo paradigma, chamado aqui de economia do meio ambiente, foi desenvolvido a partir dos anos 60 com as primeiras preocupações acerca da emissão de poluentes. Promove uma espécie de “esverdeamento” da economia convencional, através do controle das externalidades, mas sustentabilidade não é uma preocupação fundamental pois as intervenções no mercado garantem a eficiência econômica.

O terceiro paradigma selecionado é de gerenciamento dos recursos. Surge com o reconhecimento dos prejuízos reais e potenciais aos ecossistemas causados pela exploração dos recursos naturais e a emissão de poluentes. O planeta Terra é considerado um sistema econômico fechado e o grande desafio é promover a internalização dos custos associados ao

meio ambiente. O uso de recursos naturais e a geração de poluição precisam ser pagos, ou melhor, internalizados com os preços corretos. A expressão maior deste paradigma é o conceito de “desenvolvimento sustentável” (CMMAD, 1987), que assume que novas tecnologias devem promover o balanço entre o crescimento econômico e a preservação ambiental, ou seja, sustentabilidade é uma questão de melhor gerenciamento das atividades econômicas para garantir a qualidade de vida das gerações futuras.

Os três paradigmas anteriores podem ser classificados como tecnocêntricos enquanto os dois restantes, Economia Ecológica e Ecologia Industrial, são ecocêntricos. A mudança de ênfase não significa um recurso ao pessimismo tecnológico, mas sim a uma postura mais ativa na reversão da trajetória declinante da qualidade ambiental. Os dois paradigmas guardam similaridades com o conceito de eco-desenvolvimento (Riddel, 1981; Glaeser, 1984; Norgaard, 1988), no qual o Planeta Terra é visto como um sistema ecológico fechado, e um critério de sustentabilidade forte é adotado, ou seja, os estoques de capital humano e natural, cada um separadamente, devem ser não decrescentes. Ecologizar a economia se torna a linha geral de atuação. Para lidar com as incertezas sobre efeitos dos diversos problemas ambientais, um princípio de precaução é adotado, de forma que novas tecnologias e projetos de desenvolvimento devem demonstrar sua sustentabilidade, como definida no paradigma, antes mesmo de sua implantação.

Provenientes dos campos da engenharia e da economia, a Ecologia Industrial e a Economia Ecológica, respectivamente, integram, cada uma a seu modo, o paradigma do eco-desenvolvimento, que consideramos fundamental ser adotado em políticas de desenvolvimento. Mesmo sendo um campo heterogêneo, a Economia Ecológica no seu ataque à economia ambiental neoclássica segue uma idéia fundamental de que a dissipação e os limites físicos restringem o crescimento econômico ilimitado (Georgescu-Roegen, 1971; Rifkin, 1980). A Ecologia Industrial assume a tarefa de transformação das atividades produtivas através das três categorias de princípios enunciadas na seção I.3.2 e os combina com a criação de novas estruturas de organização dos sistemas econômicos balanceados com os ecossistemas naturais.

Entre os defensores da total irrelevância da termodinâmica para a economia do meio ambiente (Young, 1991) e aqueles que defendem soluções termodinâmicas para os impasses ambientais (Daly, 1992), há uma larga faixa de métodos e perspectivas. Modelos dinâmicos

dos processos econômicos e interações economia - meio ambiente se utilizam de conceitos econômicos e termodinâmicos. Por exemplo, os balanços de energia e materiais permite a avaliação das mudanças tecnológicas segundo uma perspectiva física. As contabilidades de entropia, de energia e de exergia permitem a avaliação de indisponibilidades, perdas e eficiências. Foram desenvolvidos modelos econômicos que incorporam restrições termodinâmicas aos processos de substituição de recursos, aos custos de oportunidade de decisões alternativas, às preferências no tempo expressas nas taxas de desconto. Evidentemente ao introduzir tais restrições, as visões e modelos assumem como primordial o problema da sustentabilidade (Söllner, 1997).

As leis da termodinâmica limitam a eficiência do uso de energia e materiais nos ecossistemas. No entanto, como os ecossistemas são sistemas abertos, os fluxos de energia e materiais podem manter, pelo menos temporariamente, sua organização. Tais sistemas são capazes de auto-organização e apresentam tendências para o aumento da complexidade.

Os sistemas econômicos podem ser vistos como componentes de um ecossistema mais amplo que incorpora as transformações antrópicas. Há uma competição por recursos de baixa entropia para o crescimento e manutenção dos sistemas econômicos. Diante das limitações termodinâmicas, toda a argumentação derivada do trabalho de Georgescu-Roegen (1971) aponta para a incompatibilidade entre crescimento econômico e sustentabilidade. Através de processos dissipativos os sistemas ecológicos e econômicos se desenvolvem e mantêm longe do equilíbrio suas estruturas complexas. Tais sistemas dependem do influxo de energia e materiais provenientes do meio ambiente e utilizam este último para a disposição final dos rejeitos da produção e consumo.

No estado estacionário os fluxos de energia e materiais que atravessam as fronteiras economia - meio ambiente são constantes no tempo enquanto podem ocorrer mudanças na organização dos sistemas econômicos. Mas não há uma consistência necessária entre um estado estacionário de um sistema e os estados estacionários de outros componentes do ecossistema mais amplo, e portanto a sustentabilidade pode ser comprometida (Ruth, 1993). A transição para sistemas sustentáveis permanece como uma questão teórica e operacional nos níveis mais diversos de descrição espacial – local, urbano, regional, nacional e global.

I.7 Debates em torno da Ecologia Industrial

Apesar de as definições e tratamentos da Ecologia Industrial não serem padronizados, há uma linha comum de alguns elementos-chave. É uma visão sistêmica e integrada de todos os componentes dos sistemas industriais em suas relações com a biosfera. Dá ênfase ao substrato biofísico das atividades humanas, isto é, aos complexos padrões dos fluxos de materiais internos e externos aos sistemas industriais, em contraste às abordagens econômicas com unidades monetárias ou, alternativamente, energéticas. E, finalmente, considera a dinâmica das trajetórias tecnológicas como um elemento crucial para a transição do atual sistema industrial para um outro sustentável.

Como a Ecologia Industrial encampa certos conceitos e procedimentos que não foram criados em seu âmbito, surgem os problemas de definição a que já aludimos anteriormente. Por exemplo, quais são as diferenças, tanto conceituais como práticas, entre Ecologia Industrial, Produção Limpa e Prevenção da Poluição? Inicialmente, podemos dizer que o foco se estreita da primeira à terceira. A PP tem uma orientação mais local, voltada para os processos, na qual os sistemas industriais se transformam à medida que as unidades de produção busquem o nível de emissão zero. Devido às dificuldades práticas para o alcance deste objetivo, o princípio de fechamento do ciclo de materiais parece constituir uma alternativa mais eficiente em sistemas mais amplos (Ehrenfeld, 1997). As diferenças de impacto entre sistemas de diferentes magnitudes, ou seja, com diferentes fronteiras, são uma fonte de questionamento permanente para a Ecologia Industrial. Mais importante do que o aspecto semântico é a definição das fronteiras do sistema.

Há diferenças e similaridades entre Ecologia Industrial e Prevenção da Poluição, como mostrado na Tabela 5. Ambas promovem a redução no volume de rejeitos lançados para o meio ambiente e requerem informações sobre os fluxos de materiais para medir eficiências. Embora ambas busquem a eficiência dos processos, para a PP eficiência se constitui em apenas uma maneira de alcançar os objetivos de evitar a geração de poluentes e redução de riscos, enquanto para a Ecologia Industrial é uma meta bem marcada. Um processo eficiente no uso de energia e materiais também pode ser altamente tóxico, pois muitas vezes uma pequena quantidade de poluente pode ser suficiente para causar danos elevados²⁴.

²⁴ Veremos nos capítulos sobre poluentes gerados nas plantas siderúrgicas que as pequenas emissões de PCDD/F, PCB e PAH são altamente tóxicas e perigosas.

Tabela 5 – Comparação de características selecionadas da prevenção da Poluição e Ecologia Industrial (Oldenburg e Geiser, 1997)

	Prevenção da Poluição	Ecologia Industrial
Objetivos	Evitar a geração de poluentes; Reduzir riscos para o meio ambiente e saúde humana	Otimização do fluxo de energia e materiais; Promoção da sustentabilidade
Foco principal	Firma individual	Conjunto de firmas
Ferramentas técnicas selecionadas	ACV, contabilidade de materiais, caracterização de processos, auditorias	ACV, contabilidade de materiais, caracterização de processos
Papel da reciclagem	Somente reciclagem interna	Reciclagem interna e externa

Muitas das atividades da PP são focadas na firma individual. Mas à medida que as firmas demandam atividades de PP aos seus fornecedores, a fronteira tende a se expandir para o resto da cadeia produtiva. A Ecologia Industrial dá ênfase à interconectividade das atividades industriais no nível regional ou de indústria, ou seja, adota um modelo de sistema industrial com ciclos fechados de materiais. A PP é mais voltada para um protocolo de planejamento das firmas, desde a identificação dos poluentes até a implementação e avaliação das atividades.

Van Berkel et al. (1997a) apontam para um aparente paradoxo nas idéias e práticas da Produção Mais Limpa (PmL). A Prevenção da Poluição, embora seja baseada em uma concepção preventiva, concentra os esforços em sistemas industriais já dados ao invés das trajetórias tecnológicas. É de grande importância passar das melhorias para as inovações ambientais. As medidas de PmL se voltam pouco para a questão da qualidade dos recursos naturais e assim não são suficientes para promover o balanço entre o desenvolvimento industrial e o uso sustentável dos recursos naturais.

De uma perspectiva que é a nossa, a Prevenção da Poluição é uma das mais importantes e prioritárias atividades dentro do arcabouço conceitual e prático da Ecologia Industrial. Como vimos, não há um programa fechado para a Ecologia Industrial, e a ênfase em reciclagem externa revela tão somente a diferença nas fronteiras dos sistemas considerados (Marinho e Kiperstok, 2000). A PP vem sendo adotada como um conceito-guia para firmas e agências ambientais há pelo menos uma década, e adquiriu assim experiência operacional para custos, benefícios, sucessos e falhas. Por outro lado, a Ecologia Industrial, se encarada sob a ênfase histórica no aproveitamento de resíduos como insumos, se mostrou mais efetiva na

identificação de fluxos de materiais dos grandes sistemas do que propriamente na efetivação dessa reciclagem sistêmica.

Do ponto de vista da PP, a ênfase da Ecologia Industrial no fechamento do ciclo de materiais leva à reciclagem externa, com a conseqüente transferência de materiais de um local a outro. Surgem então problemas práticos. Em caso de acidente no transporte de um resíduo perigoso, sobre quem recai a responsabilidade pela limpeza e reparo de danos? Um outro problema é a redução da qualidade dos materiais na medida em que são reciclados, como é o caso de solventes usados para limpeza de metais. Quanto à eficiência no uso de materiais, no nível da firma, as medidas de PP são consideradas na sua capacidade de reduzir custos, como visto no item anterior, mas não garantem melhorias de eficiência no nível da indústria ou do mercado mais amplo. Por exemplo, os fabricantes de copos de poliestireno podem adotar medidas PP para reduzir os rejeitos, mas o próprio copo se tornará um rejeito ao final de sua vida útil. A Ecologia Industrial apresenta potenciais de ineficiência caso a filosofia rejeito-insumo iniba inovações tecnológicas direcionadas para a não geração de resíduos. Se um resíduo se torna fonte de receita para uma firma pode-se reduzir a atratividade econômica de medidas PP. Ashford (1997) critica na Ecologia Industrial a falta de atenção à redução de risco para o público, sujeito a acidentes na produção, transporte e armazenagem de poluentes, bens, insumos materiais e energéticos. Aponta também os riscos para os trabalhadores que operam as plantas industriais, envolvidos na recuperação e manipulação de rejeitos.

Ainda em uma linha crítica, O'Rourke et al. (1996) e Commoner (1997) comentam sobre o que chamam de conceito básico subliminar na Ecologia Industrial, a idéia de modelar os sistemas industriais como ecossistemas naturais. Segundo eles há uma forte tendência de trivializar o conflito entre demandas ambientais e os interesses corporativos das empresas, enfatizando apenas algumas das relações entre os componentes dos sistemas industriais, e não suas interações mais básicas com o meio ambiente. Conceitos derivados de estudos de impacto de sistemas industriais nos ecossistemas naturais devem ser incorporados, como é o caso dos compostos orgânicos clorados (DDT, PCCD/F, PCB), para servir como guias para a discussão tecnológica nas arenas social, econômica, política e ambiental. Está em questão não apenas o gerenciamento, mas também as trajetórias dos sistemas nacionais de produção.

O problema da definição de fronteiras na Ecologia Industrial não é apenas espacial ou ligado a cadeias de produção e consumo, mas também disciplinar, em relação a outros campos

do saber. Em que extensão a Ecologia Industrial inclui ou deveria incluir aspectos de sociologia, ciência política, ética ou teologia? Qual a relação possível entre Ecologia Industrial e ideologia e cultura? Às próprias perguntas Allenby (1999) responde que o caráter objetivo deve ser mantido na avaliação de opções tecnológicas, por exemplo, no inventário de materiais. Há, claro, um cuidado em não se tornar uma disciplina normativa. Mas como não há como separar a ciência ambiental do domínio humano, a dinâmica das relações sócio-econômicas de tais opções deveria ser incorporada. Ele cita as discussões sobre a produção de papel a partir de fibra de madeira ou de fibra de resíduos da agricultura na Colúmbia Britânica. Um estudo típico de Ecologia Industrial poderá avaliar os impactos ambientais da mudança de biomassa da agricultura para a produção de papel, retirando o que seria usado para o enriquecimento do solo, ou então avaliar os impactos caso a demanda elevada de papel exija um aumento da produção agrícola. Mas há uma outra dimensão crítica para esta questão. Sejam quais forem os ganhos ambientais da mudança, ela implicará em reversão de capital e emprego do setor extrativista vegetal para o setor agrícola, com os conseqüentes efeitos distributivos para as regiões envolvidas. Além disso, existe o impacto cultural do fim de atividades tradicionais. Em que medida a Ecologia Industrial deve considerar tais aspectos? Nos capítulos V e VI esta questão é novamente levantada.

No capítulo II, o foco é voltado para os sistemas de produção de aço. Princípios de Ecologia Industrial, mais especificamente o Controle e Prevenção de Poluição, são adotados à medida que um perfil ambiental das etapas de produção é delineado. Para cada conjunto de tecnologias é associado um nível de emissões atmosféricas de poluentes selecionados.

Capítulo II

PERFIL AMBIENTAL

DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DE AÇO

Os objetivos do capítulo II são, em primeiro lugar, oferecer um sumário da indústria de ferro e aço, tanto em seus aspectos tecnológicos como ambientais, incluindo também as tendências evolutivas dos processos de produção. Em seguida, são determinadas 4 faixas de emissões atmosféricas para as etapas de produção, de acordo com tecnologias adotadas e o fluxo de insumos energéticos e materiais. A caracterização de cada etapa servirá como base de um Inventário do Ciclo de Vida, tendo como referência uma tonelada de aço líquido, a ser desenvolvido nos capítulos III e IV. Como veremos, o perfil energético e ambiental da indústria siderúrgica não escapa da complexidade própria da rede de etapas de produção de aço. Cada etapa envolve uma série de operações em que múltiplos fatores ligados à quantidade e qualidade dos materiais são relevantes e também afetam outras etapas. Portanto, o estabelecimento de um perfil da indústria exige certas simplificações no trato dos dados e avaliações do que é relevante para a análise final no âmbito deste trabalho.

II.1 A Indústria de Produção de Aço

O século 20 foi marcado pelo advento de um amplo complexo metal-mecânico em todo o mundo. Juntamente com o petróleo e a energia elétrica, o aço foi um dos pilares deste complexo que promoveu profundas transformações no modo de vida da humanidade. O crescimento da indústria siderúrgica no pós-guerra foi avassalador, com uma taxa média anual de aumento da produção de aço de 5% no período 1945-1979. Após um período de estagnação na década de 80, a indústria siderúrgica iniciou uma etapa de reestruturação, marcado não por um aumento substancial da produção, mas sim por inovações tecnológicas em processos e produtos, maior concentração acionária e menor número de trabalhadores (Figura 4).

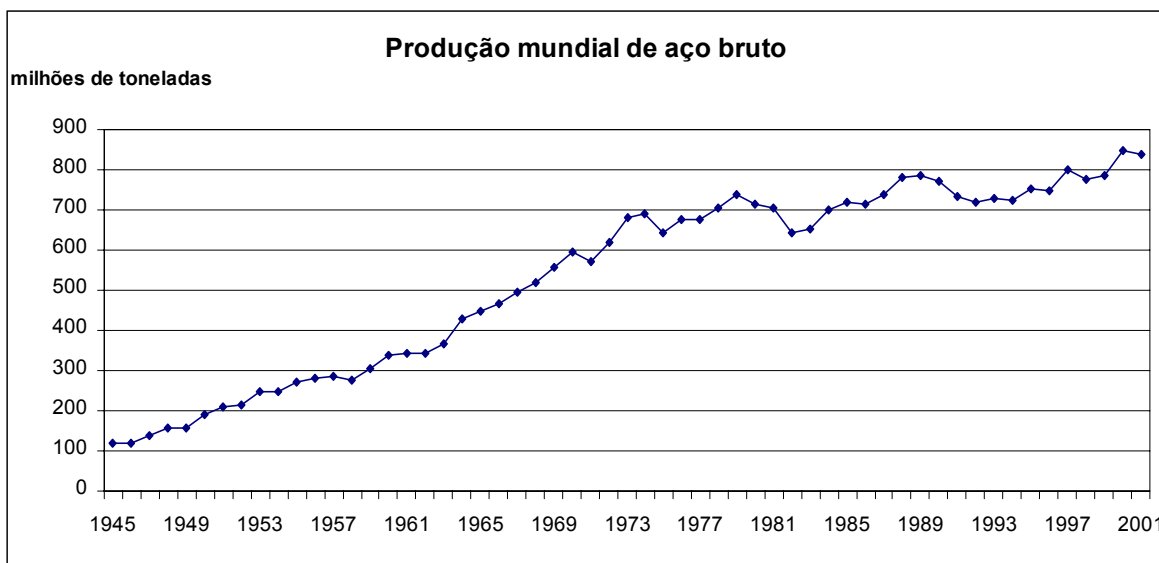


Figura 4 – Evolução da produção mundial de aço (IISI, 2001)

Nos países desenvolvidos, os investimentos se concentraram mais nas etapas de laminação e acabamento, com foco em produtos diferenciados como aços revestidos e especiais, ou seja, produtos de maior valor agregado. Estabeleceu-se, portanto, uma nova divisão internacional da produção, com os países em desenvolvimento²⁵ mais voltados para a produção de semi-acabados e chapas e bobinas a quente. Pode-se observar recentemente o aumento de investimentos na modernização tecnológica em processos e produtos em alguns países, como o Brasil (Andrade et al, 2000a).

Na Tabela 6 é mostrada a participação de diversos processos de produção de aço em países. O processo integrado com aciarias a oxigênio ainda é predominante no mundo (59%), apesar do crescimento nas duas últimas décadas do processo semi-integrado com aciarias elétricas (34%). O processo *Open Hearth*, mais antigo e menos eficiente em termos energéticos e de produtividade, responde por apenas 5% da produção, mais concentrados nos países da ex-URSS, enquanto outros processos respondem pelos 3% restantes. A maior participação das aciarias elétricas se dá no conjunto de países do NAFTA, na África e no Oriente Médio, e há uma expectativa de contínuo crescimento no resto do mundo.

²⁵ Nos anos 90 o grande crescimento da indústria siderúrgica ocorreu nos países asiáticos, com destaque para China, Coreia e Índia, com taxas anuais de aumento da produção de aço superiores a 6% no período 1988-1996.

Tabela 6 – Participação dos diversos processos de produção de aço em países selecionados

Produção de aço em 2000	Produção em milhões de toneladas	Percentual da Produção no Continente (%)	Integrada Aciaria Oxigênio %	Semi- Integrada Aciaria Elétrica %	Siemens Martin (Open Hearth) %	Outros %	Total %
Austria	5,7	3,5%	90,5	9,5	-	-	100,0
Bélgica	11,6	7,1%	76,6	23,4	-	-	100,0
Finlândia	4,1	2,5%	76,4	23,6	-	-	100,0
França	21,0	12,9%	59,7	40,3	-	-	100,0
Alemanha	46,4	28,4%	71,3	28,7	-	-	100,0
Itália	26,7	16,4%	40,0	60,0	-	-	100,0
Luxemburgo	2,6	1,6%	-	100,0	-	-	100,0
Holanda	5,7	3,5%	97,2	2,8	-	-	100,0
Espanha	15,8	9,7%	26,6	73,4	-	-	100,0
Suécia	5,2	3,2%	61,9	38,1	-	-	100,0
Reino Unido	15,2	9,3%	76,2	23,8	-	-	100,0
Outros U.E.	3,3	2,0%	12,5	87,5	-	-	100,0
União Européia (15)	163,2	19,3%	60,3	39,7	-	-	100,0
República Tcheca	6,2	13,3%	91,0	8,4	0,6	-	100,0
Hungria	1,9	4,1%	87,5	12,5	-	-	100,0
Polónia	10,5	22,6%	47,2	46,9	5,9	-	100,0
Romênia	4,8	10,3%	72,2	27,8	-	-	100,0
República Eslovaca	3,7	8,0%	92,3	7,7	-	-	100,0
Turquia	14,3	30,8%	33,8	64,6	1,6	-	100,0
Outros	5,0	10,8%	40,5	59,5	-	-	100,0
Outros Europa	46,5	5,5%	56,8	41,7	1,6	-	100,0
Rússia	59,1	59,9%	58,1	14,6	27,4	-	100,0
Ucrânia	31,4	31,8%	46,9	3,1	50,0	-	100,0
Outros ex- URSS	8,1	8,2%	59,0	33,5	7,6	-	100,0
Ex-URSS	98,6	11,7%	54,6	12,5	32,9	-	100,0
Canadá	16,6	12,4%	58,5	41,5	-	-	100,0
México	15,7	11,7%	33,4	66,6	-	-	100,0
Estados Unidos	101,5	75,9%	53,2	46,8	-	-	100,0
NAFTA	133,8	15,8%	51,5	48,5	-	-	100,0
Argentina	4,5	11,2%	49,8	50,2	-	-	100,0
Brasil	27,9	69,2%	79,6	20,4	-	-	100,0
Chile	1,4	3,5%	84,0	16,0	-	-	100,0
Venezuela	3,8	9,4%	-	100,0	-	-	100,0
Outros	2,7	6,7%	23,4	76,6	-	-	100,0
América do Sul e Central	40,3	4,8%	65,0	35,0	-	-	100,0
Egito	2,8	20,9%	41,1	58,9	-	-	100,0

África do Sul	8,4	62,7%	56,0	43,1	-	0,9	100,0
Outros África	2,2	16,4%	28,1	71,9	-	-	100,0
África	13,4	1,6%	49,3	50,1	-	0,6	100,0
Irã	6,6	62,3%	33,3	66,7	-	-	100,0
Arábia Saudita	3,0	28,3%	-	100,0	-	-	100,0
Outros Oriente Médio	1,0	9,4%	-	100,0	-	-	100,0
Oriente Médio	10,6	1,3%	20,8	79,2	-	-	100,0
China	127,2	38,5%	62,9	15,9	1,4	19,8	100,0
Índia	26,9	8,1%	53,9	32,1	14,0	-	100,0
Japão	106,4	32,2%	71,2	28,8	-	-	100,0
Coreia do Sul	43,1	13,0%	57,2	42,8	-	-	100,0
Taiwan	16,7	5,1%	60,0	40,0	-	-	100,0
Outros Ásia	9,8	3,0%	-	100,0	-	-	100,0
Ásia	330,3	39,1%	62,1	28,5	1,7	7,6	100,0
Austrália	8,5	92,4%	86,6	13,4	-	-	100,0
Nova Zelândia	0,7	7,6%	71,9	28,1	-	-	100,0
Oceania	9,2	1,1%	85,4	14,6	-	-	100,0
MUNDO	845,8	100,0%	58,6	33,8	4,6	3,0	100,0

Fonte: IISI (2001)

A indústria siderúrgica está passando por um período de grandes transformações, não apenas no modo como o aço é feito mas também na estrutura da indústria. Atualmente as mudanças tecnológicas têm ocorrido mais rapidamente devido às forças que influenciam a indústria siderúrgica (Freuhan, 1996):

- Custos de capital

O processo de manufatura do aço é altamente intensivo em capital em relação ao valor agregado aos materiais de entrada. Estes custos são elevados principalmente para as usinas integradas de grande porte, que incluem coqueria, sinterização e/ou pelletização, alto-forno e aciaria. Portanto, há uma tendência de redução dos custos de implantação de uma usina siderúrgica, através de *mini-mills* com aciaria elétrica.

- Limites na oferta de materiais

Os materiais básicos para a produção de aço são o minério de ferro, os carvões coqueificáveis e sucata. No mundo, ainda existe minério de ferro disponível em grandes reservas, não se constituindo num fator limitante. No entanto, as jazidas concentram-se em

poucos países, totalizando 227,7 bilhões de toneladas. As reservas do Brasil e da Austrália apresentam o maior teor de ferro contido, da ordem de 60%.

Em 1996, foram produzidas 1,016 bilhão de toneladas de minério de ferro. Do total de minério de ferro produzido, 78% correspondeu à produção de minérios finos e granulados, enquanto as pelotas responderam pelos 22% restantes. Estima-se o crescimento da oferta mundial de pelotas, confirmando a tendência de maior utilização de pelotas nos alto-fornos, em substituição aos minérios finos e granulados.

Quanto à oferta de sucata, o principal fator limitante é a qualidade de sucata exigida, com baixos teores de resíduos. Para a produção em aciaria elétrica tradicional não há maiores problemas, embora a qualidade do aço produzido dependa diretamente da qualidade da sucata. No entanto, para processos mais avançados que combinam a aciaria elétrica com o lingotamento de tiras finas, a sucata de alta qualidade é uma exigência. A possível falta deste tipo de sucata poderá ser compensada pela utilização de ferro esponja e carbureto de ferro (Freuhan, 1996).

- Exigências ambientais

A indústria do aço, grande consumidora de energia e materiais e responsável por significativo volume de poluentes na forma de emissões, efluentes líquidos e resíduos sólidos, ao longo dos últimos 20 anos tem sido pressionada a se tornar mais eficiente e a reciclar produtos e subprodutos.

As etapas de Coqueria, Sinterização e Alto-Forno são altamente poluentes, e mesmo com os recentes desenvolvimentos em controle de poluição “*end of pipe*”²⁶, a tendência é a busca de mudanças de processo que compactem ou eliminem tais etapas. Muitas plantas de sinterização foram fechadas nos Estados Unidos, em parte devido às dificuldades em atender à legislação ambiental. Em 1982, havia 33 plantas em operação, enquanto em 1999 apenas 10 eram mantidas (Energetics, 2000).

Nas últimas duas décadas a indústria siderúrgica melhorou a eficiência no consumo de energia, aumentou a produtividade do trabalho e reduziu as emissões de poluentes. Uma das características marcantes da produção de aço é a formação de subprodutos energéticos e

²⁶ Controle de poluição “end of pipe” é aquele realizado após os resíduos serem gerados. É o caso dos filtros de mangas e precipitadores eletrostáticos que recolhem e limpam os gases de exaustão nas diversas etapas do processo siderúrgico.

materiais que podem ser reciclados na própria planta ou transferidos para outros setores da economia.

Um estudo de Ecologia Industrial na siderurgia deve considerar tal característica como uma possibilidade de reestruturação dos sistemas siderúrgicos no sentido de melhor aproveitamento da energia e dos materiais, e principalmente em menores danos ao meio ambiente. Szekely (1995) afirma que neste sentido o aço poderá ser considerado um “material verde” no futuro. Existe uma tendência para maior compactação e flexibilidade dos processos siderúrgicos. O crescimento da produção nas *mini-mills* (plantas semi-integradas que operam aciarias elétricas com carga de sucata principalmente) seria um resposta nessa direção.

A planta siderúrgica do futuro, segundo ele, deverá ser ambientalmente pródiga, localizada perto dos consumidores, e não deverá produzir rejeitos, aproveitando sinergias com outros setores industriais. Aproveitará as receitas advindas do tratamento de rejeitos de outras indústrias, e por sua natureza usará tanto minério de ferro como sucata.

- **Materiais substitutos**

Uma das maiores forças competitivas que orientam as mudanças tecnológicas na indústria siderúrgica é o contínuo desenvolvimento de novos materiais, como alumínio, plásticos e cerâmicos. Os novos materiais obrigam a indústria siderúrgica a investir não apenas em mudanças de processo mas também de produto. Atenção especial é direcionada pelas empresas siderúrgicas às exigências da indústria automobilística.

II.1.1 Processos de produção

As usinas siderúrgicas vêm se desenvolvendo, nas últimas décadas, com duas rotas tecnológicas básicas, correspondentes às usinas integradas e às aciarias elétricas. A produção de aço através das usinas que operam fornos elétricos, e que têm como matéria-prima básica a sucata, vem se expandindo em detrimento da produção proveniente das usinas integradas a coque, que operam altos fornos e conversores a oxigênio, utilizando ferro-gusa como principal matéria-prima. Na Tabela 7 são comparados custos de investimentos e custos operacionais médios em cada um dos processos.

As aciarias elétricas têm a vantagem da modulação e podem operar a escalas reduzidas, inferiores a 500.000 t/ano, embora já estejam em operação plantas com fornos elétricos de

capacidade superior a um milhão de toneladas por ano. A competitividade das mini-usinas é decorrente principalmente dos menores custos de investimento, maior flexibilidade, menor impacto ambiental, possibilidade de atendimento de mercados regionais e maior qualidade dos produtos (UNEP e IISI, 1997; Andrade et al., 2000a; Energetics, 2000).

Tabela 7 – Características de usinas integradas e semi-integradas (Andrade et al., 2000a)

	Integradas (Alto-forno)	Semi-integradas (Forno Elétrico a Arco)
Produtos	Toda a variedade de aços longos, planos e especiais	Mix limitado de aços longos; crescendo a produção de aços planos
Custos aproximados de investimento (US\$/t de aço laminado a quente/ano)	> 900	300-500
Custos operacionais	↓	↑ (~50% sucata)
Consumo de Energia Elétrica	↓	↑
Consumo de Energia Total	↑	↓ (~60% da integrada)

Nota: ↑ (maiores) e ↓ (menores)

Atualmente cerca de 70% do ferro contido no aço produzido mundialmente, é proveniente de minério de ferro e 30% de sucata. A utilização de sucata vem evoluindo, tendo atingido cerca de 376 milhões de toneladas em 1998 (incluindo fundições de ferro e aço). Os preços variam por razões de qualidade e de acordo com as condições de mercado. Nos Estados Unidos os preços médios oscilaram entre US\$ 120-160 no período de 1994 a 1998 e caíram para a faixa de US\$ 90-110 nos anos seguintes (Andrade et al., 2000a).

Além destas rotas tradicionais, também devem ser ressaltados novos desenvolvimentos como o processo de fusão redutora COREX para produção de metal líquido a ser levado para aciarias, que difere do processo via Alto-forno por dispensar as instalações de coqueria, pelotização ou sinterização, utilizando diretamente o carvão mineral e o minério e obtendo vantagens pela possibilidade de utilização de minério e carvão de baixa qualidade e pela energia gerada pelos gases. O processo apresenta ainda flexibilidade para plantas modulares e menores danos ao meio ambiente.

A seguir, é mostrado um quadro dos insumos, subprodutos e poluentes envolvidos diretamente nas usinas siderúrgicas (Tabela 8) e um esquema das principais rotas de produção de aço (Figura 5).

Tabela 8 – Principais insumos e produtos energéticos e materiais na produção aço

Insumos		Produtos			
Energéticos	Materiais	Energéticos	Emissões	Efluentes	Resíduos Sólidos
Carvão	Carvão	GAF	SO ₂	SS	Escórias
Óleo Comb.	Minério de Ferro	GCO	NO ₂	Óleos e graxas	Pós
Energia Elétrica	Ferro-ligas	GAC	CO	Amônia	Lamas
Vapor	Calcáreo	Energia Elétrica	CO ₂	Fenóis	Carepas
Gás natural	Cal	Vapor	VOC	Cianetos	Refratários
Oxigênio	Sucata	Alcatrão	Particulados	Metais	Óleos
	Água		PM10		
			H ₂ S		
			HCl/HF		
			Metais		
			Organoclorados		

GAF - Gás de Alto-forno; GCO - Gás de Coqueria; GAC - Gás de Aciaria;

VOCs - Compostos Orgânicos Voláteis; SS - Sólidos em Suspensão;

PM10 - Particulados com diâmetro menor que 10 microns

COD - Demanda Química de Oxigênio; DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

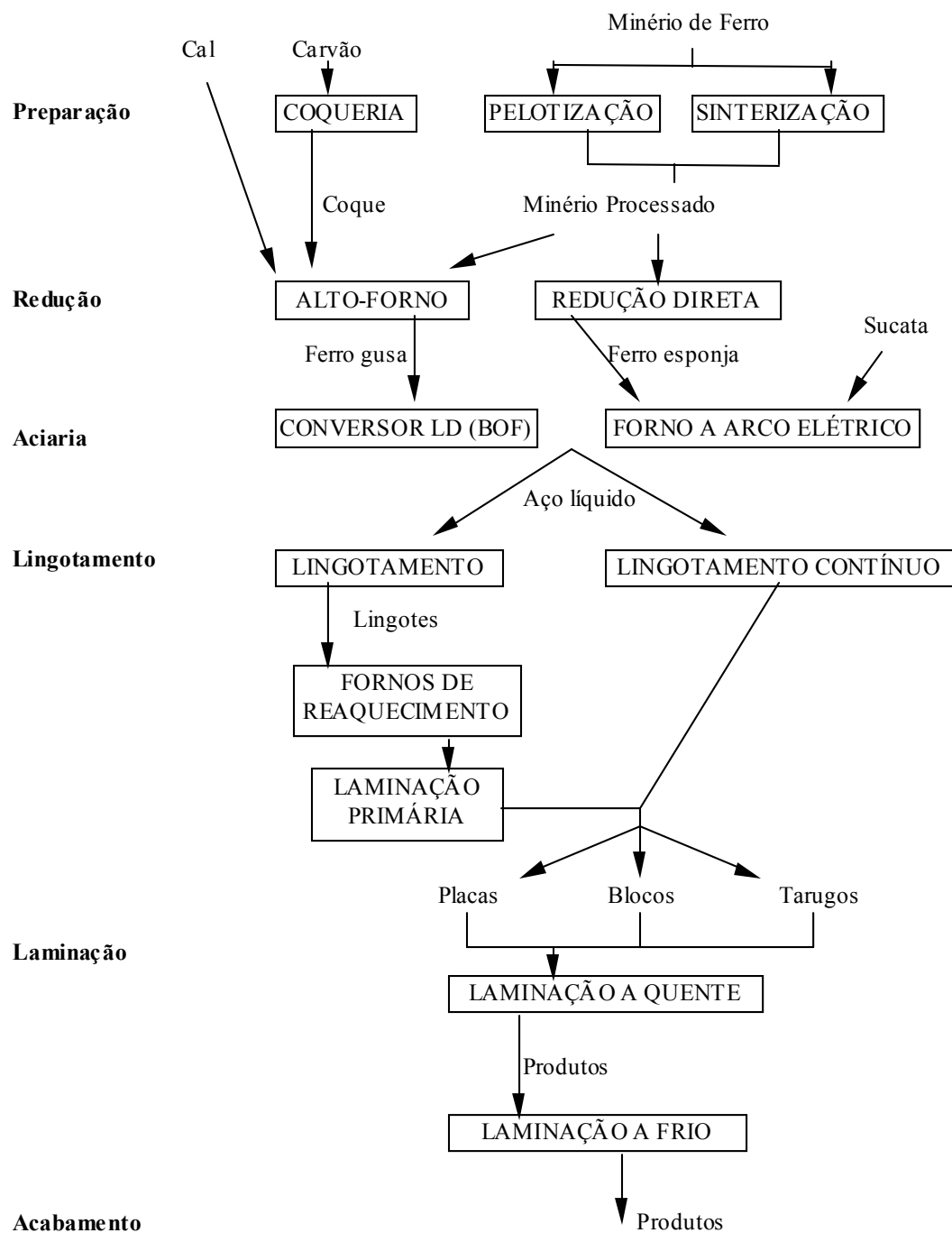


Figura 5 - Esquema simplificado dos principais processos, integrado e semi-integrado, de produção de aço

II.2 Determinação de Níveis de Emissões

Não é tarefa das mais fáceis estabelecer faixas de emissões que sejam significativas e confiáveis. Além da própria complexidade produtiva do setor de ferro e aço, há o conhecido problema da disponibilidade de dados, visto que questões técnicas e de estratégia corporativa impedem uma disseminação mais ampla. Portanto, um trabalho criterioso com os dados disponíveis deve acompanhar toda e qualquer conclusão sobre performances de firmas no que se refere a emissões, sem o qual corre-se o risco de se generalizar casos particulares e não ter um quadro exato da situação estudada.

São inúmeras as fontes de incerteza acerca dos dados de consumo e emissões nos sistemas de produção de ferro e aço. As emissões reportadas não podem ser explicadas somente com base nos equipamentos de controle de poluição ou medidas operacionais de maior eficiência. Outros fatores, como métodos diversos de mensuração, idade e tamanho das plantas, insumos materiais e condições locais, podem ter uma grande influência nos fatores de emissão obtidos.

II.2.1 Base de dados e informações

Apesar de os dados disponíveis de fatores de emissão serem incompletos e ainda não padronizados, esforços em coletar dados de um grande número de empresas podem contribuir para uma melhor caracterização ambiental do setor e para os futuros programas de pesquisa. Embora fazendo uso de inúmeras referências bibliográficas, são duas as principais base de dados para a presente pesquisa:

1. O trabalho no âmbito da Comunidade Européia (EC, 1996) que, através de questionários, obteve informações sobre fatores de emissão para um grande número de plantas siderúrgicas, e que vem a ser bastante representativo do setor siderúrgico europeu. A pesquisa abrange 166 plantas de 12 países, respondendo por cerca de 77% da produção total de aço;
2. O documento sobre Controle e Prevenção de Poluição Integrados (EIPPCB, 1999) que enfoca as melhores tecnologias disponíveis (MTD) no setor. É uma base de dados e informações bastante extensa e completa sobre cada uma das etapas de produção das

plantas siderúrgicas. Considera tecnologias candidatas a MTD aplicadas em todas as regiões do mundo, no entanto apresenta dados sobre tecnologias que permite ultrapassar o limite das MTD.

Além da alta qualidade de cada um dos dois trabalhos, o uso de ambos se beneficia de referências comuns, o que oferece maior credibilidade e compatibilidade entre os dados. Outros trabalhos são utilizados para traçar este perfil da indústria siderúrgica, dentre eles Haskoning (1993); Energetics (2000); DFIU/IFARE (1997); UNEP/IISI (1997); IISI (1998); Infomil (1997). Assim como as duas referências citadas, estas últimas não carecem de credibilidade, visto que representam um trabalho de instituições reconhecidas no setor. Dezenas de outros documentos, entre artigos, folhetos e publicações várias foram utilizados para o mesmo fim e que são citados ao longo do texto.

II.2.2 Poluentes e Alternativas de Controle e Prevenção de Poluição

As emissões atmosféricas de particulados, óxidos de carbono, nitrogênio e enxofre, metais pesados e de compostos, ácidos e orgânicos estão entre os mais significativos problemas ambientais da produção de aço²⁷. Neste trabalho os clorofluorcarbonos, elementos radioativos e metais pesados não foram considerados por dificuldades na obtenção de dados. As emissões atmosféricas foram apresentadas para os seguintes poluentes: particulados, óxidos de Nitrogênio (NO_x), Dióxido de Enxofre (SO₂), Monóxido de carbono (CO), os ácidos Cloreto de Hidrogênio (HCl), Fluoreto de Hidrogênio (HF) e Sulfeto de Hidrogênio (H₂S), Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH), Compostos Orgânicos Voláteis (VOC), Bifenilas Policloradas (PCB), Furanos e Dibenzo-Dioxinas Policloradas e Furanos (PCDD/F), Benzeno (C₆H₆) e Metano (CH₄).

As tecnologias de abatimento de poluentes atmosféricos foram classificadas em dois grupos principais: Controle de Poluição (CP) e Prevenção de Poluição (PP), definidas no capítulo I. As tecnologias CP consistem basicamente em sistema de controle de gases. Existem quatro tipos principais (IISI e UNEP 1997):

²⁷ Apesar de o uso de fatores de emissões poder ser utilizado na comparação de alternativas tecnológicas, a avaliação do impacto ambiental dos poluentes depende da concentração dos mesmos nos fluxos de rejeitos, nas características de cada meio receptor e nas condições locais topográfica e meteorológicas.

- *Ciclones*, no qual as partículas são separadas do gás de exaustão por ação de forças centrífugas. Os ciclones podem apenas separar partículas da faixa superior de diâmetro e por isso apresentam menor eficiência de remoção;
- *Precipitadores Eletrostáticos (ESP-Electrostatic Precipitators)*, nos quais uma carga elétrica é aplicada sobre as partículas presentes no gás, que permitem que estas sejam atraídas e capturadas por um eletrodo coletor. Os ESPs geralmente apresentam eficiências de remoção superiores a 90%, baixo consumo de energia, mas são inadequados para partículas de alta resistividade;
- *Scrubbers Úmidos*, que conseguem separar uma ampla faixa de poluentes pela “lavagem” do gás de exaustão com aspersão de água. Apresentam eficiências superiores a 90%, o gasto de energia é maior que para os ESPs e são necessários sistemas de tratamento para o efluente líquido ou lama formado, ou seja, para que a água seja limpa e retornada ao sistema; e
- *Filtros*, nos quais as partículas são separadas do gás de exaustão por intermédio de um material poroso, permitindo altas eficiências de remoção. O consumo de energia é elevado e podem operar apenas para uma faixa limitada de temperatura e umidade dos gases.

De modo geral os sistemas de limpeza operam com combinações destes dispositivos, incluindo não apenas a remoção de poluentes mas também os dispositivos de coleta, necessários ao bom funcionamento dos primeiros. Muitos outros arranjos e técnicas são utilizadas tais como a dessulfuração com cal, a desnitrificação por catálise e o processo de carbono ativado (EIPPCB, 1999).

No caso das tecnologias PP, há uma série disponível para todas as etapas de produção e podem ser classificadas como:

- *Modificações tecnológicas*, que incluem novos equipamentos, automação e mudança de layout;
- *Mudança ou redução de insumos*, que incluem materiais e energéticos (medidas de eficiência energética);
- *Procedimentos operacionais e de manutenção*;

- *Reciclagem interna*

II.2.3 As faixas de emissão

Os insumos materiais e energéticos e os fatores de emissão atmosféricos, para cada etapa de produção, foram categorizados em 4 faixas, cada uma delas um nível de emissão (Energetics, 2000; EC 1996; EICCPB 1999):

- *Baixo* – baseado nas tecnologias e procedimentos: de maior eficiência no uso de materiais e energia (gigajoules ou kg por tonelada de produto); que adotam insumos que reduzem ou mesmo eliminam a geração de poluentes; de CP e PP que permitem as menores emissões;
- *Médio* – baseado principalmente em tecnologias e procedimentos com eficiências, qualidade e quantidade dos insumos e fatores de emissão médios da Indústria Siderúrgica Européia derivados de um conjunto extenso de plantas;
- *Alto* – tem como base tecnologias e procedimentos menos eficientes ainda adotados por uma largo número de plantas no mundo;
- *Extremo*, que representam fatores de emissão quando não são adotadas tecnologias CP e PP, ou então quando as tecnologias e procedimentos são muito ineficientes e utilizam insumos que produzem mais poluentes.

Com relação à base de dados e à metodologia adotada dos níveis de emissão, algumas notas importantes devem ser consideradas:

1. A determinação de fatores de emissão de cada faixa por etapa de produção (por exemplo, gramas de material particulado por tonelada de coque) vai alimentar o modelo do próximo capítulo, no qual serão calculadas emissões de toda a cadeia produtiva considerada, resultando, para seguir o exemplo, em gramas de material particulado por tonelada de aço líquido;
2. As diferenças dentro de um mesmo nível, o que implica na existência da faixa, pode ocorrer devido a uma série de fatores como consumo de energia e materiais, idade dos

equipamentos, condições locais, medidas operacionais, ou seja, os fatores que afetam a geração e controle de poluentes;

3. Para alguns insumos materiais, os valores são os mesmos para todos os níveis. Isso é feito para tentar isolar os efeitos das medidas de controle de poluição. Portanto, destaca-se a importância de análises de sensibilidade para averiguar os efeitos das mudanças desses insumos nas emissões atmosféricas;
4. O nível Baixo representa tão somente alternativas candidatas a Melhores Tecnologias Disponíveis. Não há um consenso sobre todas as melhores alternativas. Além disso, uma alternativa pode ser, por exemplo, mais eficiente em energia mas emitir substâncias tóxicas como as dioxinas e furanos;
5. Os procedimentos incluem o nível de manutenção adotado. Isto é importante para todas as etapas mas particularmente sensível para a coqueificação;
6. Para alguns casos, sistemas CP, como filtros, são adotados em todas as faixas mas com eficiências diferentes. Isto revela que tais sistemas são extensamente adotados no setor alvo da base de dados europeia, mesmo em plantas do nível Alto;
7. As emissões do nível Extremo ou são dadas diretamente ou são baseadas em valores de concentração do poluente no fluxo de gás de exaustão antes do abatimento;
8. No caso de dados únicos ou insuficientes, os fatores de emissão são considerados os mesmos para todos os níveis. Quando há referências a sistemas CP com dados sobre concentração e eficiência, o nível Extremo é auferido e se diferencia dos anteriores;
9. Cada nível é aplicado para cada uma das etapas de toda a cadeia produtiva. Assim, no nível Baixo de emissões, todas as etapas apresentam os fatores de emissão deste nível. Apesar de serem perfeitamente concebíveis níveis diferenciados para cada uma das etapas dentro de uma mesma cadeia de produção, como o objetivo é a determinação de faixas, se torna preferível como primeira abordagem considerar que uma planta tem suas unidades, Alto-forno e Aciaria por exemplo, no mesmo nível de emissão. Para alguns poluentes as etapas de produção a montante das plantas siderúrgicas apresentam emissões calculadas por tonelada de aço líquido significativas, e portanto são utilizados valores médios de consumo e emissões para tais etapas em todos os níveis de emissão. A análise de sensibilidade trata também das possíveis variações nestas etapas;
10. Na medida do possível, respeitando a qualidade das informações disponíveis, os níveis de consumo de energia e materiais seguem o nível de emissões, ou seja, na

Sinterização, por exemplo, o consumo de coque como combustível é diferenciado pelos níveis, sendo mais baixo no nível de emissão Baixo, que por sua vez apresenta as melhores alternativas CP e PP.

11. A adoção de tecnologias CP e PP está associada a sistemas de gerenciamento ambiental que envolvem equipes dedicadas à coleta de dados, avaliações, monitoramento, estudo, planejamento e execução de operações na área ambiental. Consideramos que tais atividades estão implícitas na classificação das tecnologias adotadas;
12. Foram consideradas emissões primárias e secundárias. Emissões primárias são aquelas provenientes da operação direta nos fornos e plantas de produção; as secundárias são geradas em etapas associadas à operação direta como carregamento de insumos e saída de produtos, resíduos e subprodutos. As emissões difusas não foram investigadas na base de dados consultada. São as emissões não vinculadas às anteriores, são mais difíceis de mensurar e de difícil controle. Formadas basicamente de particulados, como acontece, por exemplo, com os pátios de minérios de ferro, calcáreo, carvão, sucata etc.

II.3 Pelotização

A utilização em grande quantidade de finos e concentrados de minério de ferro no Alto-forno não é possível devido aos efeitos prejudiciais à permeabilidade de gás em seu interior. No entanto, tais frações de minério podem ser utilizadas na forma de pelotas. A pelotização é um processo de aglomeração do minério de ferro que produz pequenas bolas cristalizadas de 10-16 mm de diâmetro. As plantas de pelotização podem fazer parte de plantas integradas, no entanto as mais comuns são as plantas junto às minas de ferro ou portos de embarque. Estas últimas, escolhidas para representar a pelotização nesta dissertação, apresentam um consumo energético menor devido à diferenças nas técnicas aplicadas. Nas plantas integradas (sistema 1), a moagem é feita a quente, seguida de rehidratação, enquanto nas plantas isoladas (sistema 2) a moagem é úmida seguida de desidratação. Além disso, nas últimas o potencial de recuperação de energia é maior. Para o sistema 1, na primeira etapa o minério e os aglomerantes (*olivine*) são moídos e secos (entre 600-800 °C); na segunda é

preparada a *green ball* através da hidratação das bolas, adição de bentonita e ajuste do diâmetro na faixa desejada (peneiragem e recirculação das *green balls* de maior malha). Para o sistema 2, na primeira etapa é realizada uma moagem com adição de água e dolomita ou calcáreo, e na segunda a desidratação na formação das *green balls*. A terceira etapa é comum aos dois tipos de plantas nas quais um tratamento térmico entre 1150-1180 °C para endurecer a pelota é realizado em etapas de secagem, queima e resfriamento; finalmente, após o descarregamento, as pelotas são peneiradas.

As emissões são geradas nas etapas de moagem e secagem, mistura, queima e peneiragem/manuseio (Figura 6), nas quais são relevantes: a) Moagem – material particulado; b) Mistura – material particulado; c) Leito de queima – material particulado, NO_x, SO₂, HCl, HF; d) Peneiragem/manuseio – material particulado.

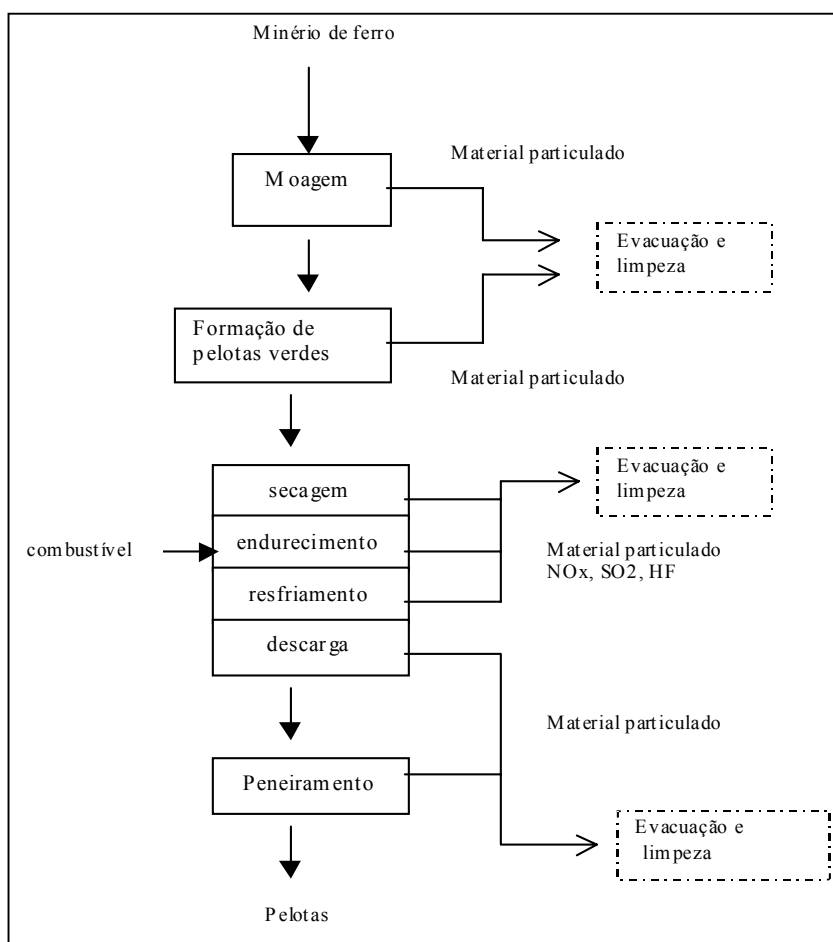


Figura 6 – Esquema simplificado das emissões da etapa de pelletização

Quanto aos insumos, UNEP e IISI (1997) apresenta para 1 tonelada de pelota produzida o consumo de: 1150 kg de minério de ferro, 10 kg de carvão, 30 kg de fluxos e 10 kg de bentonita. EIPPCB (1999) cita os insumos para 5 plantas européias (Tabela 9). O uso de precipitadores eletrostáticos aumenta levemente o consumo total de eletricidade. Para um fluxo de gás de 300.000 Nm³ (normal metro cúbico) e uma produção de 4 Mt/ano leva a um consumo de aproximadamente 1 MJ ou 0,3 kWh por tonelada de pelota produzida. O fluxo específico do gás que sai do leito de queima fica na faixa de 1940 e 2400 Nm³/tonelada de pelotas.

Tabela 9 - Insumos em plantas de pelotização^a (EIPPCB, 1999)

Insumos	Unidade	Quantidade
Minério de ferro ^b	kg / tonelada de pelota	935-1120
Bentonita ^c	kg / tonelada de pelota	5-7
Olivina ^c	kg / tonelada de pelota	31-36
Calcáreo ^d	kg / tonelada de pelota	0-3
Dolomita ^d	kg / tonelada de pelota	31
COG ^c	MJ / tonelada de pelota	400
Gás Natural ^c	MJ / tonelada de pelota	209
Coque ^c	MJ / tonelada de pelota	283
Óleo combustível ^d	MJ / tonelada de pelota	38-171
Carvão ^d	MJ / tonelada de pelota	213-269
Eletricidade ^e	MJ/t sinter (kWh/t pelota)	51-128 (14-36)
Ar comprimido	m ³ /tonelada de pelota	6,2 – 15,2
Água	m ³ /tonelada de pelota	0,11 - 1,5

Notas: a) Os dados, de 1996, provêm de 5 plantas de 2 países europeus diferentes, 4 isoladas na Suécia e 1 integrada na Holanda; b) uso de magnetita e/ou hematita, dados não disponíveis sobre recirculação de outras fontes de ferro; c) para o caso de plantas integradas; d) para o caso de plantas isoladas; e) para o cálculo do conteúdo energético primário de eletricidade foi usado o fator de conversão calórico 1 kWh = 3,6 MJ = 860 kcal.

Material particulado

As emissões de material particulado da etapa de moagem podem ser abatidas com precipitadores eletrostáticos (ESP), alcançam 25-50 mg/Nm³ que levam a fatores de emissão de 50-100 g/t pelota.

Na etapa de mistura, o material particulado pode ser abatido com filtros, resultando em 10-25 mg/Nm³ ou *scrubber* com 50-100 mg/Nm³. As emissões são tratadas juntamente com as emissões da etapa anterior com precipitadores eletrostáticos.

As emissões das etapas de secagem e queima podem ser removidas com ESP ou filtros de manga com eficiências elevadas, mas estes sistemas só podem operar em uma faixa estreita

de temperatura e de condições de umidade. Portanto, *scrubbers* são usados com alta eficiência (>95% para material particulado) e também podem remover HCl e HF (eficiência > 95%) e SO₂ (eficiência > 90%):

- ESP – 100 mg/ Nm³ leva a um fator de emissão de 200 g/t pelota (Haskoning, 1993)
- Filtro de manga – 20-50 mg/ Nm³ leva a fatores de emissão de 40-100 g/t pelota (Haskoning, 1993)
- *Scrubber* - 50 mg/ Nm³ leva a um fator de emissão de 100 g/t pelota (Haskoning, 1993). Na planta KK3 em Kiruna na Suécia, chega-se a 25 g/t pelota (EIPPCB, 1999).

Nenhuma informação foi encontrada sobre emissões da etapa de peneiramento. IISI/UNEP (1997) apresenta o fator de emissão total de 350 g/t pelota sem nenhum dado adicional. As faixas e valores para o nível de emissão Extremo foram calculadas com base nas eficiências de remoção dos equipamentos citados nos outros níveis ou com dados diretos. Dados para o equipamento GSA de uma planta na Suécia indicam 1400 mg/ Nm³ antes do abatimento (EIPPCB, 1999), valor que confrontado com um fluxo de 2400 Nm³/ t de pelota, resulta em um fator de emissão de 3360 g/t pelota. Para o nível de emissão Alto, na falta de dados foi considerado um nível de remoção de 50%, proveniente de equipamentos menos eficientes como ciclones.

SO₂

Emissões da etapa de queima dependem do conteúdo de enxofre do minério de ferro, dos aditivos e do combustível usado. Sistemas GSA e *scrubbers* podem remover emissões de SO₂ com 90% ou mais de eficiência. EIPPCB (1999) apresenta o abatimento com GSA de uma planta sueca com eficiência de 96,8%, ou seja, a partir de concentração de 300 mg/Nm³ (com fluxo de 2400 Nm³/ t de pelota, resulta em 720 g/t de pelota antes do GSA, e portanto chega a um fator de emissão de 23 g/t de pelota após o GSA, o mínimo que encontramos. (Haskoning, 1993) apresenta emissões sem controle da ordem de 1200 g/t sinter. EIPPCB (1999) indica 250 g/t de pelota para o caso de não se ter técnica de abatimento mas ainda apresentar emissões relativamente baixas, possivelmente em razão do baixo conteúdo de

enxofre em insumos, citada anteriormente. IISI/UNEP (1997) apresenta o valor de 100 g/t pelota sem maiores detalhes.

NO_x

A formação de NO_x térmico nos queimadores, formado pela reação entre oxigênio (O₂) e nitrogênio (N₂) é significativa devido às altas temperaturas, entre 1300-1400°C e disponibilidade de oxigênio. Portanto, as emissões podem ser minimizadas através da redução da temperatura de pico nos queimadores e reduzindo o excesso de oxigênio no ar de combustão. As emissões de NO_x de combustível podem ser reduzidas substituindo óleo e carvão por combustíveis gasosos como butano e propano, o que pode reduzir também as emissões de SO₂ e CO₂. As duas alternativas caracterizam medidas de Prevenção da Poluição. Emissões em plantas novas podem chegar a 150 g/t pelota. IISI/UNEP (1997) apresenta o valor 500 g/t pelota, o mesmo que o melhor resultado na planta integrada da Hoogovens na Holanda. A desnitrificação não é considerada devido aos altos custos. Não há dados suficientes para estabelecer faixas para os fatores de emissão.

Na nova planta sueca KK3 da empresa LKAB, comissionada em 1996, as emissões são de 140 g/t de pelota (concentração de 58 mg/Nm³ com fluxo de 2400 Nm³/ t de pelota), obtidas com as técnicas descritas acima e dois grandes queimadores. A planta da Hoogovens é mais antiga (1970), tem maior consumo de energia por ser integrada e usa 56 pequenos queimadores. A faixa de emissões é de 510-970 g/t de pelota (concentração de 260-500 mg/Nm³ com fluxo de 1940 Nm³/ t de pelota). As medidas de PP são mais difíceis de serem aplicadas em plantas já em funcionamento.

CO

Poucos dados disponíveis. IISI/UNEP (1997) apresenta o valor 470 g/t pelota e EIPPCB (1999) indica 410 g/t pelota.

VOC

Dado único, apenas indicativo, de uma planta integrada.

HCl

Poucos dados disponíveis. Nível de emissão Baixo, obtido com o método GSA, com 99% de eficiência, e no nível Médio com *scrubbers*. Os restantes foram calculados com base nos dados de concentração antes do GSA com valores para plantas sem técnica de remoção de gases ácidos, ou seja, 133 mg/Nm³ com fluxo de 2400 Nm³/ t de pelota, resultando em 320 g/ t de pelota (EIPPCB, 1999).

HF

Poucos dados disponíveis. Nível de emissão Baixo, obtido com o método GSA, com 99% de eficiência, e no nível Médio com *scrubbers*. Os restantes foram calculados com base nos dados de concentração antes do GSA com valores para plantas sem técnica de remoção de gases ácidos, ou seja, 78 mg/Nm³ com fluxo de 2400 Nm³/ t de pelota, resultando em 190 g/ t de pelota (EIPPCB, 1999).

PAH – Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Dado único (EIPPCB, 1999) sem maiores detalhes.

PCDD/F

Dado único (EIPPCB, 1999) sem maiores detalhes.

Os parâmetros e os fatores de emissão estabelecidos para cada nível são mostrados na Tabela 10 e na Tabela 11, respectivamente.

Tabela 10 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para plantas de pelotização

PELOTIZAÇÃO	Nível de emissão atmosférica			
	Baixo	Médio	Alto	Extremo
Insumos materiais por tonelada de pelota produzida	Minério de ferro - 1025 kg (magnetita); Fluxos – 30 kg	Minério de ferro - 1025 kg (magnetita); Fluxos – 30 kg	Minério de ferro - 1025 kg (magnetita); Fluxos – 30 kg	Minério de ferro - 1025 kg (magnetita); Fluxos – 30 kg
Insumos energ. por tonelada de pelota produzida	Carvão – 8 kg Eletricidade – 36 kWh Óleo - 2,5 kg	Carvão – 8 kg Eletricidade – 36 kWh Óleo - 2,5 kg	Carvão – 10 kg Eletricidade – 40 kWh Óleo - 2,5 kg	Carvão – 10 kg Eletricidade – 50 kWh Óleo - 2,5 kg
CP/PP Moagem	ESP	ESP	Ciclones	Nenhum
CP/PP Mistura	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível
CP/PP Queima	GSA + ESP; Abatimento de NOx no processo	Scrubber; Abatimento de NOx no processo	Ciclones	Nenhum
CP/PP Peneiragem	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível

Fonte: Elaboração própria a partir de Haskoning (1993), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

Tabela 11 – Fatores de emissões atmosféricas em plantas de pelotização para níveis selecionados.

PELOTIZAÇÃO		Nível de emissão atmosférica							
		BAIXO		MÉDIO		ALTO		EXTREMO	
		Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor
Material particulado	g/t pelota	100-200	150	200-1000	350	1000-2000	1200	-	3500
SO ₂	g/t pelota	23-120	100	100-250	250	250-720	500	720-1200	1200
NO _x	g/t pelota	-	150	-	500	-	970	-	970
CO	g/t pelota	-	470	-	470	-	470	-	470
VOC	g/t pelota	-	40	-	40	-	40	-	40
HCl	g/t pelota	-	2	-	48	-	320	-	320
HF	g/t pelota	-	1	-	39	-	190	-	190
PAH	mg/t pelota	-	0,19	-	0,19	-	0,19	-	0,19
PCDD/F	µg I-TEQ/t pelota	-	0,006	-	0,006	-	0,006	-	0,006

Fonte: Elaboração própria a partir de EC (1996), Haskoning (1993), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

II.4 Sinterização

A sinterização é um processo de aglomeração que consiste na preparação do minério de ferro e de outros materiais complementares como fundentes e finos de coque para a carga do alto-forno, de forma a esta adquirir as características necessárias de resistência mecânica, porosidade, granulometria, composição química e redutibilidade. A carga é submetida a uma operação redutora-oxidante a temperaturas na faixa de 1200 a 1400° C, utilizando-se para isto

o coque como combustível principal e gases (GCO, GAF e GN) como combustíveis auxiliares e de ignição.

As emissões atmosféricas são bastante significativas e são provenientes das etapas de queima ou sinterização propriamente dita (emissões primárias), manuseio dos insumos materiais, zona de descarga e resfriamento de sínter (emissões secundárias). Além da aglomeração de minério de ferro, a sinterização cumpre um importante papel na recirculação de pós, lamas, carepas, escórias, além do próprio sínter em frações mais finas (Figura 7).

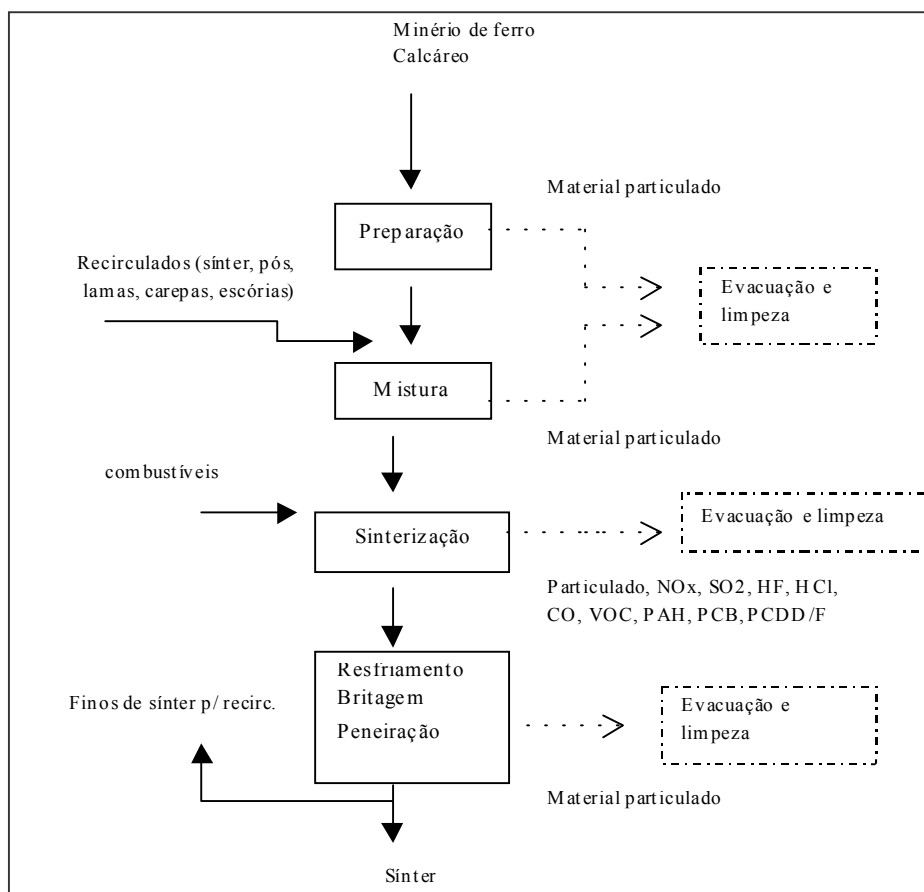


Figura 7 – Esquema simplificado dos insumos e emissões atmosféricas da etapa de sinterização

Na Tabela 12 são mostrados dados de insumos de 5 plantas de sinterização (EIPPCB, 1999). IISI (1998) apresenta o consumo de energia primária total médio de 1,8 GJ para 7 plantas Tabela 13, divididos percentualmente da seguinte forma: coque (66%), outros combustíveis (9%), pós coletados (6%), gases (3%) e eletricidade (14%). Baseado em

tecnologias selecionadas, são apresentados dois valores de potencial de melhoria de eficiência energética, 1,5 e 1,2 GJ por tonelada de sinter produzido.

O fluxo de gás específico do leito de queima está na faixa de 1500-2500 Nm³/t sinter. Utilizamos o valor 2100 Nm³/t sinter (EIPPCB, 1999). Quase toda a eletricidade é consumida por ventiladores usados para a exaustão do gás de sinterização, para resfriamento e coleta de pós. Quanto aos insumos, UNEP e IISI (1997) apresenta para 1 tonelada de sinter produzido o consumo de: 950 kg de minério de ferro, 35 kg de finos de coque, 150 kg de fluxos e 250 kg de materiais reciclados.

Tabela 12 - Insumos em plantas de sinterização (EIPPCB, 1999)

Insumos	Unidade	Quantidade
Minério de ferro	kg / tonelada de sinter	680-850
Outro materiais com ferro	kg / tonelada de sinter	37-125
Calcáreo	kg / tonelada de sinter	105-190
Cal	kg / tonelada de sinter	0,5 - 14
Pós coletados do gás de exaustão	kg / tonelada de sinter	11-27
Materiais reciclados	kg / tonelada de sinter	42-113
Reciclagem interna de sinter	kg / tonelada de sinter	230-375
GCO/GAF/GN	MJ / tonelada de sinter	57-200
Finos de coque	MJ/t sinter (kg/t sinter)	1260-1380 (44 - 48)
Eletricidade	MJ/t sinter (kWh/t sinter)	96-114 (27-32)
Ar comprimido	m ³ /tonelada de sinter	1,2 - 3
Água	m ³ /tonelada de sinter	0,01 - 0,35

Nota: Os dados provêm de 5 plantas de 5 países europeus diferentes, consideradas líderes em proteção ambiental e produtividade; para o cálculo do conteúdo energético primário de eletricidade foi usado o fator de conversão calórico 1 kWh = 3,6 MJ = 860 kcal.

Tabela 13 - Insumos energéticos em 7 plantas de sinterização (IISI, 1998)

Insumos	Unidade	Quantidade (faixa)	Quantidade (valor)
Finos de coque	kg / tonelada de sinter	25-56	42
PCI ^a	MJ/kg	28-30	29
Conteúdo energético	MJ	709-1568	1224
Outros combustíveis (antracito) ^b	kg / tonelada de sinter	8-20	14
PCI	MJ/kg	23-31	27
Conteúdo energético	MJ	206-609	372
Pós coletados do gás de exaustão ^c	kg / tonelada de sinter	5-13	10
PCI	MJ/kg	10-18	13
Conteúdo energético	MJ	63-183	132
GCO/GAF ^d	-	-	-
PCI	MJ/Nm ³	10-20	18
Conteúdo energético	MJ	19-122	63
Eletricidade ^e	kWh/tonelada sinter	23-35	29
Conteúdo energético primário	MJ	207-322	262
Total de energia primária	MJ / tonelada de sinter	1665-1915	1819

Notas: a) PCI – poder calorífico inferior; b) apenas 3 plantas utilizam antracito; c) 1 planta não utiliza pós coletados; d) 2 plantas utilizam uma mistura de GCO e GAF e as outras 5 utilizam apenas GCO; e) para o cálculo do conteúdo energético primário de eletricidade foi usado o fator de conversão 1 kWh = 9,2 MJ.

EC (1996) fornece dados de 39 máquinas de sinter em 22 plantas que produziram 85.5% do total de 12 países da Comunidade Européia em 1992. As emissões dependem fortemente de fatores como manutenção adequada de equipamentos e ajuste de variáveis operacionais. As emissões secundárias, principalmente do resfriamento de sinter não podem ser desprezadas, pois os fatores de emissão estão na faixa de 300-500 g/t sinter (EC, 1996).

Material particulado

Para as emissões primárias as concentrações e fatores de emissão (usando 2100 Nm³/t sinter) são os seguintes para os sistemas de despoeiramento (EIPPCB, 1999):

- ESP – 50-160 mg/ Nm³ leva a um fator de emissão de 105-336 g/t sinter. Precipitadores eletrostáticos secos são os dispositivos de limpeza do sistema primário mais comuns nas plantas de sinterização da Europa, com eficiências entre 95-99%.
- Sistemas ESP avançados (eletrodo móvel, pulso e alta voltagem) – menos que 50 mg/Nm³ resultando em um fator de emissão de 105 g/t sinter;
- ESP + filtro de manga - 10 mg/ Nm³ resultando em um fator de emissão de 21 g/t sinter;
- ESP + *scrubber* (sistema Airfine) – 50 mg/ Nm³ resultando em um fator de emissão de 105 g/t sinter;
- Ciclones - 300-600 mg/ Nm³ resultando em um fator de emissão de 630-1260 g/t sinter, com eficiência média de 80%. O valor superior não é confirmado por outras fontes, portanto foi adotado o mais alto valor apresentado EC (1996). A maior parte das plantas utiliza ciclones para coletar material particulado de maior diâmetro anteriormente aos sistema citados acima;
- EOS – 170 g/t sinter (EIPPCB, 1999)

Para as emissões secundárias, principalmente da etapa de resfriamento (EIPPCB, 1999):

- Filtros – 40-100 g/t sinter
- Ciclones – 92-413 g/t sinter

Na Europa, em cada 4 sistemas instalados, 3 são ciclones e 1 é ESP. Quando há recuperação de calor advindo do resfriamento de síter, o material particulado é reciclado na sinterização.

As faixas e valores para o total de emissão são calculados através da soma das emissões primárias e secundárias ficam assim:

- Nível de emissão Baixo: faixa – $20 + 40 = 60$ g/t síter e $105 + 100 = 205$ g/t síter; valor – $110 + 70 = 180$ g/t síter;
- Nível de emissão Médio: faixa – $105 + 100 = 205$ g/t síter, e $336 + 413 = 750$ g/t síter; valor - $220 + 205 = 425$ g/t síter;
- Nível de emissão Alto: faixa – $630 + 90 = 720$ g/t síter, e $800 + 400 = 1200$ g/t síter; valor – $630 + 250 = 880$ g/t síter;
- Nível de emissão Extremo – 5000-6000 g/t síter (Haskoning, 1993) e 5035 g/t síter (Energetics, 2000).

SO₂

A minimização das emissões de SO₂ podem ser alcançadas, primeiro, através do uso de insumos com mais baixo teor de enxofre, por exemplo o coque e o minério de ferro, e, segundo através da redução do consumo de coque. Os valores para a concentração de SO₂ nos gases de exaustão estão na faixa de 300-850 mg/Nm³. Usando um fluxo de 2100 Nm³/t síter, os fatores de emissão se tornam 600-1800 g/t síter. EC (1996) apresenta fatores de emissão entre 500 e 1500 g/t síter, com média de 970 g/t síter e desvio padrão de 480 g/t síter.

Dessulfurização úmida é uma alternativa de alta eficiência (90%) mas alto custo, aplicada em apenas 1 planta de sinterização na Alemanha e em várias outras no Japão. Infomil (1997) apresenta fatores de emissão entre 20 e 50 g/t síter, com eficiências de até 98%, mas aqui foi considerada eficiência de 90%, ou seja, 120 g/t síter. A alternativa de dessulfurização seca com carbono ativado regenerativo atinge 97% de eficiência. O EOS (Sistema de Otimização Energética) permite um fator de emissão de 680-840 g/t síter. O nível de emissão Extremo adotado é de 1200 g/t síter (Haskoning, 1993).

NO_x

Os sistemas de desnitrificação são aplicados somente no Japão, utilizando Redução Catalítica Seletiva (SCR) com amônia. EIPPCB (1999) apresenta para duas plantas de síter no Japão valores entre 40 e 120 mg/Nm³, com fatores de emissão de 80-250 g/t síter. Os valores para EOS estão na faixa de 300-410 g/t síter, a qual cai no nível de emissão Médio. No entanto, o EOS aqui é considerado no nível Baixo em razão dos fatores de emissão para material particulado.

Mensurações contínuas para seis máquinas de síter oferecem 200-300 mg/ Nm³, com fatores de emissão de 420-630 g/t síter (EC, 1996). EIPPCB (1999) indica 480-770 g/t síter, e apresenta um valor extremo de 1500 g/t síter.

CO

EC (1996) apresenta uma média de 19600 g/t síter e desvio padrão de 5700 g/t síter. Na empresa Hoogovens, na Holanda, as emissões de CO foram reduzidas em 35% com a adoção da alternativa EOS.

VOC

EC (1996) apresenta valores entre 19 to 62 mg/Nm³, correspondendo a fatores de emissão de 40 to 130 g/t síter, com média de 88 g/t síter. Poucos dados disponíveis.

HCl

EC (1996) apresenta 15 valores entre 3 e 82 mg/Nm³, correspondendo a fatores de emissão de 21-87 g/t síter, com média de 54 g/t síter, e um valor extremo de 300 g/t síter. Os valores inferiores são obtidos com a adoção de filtros ou sistema Airfine (ESP + scrubber), de acordo com EIPPCB (1999).

HF

EC (1996) apresenta 19 valores entre 0,4 to 15 mg/Nm³, correspondendo a fatores de emissão de 0,8 to 7,0 g/t síter, com média de 3,6 g/t síter para 13 plantas, 5-20 g/t síter para 5 plantas e um valor extremo de 57 g/t síter, resultando em média geral de 9,5 g/t síter. Os valores inferiores são obtidos com a adoção de filtros ou sistema Airfine (ESP + scrubber), de acordo com EIPPCB (1999).

PAH – Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

Poucos dados disponíveis, apenas indicativos. EIPPCB (1999) apresenta a faixa 105-840 mg/t sínter, o valor inferior obtido com a adoção de sistema Airfine (ESP + scrubber), de acordo com EIPPCB (1999).

PCB – Bifenilas policloradas

Poucos dados disponíveis, apenas indicativos. EIPPCB (1999) apresenta a faixa 1-12 mg/t sínter. PCB podem já estar presentes nos insumos materiais e energéticos, coque e minério de ferro, ou podem ser originados por síntese *de novo* (secundária) (EIPPCB, 1999).

PCDD/F

As emissões de PCDD/F podem ser originadas nos insumos (carepas e GAF) formados via condensação de precursores químicos como PCB ou via síntese *de novo*. O uso do sistema Airfine (ESP + scrubber) pode levar a 0,4 ng I-TEQ/Nm³, correspondendo a fatores de emissão de cerca de 1,0 µg I-TEQ/t sínter. Filtros com adição de finos de coque de linhita permite eficiências de remoção da ordem de 98%, com concentração de 0,2-1,0 ng I-TEQ/Nm³, correspondendo a fatores de emissão de 0,5-2,5 µg I-TEQ/t sínter.

Os parâmetros e os fatores de emissão estabelecidos para cada nível são mostrados na Tabela 14 e na Tabela 15, respectivamente.

Tabela 14 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para plantas de sinterização.

SINTERIZAÇÃO	Nível de emissão atmosférica			
	Baixo	Médio	Alto	Extremo
Insumos materiais por tonelada de pelota produzida	Minério de ferro - 950 kg; Fluxos – 150 kg	Minério de ferro - 950 kg; Fluxos – 150 kg	Minério de ferro - 950 kg; Fluxos – 150 kg	Minério de ferro - 950 kg; Fluxos – 150 kg
Insumos energ. por tonelada de sínter produzido	Coque – 44 kg Eletricidade – 31 kWh	Coque – 52 kg Eletricidade – 31 kWh	Coque – 67 kg Eletricidade – 36 kWh	Coque – 67 kg Eletricidade – 36 kWh
CP/PP Sistema primário	ESP avançados; ou ESP + filtros; ou ESP + scrubber (sistema Airfine); e Dessulfuração úmida	ESP; Baixos a médios teores de enxofre nos insumos	Ciclones; Altos teores de enxofre nos insumos	Nenhum
CP/PP Sistema secundário	Filtros	Nenhum	Nenhum	Nenhum

Fonte: Elaboração própria a partir de EC (1996), Haskoning (1993), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

Tabela 15 – Fatores de emissões atmosféricas em plantas de sinterização para níveis selecionados.

Sinterização		Nível de emissão atmosférica							
Fatores de emissão		BAIXO		MÉDIO		ALTO		EXTREMO	
		Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor
Material particulado	g/t sinter	60-205	180	205-750	425	720-1200	880	5000-6000	5000
SO ₂	g/t sinter	20-150	120	500-1000	970	1000-1500	1450	1200-1500	1500
NO _x	g/t sinter	80-250	85	420-630	500	>700	790	>900	1500
CO	g/t sinter	12000-15000	14000	15000-25000	19600	25000-30000	25300		30000
VOC	g/t sinter		40		88		130		150
HCl	g/t sinter		21		54		87		300
HF	g/t sinter	1-7	3,6	7-10	9,5	10-20	15	>20	57
PAH	mg/t sinter		105		470		840		840
PCB	mg/t sinter		3		6		12		12
PCDD/F	µg I-TEQ/t sinter	0,4-2,0	1		10		20		20

Fonte: Elaboração própria a partir de EC (1996), Haskoning (1993), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

II.5 Coqueificação

Na Coqueria, diversos tipos de carvão mineral são misturados e aquecidos a temperaturas da ordem de 1000° C, em ambiente isento de ar, para a liberação da umidade volátil do carvão, resultando no coque, um material não fusível e poroso, usado nos Altos-fornos como principal agente redutor. O coque permitiu o desenvolvimento de Altos-fornos de grande porte pois têm resistência o bastante para sustentar a coluna de minério de ferro.

Formam-se também gases de coqueria que, ao serem recolhidos e tratados, permitem a recuperação de frações condensáveis como o benzeno, tolueno e o xileno, que são comercializáveis, e o alcatrão, que pode ser utilizado em caldeiras. O gás pode ser aproveitado como combustível na própria coqueria, nos fornos de reaquecimento, nos altos-fornos, na sinterização e em caldeiras. Completada a operação, que pode durar de 13 a 24 horas dependendo das dimensões do forno, temperatura e mistura de carvões, o coque é resfriado ou apagado com água. Uma tecnologia mais moderna é o apagamento a seco do coque ou *coke dry quenching* (CDQ), que confere maior uniformidade na umidade final, promove maior recuperação de energia e redução dos impactos ambientais. O calor sensível do coque é recuperado pela passagem de uma corrente de gás inerte (N₂), que após o aquecimento

transfere a energia térmica para uma caldeira onde é gerado vapor. Na Figura 8 é mostrado um esquema geral do processo de coqueificação com as principais emissões atmosféricas.

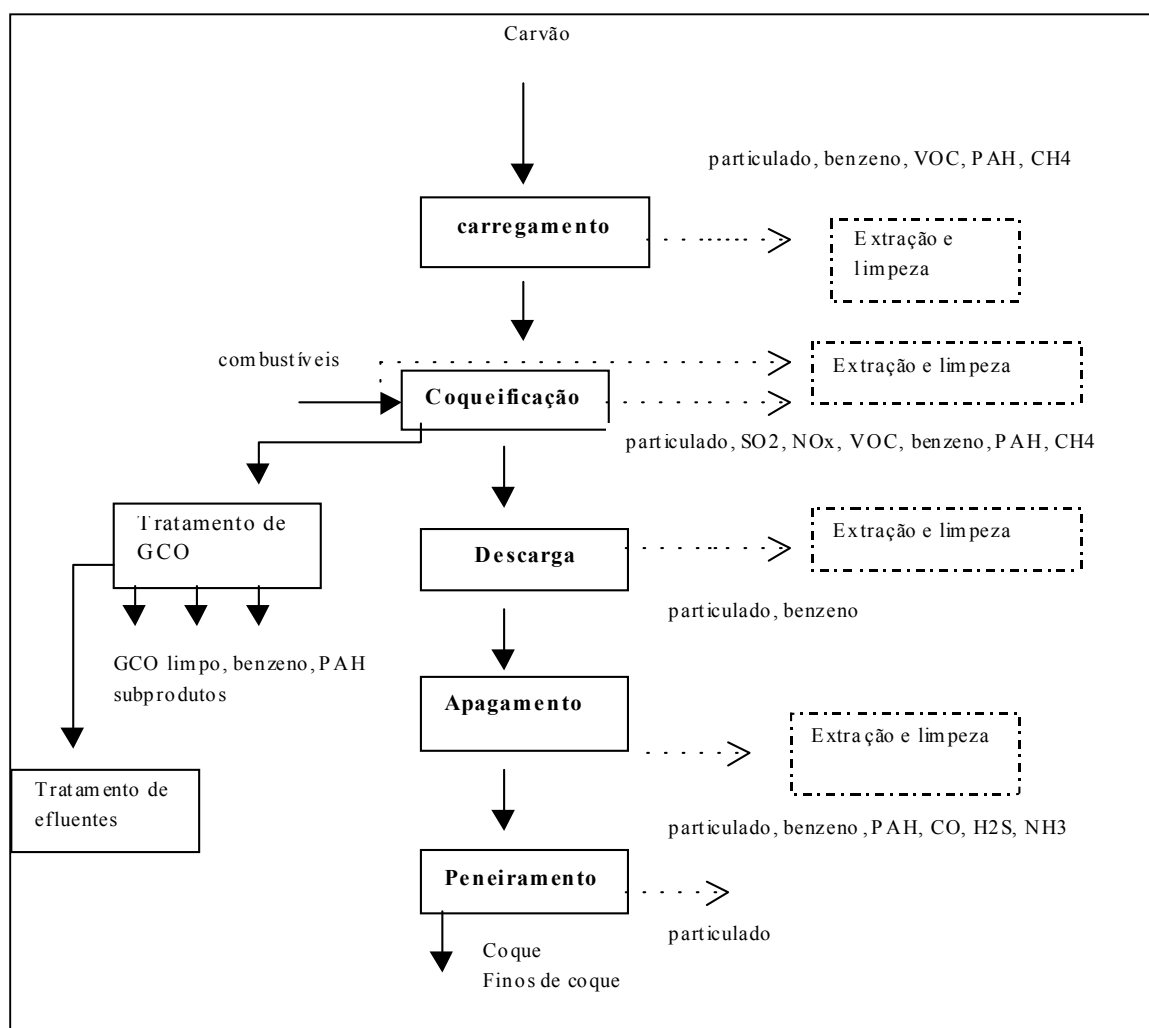


Figura 8 - Esquema simplificado da etapa de coqueificação

Os efluentes contêm numerosos compostos orgânicos e inorgânicos e metais tóxicos. Grande parte dos resíduos pode ser reciclado ou vendido. Vários subprodutos são gerados durante a limpeza do gás de coqueria, inclusive sete tipos de rejeitos perigosos. Na Tabela 16 são mostrados valores de insumos e subprodutos de plantas de plantas de coque consideradas eficientes. Na Tabela 17, apresentam-se apenas insumos energéticos.

Tabela 16 – Insumos, produtos e sub-produtos em plantas de coque^a (EIPPCB, 1999)

Insumos	Unidade	Quantidade
Carvão seco	kg / tonelada de coque	1250-1350
GCO/GAF	MJ / tonelada de coque	3200-3900
Vapor^b	MJ/tonelada de coque	60-300
Elettricidade^c	MJ/t coque (kWh/t coque)	20-170 (6-47)
Ar comprimido	m ³ /tonelada de coque	7-15
Água de processo	m ³ /tonelada de coque	0,8 - 10
Produtos e sub-produtos		
GCO	MJ / tonelada de coque	7400-9500
Vapor^d	MJ / tonelada de coque	10-180
Benzeno	kg / tonelada de coque	8 - 15
Ácido sulfúrico^e (H₂SO₄)	kg / tonelada de coque	4 - 9
Alcatrão	kg / tonelada de coque	25 - 46
Enxofre^f	kg / tonelada de coque	1,5 – 2,3

Notas: a) Os dados, relativos a 1996, provêm de 11 plantas de 4 países europeus diferentes, consideradas líderes em proteção ambiental e produtividade; b) Plantas antigas (mais de 20 anos) podem apresentar um consumo de vapor de 1200 MJ/ t coque; c) valor superior para plantas antigas, e para o cálculo do conteúdo energético primário de eletricidade foi usado o fator de conversão calórico 1 kWh = 3,6 MJ = 860 kcal.; d) valor superior para o caso de recuperação de vapor com apagamento a seco do coque (CDQ); e) no caso de absorção de SO₂ com ácido sulfúrico como sub-produto; f) no caso de absorção de SO₂ com enxofre como sub-produto.

Tabela 17 – Insumos energéticos em 4 plantas de coque (IISI, 1998)

Insumos	Unidade	Quantidade (faixa)	Quantidade (valor)
GCO/GAF	MJ/t coque seco	3218-3465	3270
Vapor	MJ/t coque seco	224-584	430
Elettricidade	MJ (kWh)/t coque seco	193 (21) – 386 (42)	306 (33)
Total de energia primária	MJ / t coque seco	3758-4176	1819

Notas: a) para o cálculo do conteúdo energético primário de eletricidade foi usado o fator de conversão 1 kWh = 9,2 MJ; b) nenhuma das 4 plantas adota apagamento a seco do coque.

As emissões das plantas de coque são provenientes das seguintes etapas de coqueificação: manuseio de carvão, enforamento (carregamento), carbonização (vazamentos), combustão, desenforamento (descarregamento), apagamento do coque, purificação do gás de exaustão.

- Manuseio de carvão

Inclui o descarregamento, armazenagem, transporte interno, preparação, carregamento na torre de carvão e no carro. Emissões de particulado após o abatimento com ciclones é de cerca de 55 g/t carvão (EPA, 1995). Poucos dados estão disponíveis para esta etapa. As emissões fugitivas são difíceis de mensurar.

- Carregamento de carvão

Três técnicas são adotadas para o carregamento com carros: o carregamento sem fumaça (*smokeless charging*), carregamento sequencial (*sequential charging*) e *telescope sleeves*. As emissões podem ser bastante baixas com tais técnicas.

Para material particulado, Greenfield (1986) apresenta fatores de emissão sem controle de 240g/t carvão, para carregamento sequencial 8 g/t carvão e 17 g/t carvão usando o *larry car scrubber*. Considerando 1250 kg of carvão por tonelada de coque, os fatores de emissão se tornam 300g/t coque, 10 g/t coque e 50 g/t coque, respectivamente. EIPPCB (1999) apresenta 5 g/t coque usando *telescope sleeves*. EC Coke (1993) indica fator de emissão menor que 10 g/t coque.

EC Coke (1993) apresenta a faixa 0,009- 0,9 g SO₂/t coque, 6-1200 mg benzeno/t coque, 0,3 g NH₃/t coque, 0,06- 72 g CO /t coque. Greenfield (1986) mostra 300 g benzeno/t coque para emissões sem controle.

- Coqueificação (carbonização)

Durante o ciclo de coqueificação as emissões ocorrem nas portas, nas entradas de carregamento e nos dutos de ascensão. EC Coke (1993) apresenta a faixa 0,7-7 g material particulado/t coque, 1-23 g benzeno/t coque, 3-39 g CO/t coque, 0,3-2,4 g SO₂/t coque, 0,036-0,9 g H₂S/t coque, 0,18-1,8 g NH₃/t coque, 0,06-0,6 g NO_x/t coque.

- Combustão nos fornos

O calor para o processo de coqueificação é fornecido por combustíveis gasosos, GCO e GAF. Na combustão as emissões de SO₂ e NO_x são significativas. EIPPCB (1999) apresenta a faixa 80-300 g SO₂/t coque no caso de GCO dessulfurizado e 240-1800 g NO_x/t coque. O uso de Redução Catalítica Seletiva (RCS) permite obter 90% de desnitrificação mas é pouco aplicada devido aos altos custos. Tecnologias de baixa emissão de NO_x, como combustão em estágios podem alcançar fatores de emissão da ordem de 300-450 g/t coque. Outras medidas podem ser aplicadas como recirculação do gás de exaustão e menores temperaturas de coqueificação.

- **Desenformamento**

EC Coke (1993) indica fatores de emissão de > 210 g dust/t coque, 6-36 g CO/t coque, 6-24 g SO₂/t coque. EPA (1995) apresenta vários fatores de emissão de acordo com os sistemas de coleta e limpeza empregados:

1. Emissões coletadas por *coke side shed* e limpas com ESP – 225 g/t coque;
2. Emissões coletadas por *travelling hood* e limpas com *scrubber* – 90 g/t coque – e com filtros de manga – 45 g/t coque; e
3. Emissões coletadas e limpas por *quench car enclosure (mobile scrubber car)* – 36 g/t coque.

Emissões de particulado de 1-5 g/t coque podem ser obtidas com o *Minister Stein System*, que consiste em uma máquina de transferência de coque com coifa integrada, duto estacionário e limpeza de gases (EIPPCB, 1999). Utilizando *coqueside car*, podem ser obtidas emissões de benzeno da ordem de 0,5 g/t coque e usando *hood car* 0,02-0,07 g/t coque (Eisenhut, 1990). Greenfield (1986) apresenta 4 g/t coque para emissões sem controle. EPA (1995) mostra 35 g CO/t coque e 100 g VOC/t coque.

- **Apagamento**

EC Coke (1993) apresenta 140 g de particulado/t coque, uma faixa de 300-1410 g CO/t coque, uma faixa de 51-81 g H₂S/t coque e 4,5 g NH₃/t coque. Eisenhut (1990) apresenta 1-100 mg PAH/t coque. Emissões de particulado com apagamento a úmido do coque sem medidas de controle são de 200-400 g/t coque. Torres de apagamento equipadas com anteparos de redução (*reduction baffles*) podem atingir fatores de emissão inferiores a 25 g/t coque (EIPPCB, 1999). Sistemas de apagamento a seco do coque (CDQ) com ciclones e filtros de manga e eficiências maiores que 98% apresentam fatores de emissão de cerca de 10 g/t coque.

- **Purificação**

Consiste em uma série de etapas de limpeza do gás de exaustão para a obtenção de amônia, GCO, alcatrão, fenol e óleos leves. EIPPCB (1999) apresenta 1,5-4,5 mg PAH/t coque, a faixa 0,1g de benzeno/t coque e 24 g of benzeno/t coque para plantas sem o *gas balancing pipe system*.

- Manuseio e peneiragem de coque

Utilizando sistema de ciclones para limpeza obtêm-se 5 g/t coque (EPA, 1994c).

Para determinação dos níveis Extremo e Alto de emissões são consideradas a Tabela 18 e a Tabela 19. Os parâmetros dos níveis de emissão são mostrados na Tabela 20.

Tabela 18 – Emissões sem controle de poluentes selecionados por etapa de processo nas plantas de coque em g/t coque (EPA, 1995)

	Particulados	SO ₂	NO _x	CO	VOC
Pré-aquecimento de carvão	1590	-	-	136	
Carregamento	218	10	15	272	1135
Escape (vazamento)	232	45	5	270	681
Descarregamento	522	1500	136	32	91
Apagamento	513-2380 ^a	182	272 ^c	n.d.	10 ^c
Combustão	213	127-1816 ^b	1800 ^d	n.d.	908 ^d
Total	3288-5155	1864 - 3553	n.d.	678	2825

Notas: (a) Valor inferior para água limpa e superior para água suja, ou seja, com alto teor de hidrocarbonetos.; (b) valor inferior para GCO dessulfurizado e superior para GCO cru; (c) apagamento com água suja; (d) usando GCO cru.

Tabela 19 – Emissões de plantas de coque antigas (Hein et al., 1996)

	Particulate (g/t coque)	Benzeno (mg/t coque)	CO (g/t coque)
Carregamento	3-5	100	20-40
Escape (vazamento)	12	1800	-
Descarregamento	400-600 ^a	-	-
Apagamento	60-120	-	90-150
Combustão	n.d.	-	
Total	475-737	1900	110-190

Nota: (a) Emissões sem controle

Tabela 20 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para coquerias

PLANTAS DE COQUE	Nível de emissão atmosférica			
	Baixo	Médio	Alto	Extremo
Insumos por tonelada de coque	Carvão – 1250 kg Eletricidade – 33 kWh	Carvão – 1250 kg Eletricidade – 33 kWh	Carvão – 1250 kg Eletricidade – 33 kWh	Carvão – 1250 kg Eletricidade – 33 kWh
Procedimentos operacionais	Nível alto de manutenção, limpeza e controle de operação	Nível regular de manutenção, limpeza e controle de operação	Nível baixo de manutenção, limpeza e controle de operação	Nível baixo de manutenção, limpeza e controle de operação
CP/PP Enfornamento	Carros de carregamento	Carros de carregamento sequencial	Carro <i>scrubber larry</i>	Sem controle
CP/PP Coqueificação	Portas de forno otimizadas; Vedação dos dutos de ascensão com água; Vedação dos furos de enfornamento c/ suspensão de argila	Vedação dos dutos de ascensão com água; Vedação dos furos de enfornamento c/ suspensão de argila	Portas <i>knife edge</i> tradicionais	Sem controle
CP/PP Combustão	Combustão em estágios; Uso de GCO dessulfurizado	Uso de GCO dessulfurizado;	Ciclones	Sem controle
CP/PP Desenfornamento	Coifa integrada e filtros	Carro <i>scrubber</i> móvel	Extração com <i>coke side shed</i> e limpeza com ESP	Sem controle
CP/PP Apagamento	Apagamento a úmido com água limpa; redução de emissões c/ anteparos; ou CDQ	Apagamento a úmido com água suja; sem medidas de redução de emissões	Apagamento a úmido com água suja; sem medidas de redução de emissões	Sem controle
CP/PP Purificação	Dessulfuração com sistemas de absorção; obtenção de subprodutos	Dessulfuração com sistemas de absorção; obtenção de subprodutos	Sem dessulfuração	Não aplicada

Fonte: Elaboração própria a partir de Haskoning (1993), EPA (1995), Hein et al. (1996), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

Material particulado

Nível de emissão Baixo

Enfornamento - 10 g/t carvão usando carregamento sequencial; Faixa 5-10g/t coque;

Carbonização - 1 g/t coque; Faixa 0,7-2,0 g particulado/t coque;

Desenfornamento - 10 g/t coque usando *Minister Stein System*; Faixa 5-20 g/t coque;

Apagamento - 25 g/t coque (utilizando *apagamento a úmido com emissões minimizadas*);

Faixa 20-50 g/t coque;

Combustão (Combustão) – próximo de emissão zero (minimizando o escape entre as câmaras de coque e de aquecimento);

Manuseio do coque e peneiramento (abatimento com ciclones) – 5 g/t coque (EPA, 1994c)

Nível de emissão Médio

Enfornamento - 20 g/t carvão utilizando carregamento sequencial; Faixa 10-20g/t coque

Carbonização - 6 g/t coque; Faixa 2-10 g de particulado/t coque

Desenfornamento - 45 g/t coque; Faixa 20-100 g/t coque

Apagamento - 300 g/t coque; Faixa 200-400 g/t coque

Combustão – 55 g/t coque, usando ESP (EPA, 1995)

Manuseio e peneiramento de coque (limpeza com ciclones) – 5 g/t coque (EPA, 1994c)

Nível de emissão Alto

Enfornamento - 50 g/t carvão usando *larry car scrubber*; Faixa 20-240g/t coque

Carbonização - 12 g/t coque, valor para plantas antigas (Hein et al., 1996); Faixa 10-20 g particulado/t coque

Desenfornamento - 225 g/t coque; Faixa 200-300 g/t coque

Apagamento - 400 g/t coque; Faixa 200-400 g/t coque

Combustão – 55 g/t coque, usando ESP (EPA, 1995)

Manuseio e peneiramento de coque (limpeza com ciclones) – 5 g/t coque (EPA, 1994c)

SO₂

Maiores emissões ocorrem na etapa de combustão (EIPPCB, 1999). Os fatores de emissão são os seguintes: dessulfuração com sistemas de absorção – 80-300 g/t coque; dessulfuração insuficiente – 900 g/t coque; sem dessulfuração – 2800 g/t coque.

NO_x

Maiores emissões ocorrem na etapa de combustão (EIPPCB, 1999). A faixa dos fatores de emissão utilizando técnicas de baixo NO_x é de 300-450 g/t coque. EIPPCB (1999) apresenta 240-1800 g/t coque.

CO

As referências para os fatores de emissão de CO apresentam valores muito esparsos e não muito confiáveis. EIPPCB (1999) apresenta a faixa 390-4500 g/t coque, de acordo com a idade das plantas.

EPA (1995) apresenta 635 g/t coque, disconsiderando as emissões do apagamento.

EC Coke (1993) apresenta a faixa 300-1500 g/t coque.

H₂S

EIPPCB (1999) indica uma faixa de 12-60 g/t coque, de acordo com a idade das plantas. EC Coke (1993) indica maiores emissões na etapa de apagamento – 50-80 g/t coque. De acordo com EIPPCB (1999), 2,5 kg de H₂S são gerados para cada tonelada de coque produzida. Processos de dessulfuração removem H₂S com grande eficiência. Processos de oxidação úmida são mais eficientes, mas apresentam a desvantagem de produzir efluentes líquidos contaminados, enquanto processos de absorção são menos eficientes mas minimizam essa migração de contaminantes de um meio para outro.

PAH – Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

EIPPCB (1999) apresenta uma faixa de 500-1500 mg/t coque, com dados de duas plantas de coqueificação. Eisenhut (1990) apresenta a faixa 140-7000 mg/t coque, de acordo com a idade da planta.

Benzeno

EIPPCB (1999) apresenta a faixa 1-45 g/t coque, o valor inferior para uma planta moderna. Eisenhut (1990) apresenta a faixa 1-57 g/t coque, de acordo com as técnicas aplicadas nas diferentes etapas de produção. Não foram encontradas informações sobre valores médios.

Os valores e faixas dos fatores de emissão estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Fatores de emissão atmosféricas em plantas de coque para níveis selecionados.

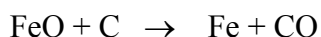
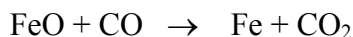
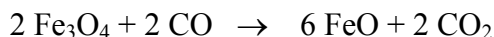
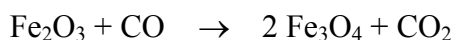
Coqueificação		Nível de emissão atmosférica							
Fatores de emissão		BAIXO		MÉDIO		ALTO		EXTREMO	
		Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor
Material particulado	g/t coque	35-90	90	300-600	550	490-1100	1100	3288-5155	3300
SO ₂	g/t coque	80-300	80	80-400	400	900-1500	1500	>2000	2800
NO _x	g/t coque	300-450	300	300-450	450		1100		1800
CO	g/t coque		400		1000		1500		1500
VOC	g/t coque								
H ₂ S	g/t coque		50		80		80		2500
PAH	mg/t coque		140		500		1000		7000
Benzeno	g/t coque		1,2		20		45		45
NH ₃	mg/t coque				5				
CH ₄	g/t coque				67				

Fonte: Elaboração própria a partir de Haskoning (1993), EPA (1995), Hein et al. (1996), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

II.6 Alto-forno

A operação de redução do minério de ferro em ferro gusa é efetuada no alto-forno, onde é introduzida uma mistura de coque e sínter. Esta etapa é a de maior gasto energético na siderurgia. No interior do Alto-Forno, através da introdução de ar pré-aquecido, o coque é gaseificado, e este gás, rico em CO, serve tanto como redutor quanto como combustível, saindo pelo topo do Alto-Forno. Denominado BFG (*Blast Furnace Gas*) ou GAF (gás de Alto-Forno) é conduzido a sistemas de despoeiramento e lavagem; depois uma parte é levada aos regeneradores para pré-aquecimento de ar; e outra parte segue como combustível para outras etapas. O ferro-gusa no estado líquido é retirado pela parte inferior do Alto-Forno. As impurezas retiradas constituem a escória que é escoada um pouco acima do metal líquido.

As reações de redução do minério de ferro no alto-forno são as seguintes:



As emissões na produção de ferro-gusa envolve as seguintes etapas: carregamento de insumos, geração do *hot blast*, injeção dos agentes redutores, vazamento e processamento de

escória. EC (1996) apresenta valores para 59 altos-fornos, representando 25 plantas, e correspondendo a 88% da produção europeia (12 países).

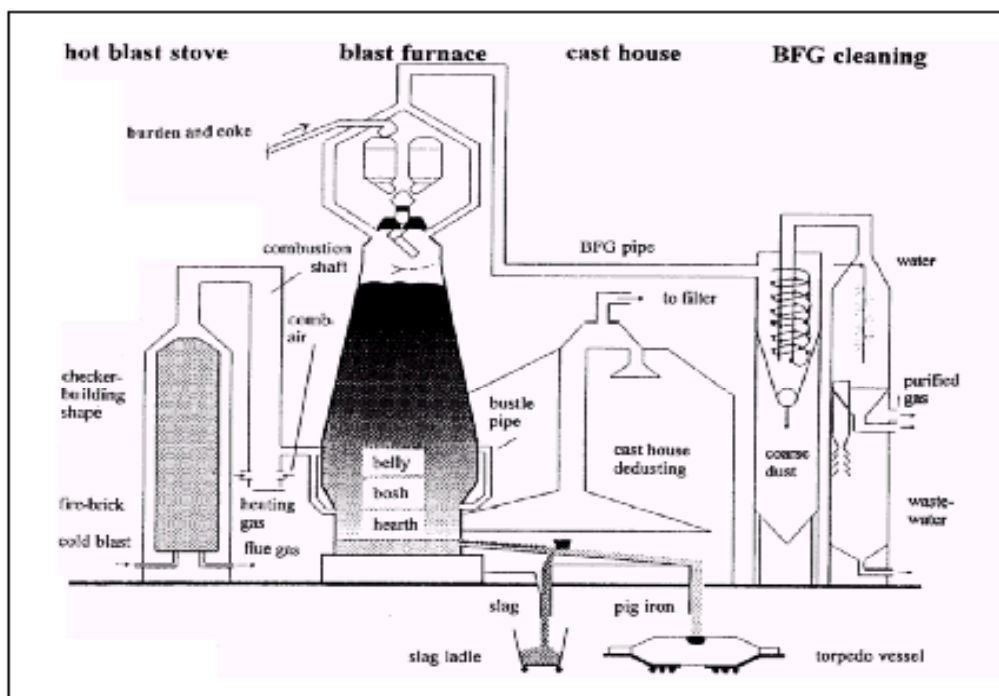


Figura 9 - Diagrama esquemático da etapa de produção de ferro-gusa no Alto-forno

Na Figura 9 os diversos componentes da produção de ferro-gusa nos Altos-fornos são mostrados, com destaque para os *hot stoves*, o Alto-forno, o sistema de vazamento de ferro-gusa e escória (*cast house*) e o sistema de limpeza do GAF, gás de Alto Forno (BFG, na sigla em inglês).

Em geral, a carga de ferro, considerando minério de ferro, pelotas e sinter, é cerca de 1500-1750 kg/t gusa. A média ponderada na indústria siderúrgica europeia é de 1160 kg sinter/t gusa (EIPPCB, 1999), enquanto nos EUA é de 256 kg sinter/t gusa (16%), 1296 kg pelotas/t gusa (81%), 48 kg min.fe./t gusa (3%), considerando carga total de 1600 kg/t gusa (Energetics, 2000). Para a indústria brasileira temos 1326 kg sinter/t gusa (78%), 68 kg pelotas/t gusa (4%), 306 kg min.fe./t gusa, considerando 1700 kg/t gusa (ABM, 1998). Na Tabela 22 são mostrados diversos valores de insumos em 4 Altos-fornos.

A injeção de finos de carvão (PCI – *Pulverized Coal Injection*) é uma tecnologia cada vez mais difundida no setor, e permite a redução do consumo de coque nos alto-fornos, ou

seja, o consumo de energia e as emissões na coqueria podem ser reduzidos. Quando adotada a PCI, os valores variam entre 41-226 kg/t gusa para os EUA, e propostas de medidas de maior eficiência consideram 130 e 225 kg/t gusa (Worrell et al., 1998). Na Alemanha, em 1992, a PCI era de cerca de 70 kg/t gusa (IISI, 1998). A Tabela 23 mostra o consumo residual de coque considerando a adoção de injeção de finos de carvão.

Tabela 22 – Insumos em Altos-fornos (EIPPCB, 1999)

Insumos	Unidade	Quantidade
Minério de ferro	kg / tonelada de gusa	25-350
Sínter	kg / tonelada de gusa	720-1480
Pelotas	kg / tonelada de gusa	100-770
Coque	kg / tonelada de gusa	280-410
Carvão	kg / tonelada de gusa	0-180
Materiais reciclados	kg / tonelada de gusa	2-8
Cal	kg / tonelada de gusa	0-10
GAF	MJ / tonelada de gusa	1050-2700
GCO	MJ / tonelada de gusa	90-540
Gás natural	MJ / tonelada de gusa	50-230
Elettricidade	MJ/t gusa (kWh/t gusa)	104-144 (29-40)
Vapor	MJ/tonelada de gusa	22-30
Oxigênio	m ³ /tonelada de gusa	25-55
Ar comprimido	m ³ /tonelada de gusa	9-11
Água	m ³ /tonelada de gusa	0,8 - 50

Nota: a) Os dados provêm de 4 plantas de 4 países europeus diferentes, consideradas líderes em proteção ambiental e produtividade; b) para o cálculo do conteúdo energético primário de eletricidade foi usado o fator de conversão 1 kWh = 3,6 MJ.

Tabela 23 – Consumo residual de coque a diferentes valores de PCI

Tipo	PCI (kg/t gusa)	Coque (kg/t gusa)
Nenhum	0	500
Típico	180	310
Melhor prática	210	285

Fonte: (Infomil, 1997)

No nível de emissão Médio consideramos 1160 kg sínter/t gusa (68%), 390 kg pelotas/t gusa (23%), 150 kg min.Fe./t gusa (9%), 358 kg coque/t; 84 kg carvão/t gusa e 10 kg fluxos/t gusa. A seguir as emissões das diferentes etapas de produção de gusa (EC, 1996; EIPPCB, 1999):

Hot stoves

Nos *hot stoves* são usualmente consumidos GCO, GAF e GN.

- SO₂

As emissões derivadas do consumo de GCO são significativas, dependendo da dessulfuração. Para plantas européias as concentrações reportadas estão entre 20 e 200 mg/Nm³, com alguns valores até 400 mg/Nm³, com fatores de emissão resultantes em geral menores que 200 g/t gusa, com média ponderada de 130 g/t gusa, e valores inferiores da ordem de 20 g/t gusa e superiores na faixa de 300-400 g/t gusa.

- NO_x

Os *hot stoves* são a principal fonte de emissões de NO_x nos altos-fornos devido às altas temperaturas alcançadas de cerca de 1100 °C. As concentrações reportadas estão na faixa de 25-350 mg/Nm³, com a maior parte dos valores de cerca de 10-110 g/t gusa, média ponderada de 73 g/t gusa, e outros valores entre 350-375 g/t gusa, e um valor extremo de 570 g/t gusa. Para o nível Alto de emissões, a faixa é de 180-375 g/t gusa. Com queimadores avançados as emissões podem ser reduzidas.

- Material particulado

Concentrações abaixo de 10 mg/Nm³, resultando em fatores de emissão entre 3-6 g/t gusa.

- CO

Fatores de emissão reportados se apresentam em faixa muito larga devido às diferentes condições de queima e fatores de projeto, como câmaras de combustão internas que levam a valores mais altos). No caso de câmaras de combustão externas, a concentração de CO é de aproximadamente 50 mg/Nm³, levando a fatores de emissão de 54 g/t gusa. A faixa e o valor do nível de emissão Alto ficam em 1000-2700 g/t gusa e 1600 g/t gusa, respectivamente.

Zona de carregamento

- Material particulado

Este tópico também inclui o manuseio de insumos. Dos 51 dispositivos de limpeza adotados, 2 são ESPs, 11 scrubbers e 38 filtros. Os fatores de emissão de 31 altos-fornos europeus reportados são de 5-38 g/t gusa, média de 14 g/t gusa, com valores extremos de 100 g/t gusa (usando scrubbers). O nível Alto está na faixa de 38-100 g/t gusa. A quantidade total de particulado extraído, isto é, coletado mais o emitido, excluindo assim as emissões difusas, apresenta a média de 720 g/t gusa, considerada como nível Extremo de emissões.

Preparação de PCI

- Material particulado

Material particulado é usualmente coletado por filtros. Os 15 valores reportados provêm de 9 plantas, com uma faixa de 2-55 g/t gusa e média 12 g/t gusa. A faixa de emissões do nível Alto é de 28-55 g/t gusa. As emissões de CO, SO₂ e NO_x são consideradas desprezíveis.

Cast House

- Material particulado

Dispositivos de coleta e limpeza operam em apenas 36 dos 59 altos-fornos reportados. Os valores de particulado extraídos estão na faixa de 1-5 kg/t gusa, com média ponderada de 1,74 kg/t gusa, os quais podem ser usados na determinação do nível de emissão Extremo. Dispositivos de limpeza incluem 14 filtros e 9 ESPs. De acordo com mensurações contínuas, os fatores de emissão estão na faixa de 2-80 g/t gusa, com média de 32 g/t gusa. Valores extremos de 180-200 g/t gusa são provenientes de estimativas e mensurações descontínuas. A faixa para o nível de emissão Baixo é de 2-30 g/t gusa, para o Médio é de 30-80 g/t gusa e para o Alto de 80 a 200 g/t gusa.

- SO₂

Foram reportados 15 valores, resultando em fatores de emissão na faixa de 2 a 265 g/t gusa, dos quais 13 valores abaixo de 100 g/t gusa, e média de 67 g/t gusa. A faixa adotada para o nível Baixo é de 2-36 g/t gusa, para o Médio de 36-100 g/t gusa e para o Alto de 100-265 g/t gusa.

- NO_x

Reportados 4 valores na faixa 1-29 g/t gusa. Poucos dados disponíveis mas as emissões são menos importantes.

- CO

Reportados 6 valores na faixa 28-113 g/t gusa.

- H₂S

Excluindo um valor extremo de 68,6 g/t gusa, 5 valores reportados estão na faixa de 0,3-4,4 g/t gusa.

Granulação de escória

- H₂S

As emissões dependem da tecnologia adotada no processamento da escória, no teor de enxofre da escória, da quantidade de escória produzida, a proporção de escória granulada e métodos de mensuração. Adotando condensação de vapor, aplicada em 4 dos 14 altos-fornos reportados, as emissões são menores, em torno de 1 g/t gusa. Os valores variam entre 1 e 320 g/t gusa, com média de 67 g/t gusa.

- SO₂

Valores reportados entre 1-151 g/t gusa, com média de 31 g/t gusa.

Na Tabela 24 os fatores de emissão são considerados para cada etapa da produção de gusa.

Tabela 24 – Fatores de emissão adotados por estágio de produção nos altos-fornos para os níveis de emissão Baixo, Médio e Alto.

Fonte de emissão	Part. (g/t gusa)			SO ₂ (g/t gusa)			NO _x (g/t gusa)			CO (g/t gusa)			H ₂ S (g/t gusa)		
	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
<i>Hot stoves</i>	3	6	6	20	130	300	20	73	350	54	906	1600	-	-	-
Carregamento	5	14	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Preparação PCI	2	12	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cast house</i>	10	39	120	12	67	200	1	26	29	28	79	113	0,3	3,3	4,4
Granul. escória	-	-	-	1	31	75	-	-	-	-	-	-	1	67	160
Total AF	20	71	202	33	228	575	21	99	379	82	985	1713	1,3	70	164

O volume de GAF produzido varia consideravelmente de 1200 a 2000 Nm³/t gusa (Infomil, 1997). IISI (1998) indica 6 plantas na faixa de 1464-1637 Nm³/t gusa (média de 1528 Nm³/t gusa) e poder calorífico inferior entre 2,6-3,3 MJ/ Nm³ (média de 3.1 MJ/Nm³), equivalente a média de 4737 MJ/t gusa. EIPPCB (1999) apresenta, para as 4 plantas europeias citadas anteriormente, uma faixa de 4400-5000 MJ/t gusa. Os parâmetros e os fatores de emissão estabelecidos para cada nível são mostrados na Tabela 25 e na Tabela 26, respectivamente.

Tabela 25 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para Altos-fornos

ALTOS-FORNOS	Nível de emissão atmosférica			
	Baixo	Médio	Alto	Extremo
Insumos por tonelada de gusa	Sínter – 1160 kg Pelotas – 390 kg Min.Fe. –150 kg Coque – 310 kg Carvão – 180 kg Calcáreo – 250 kg Cal - 10 kg Eletricidade – 35 kWh	Sínter – 1160 kg Pelotas – 390 kg Min.Fe. –150 kg Coque – 358 kg Carvão – 84 kg Calcáreo – 250 kg Cal - 10 kg Eletricidade – 35 kWh	Sínter – 1160 kg Pelotas – 390 kg Min.Fe. –150 kg Coque – 410 kg Calcáreo – 250 kg Cal - 10 kg Eletricidade – 35 kWh	Sínter – 1160 kg Pelotas – 390 kg Min.Fe. –150 kg Coque – 500 kg Calcáreo – 250 kg Cal - 10 kg Eletricidade – 35 kWh
Aspectos energéticos	Recuperação GAF PCI TTAF – 30 kWh/t gusa Pré-aquec. <i>Hot stoves</i>	Recuperação GAF PCI TTAF – 30 kWh/t gusa Pré-aquec. <i>Hot stoves</i>	Recuperação GAF Pré-aquec. <i>Hot stoves</i>	Recuperação GAF Pré-aquec. <i>Hot stoves</i>
CP/PP Hot stoves	Câmara de combustão externa	Câmara de combustão externa	Câmara de combustão externa	Câmara de combustão externa
CP/PP Zona de Carregamento	Despoeiramento com filtros	Despoeiramento com filtros ou <i>scrubbers</i>	Despoeiramento com <i>scrubbers</i>	Sem controle
CP/PP Preparação PCI	Despoeiramento com filtros	Despoeiramento com filtros	Sem PCI	Sem PCI
CP/PP Tratamento de GAF	Ciclones + <i>scrubbers</i>	Ciclones + <i>scrubbers</i>	Ciclones + <i>scrubbers</i>	Ciclones + <i>scrubbers</i>
CP/PP Cast House	Despoeiramento com filtros ou ESPs	Despoeiramento com filtros ou ESPs	Despoeiramento com <i>scrubbers</i>	Sem controle
CP/PP Processamento de escória	Granulação de escória Condensação de vapor	Granulação de escória	Granulação de escória	Sem processamento

Fonte: Elaboração própria a partir de EC (1996), Haskoning (1993), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

Tabela 26 – Fatores de emissão atmosféricas em altos-fornos para níveis selecionados.

Alto-forno		Nível de emissão atmosférica							
Fatores de emissão		BAIXO		MÉDIO		ALTO		EXTREMO	
		Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor
Material particulado	g/t gusa	10-56	20	50-150	71	150-360	202		720
SO ₂	g/t gusa	23-146	33	146-355	228	355-750	575		800
NO _x	g/t gusa	10-50	21	50-200	99	200-400	379		580
CO	g/t gusa	80-360	82	360-1100	985	1100-2800	1713		2700
H ₂ S	g/t gusa	1-15	1	15-90	70	90-200	164		320

Fonte: Elaboração própria a partir de EC (1996), Haskoning (1993), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

II.7 Aciaria a Oxigênio

Na aciaria existem duas rotas tecnológicas predominantes no mundo: o conversor a oxigênio (também denominado LD) e o forno elétrico a arco. O primeiro é utilizado em usinas integradas a carvão mineral ou vegetal e o segundo é mais usado em usinas semi-integradas, cujo processo começa na aciaria e utiliza sucata como carga metálica. Na aciaria a carga é oxidada, o que significa uma redução da concentração de carbono a níveis inferiores a 2%. Na operação de refino no conversor LD²⁸, gás oxigênio é soprado sobre o ferro gusa, oxidando o carbono até os níveis adequados e retirando impurezas indesejáveis como enxofre, silício e fósforo principalmente.

A tecnologia de metalurgia secundária (metalurgia de panela) com tratamento a vácuo permite a remoção de gases dissolvidos no aço líquido. Em geral, quanto maior a utilização da metalurgia da panela, maior o enobrecimento dos produtos. Isso porque a panela interliga a aciaria às máquinas de lingotamento, possibilitando um ajuste fino da temperatura e composição química do aço. A proporção dos processos de desgaseificação a vácuo e de equipamentos como os fornos-panela são bons indicadores do nível de utilização da metalurgia da panela.

As emissões primárias ocorrem durante o sopro (injeção) de oxigênio e na extração do GAC, enquanto as emissões secundárias são derivadas do pré-tratamento do gusa,

²⁸ No Brasil a aciaria a oxigênio é chamada de Conversor LD (Linz-Donawitz), enquanto em inglês é denominada *Basic Oxygen Furnace* (BOF).

carregamento, vazamento, retirada de escória e metalurgia secundária. Dois sistemas são adotados no conversor:

1. Combustão suprimida (interrompida) com recuperação de Gás de Aciaria (GAC); e
2. Combustão completa (aberta) com recuperação de calor

O primeiro sistema consiste na interrupção da combustão de CO no duto do gás através de uma cortina retrátil resfriada a água que é levada até a abertura do conversor. Deste modo o GAC pode ser recolhido para uso posterior. EIPPCB (1999) apresenta a composição média do GAC de 72,5% CO (faixa de 55-80%), 16,2% CO₂ (faixa de 10-18%), 8,0% N₂ + Ar (faixa de 8-26%) e 3,3% H₂ (faixa não citada), e o poder calorífico inferior de 9,6 MJ/Nm³ (faixa de 7,1 – 10,1 MJ/Nm³). O volume de gás fica na faixa de 50-100 Nm³/t aço líquido. No segundo sistema o gás do conversor é completamente, ou parcialmente, queimado em virtude da entrada de ar no duto, e assim o calor pode ser recuperado. Obviamente, o volume de gás é bem maior do que no primeiro sistema, entre 2000 e 3000 Nm³/t aço líquido.

EC (1996) reporta valores de 9 plantas, correspondendo a 88% do total de aço produzido em produzido nos conversores a oxigênio de 12 países da Europa. No geral, 7 plantas usam sistemas de combustão completa, 13 plantas usam sistemas de combustão suprimida (incompleta com recuperação de GAC para ser usado como combustível e 9 plantas utilizam combustão suprimida sem recuperação de GAC.

As emissões de particulados contêm principalmente óxidos de ferro, e em menor quantidade metais pesados e fluoretos. As escórias de aciaria são menos utilizadas do que as escórias de Alto-forno. Os pós e lama de aciaria são gerados durante a limpeza do gás de aciaria (LDG). O conteúdo de zinco no pó e lama de aciaria, crescente devido à maior reciclagem de aços galvanizados, afeta a sua reciclabilidade. Não há resíduos perigosos associados com a Aciaria BOF, no entanto os pós podem apresentar características de resíduos perigosos devido a elementos como chumbo e cromo.

Um parâmetro importante para os resultados estendidos à toda a cadeia de produção é o percentual de sucata utilizada nas aciarias a oxigênio. As quantidades adotadas dependem de uma série de fatores como disponibilidade de sucata de qualidade (com menor teor de impurezas), composição e temperatura do gusa, e está ligado ao tipo de metalurgia de panela

utilizado. UN (1993) caracteriza três grupos de indústrias siderúrgicas nacionais no que se refere à utilização de sucata em 1990. Um grupo que utiliza até 100 kg/t aço líq., outro, intermediário, utilizando entre 120 a 225 kg/t aço líq., e o terceiro com valores maiores, entre 267 e 386 kg/t aço líq. nos conversores LD. Tais valores estariam vinculados tanto à disponibilidade de sucata quanto aos tipos de aço produzidos, ou seja, para aços mais limpos, com menor teor de impurezas, um menor teor de sucata seria preferível. No Brasil, em 1997, duas plantas utilizaram menos que 50 kg/t aço líq. e três plantas entre 100 e 130 kg/t aço líq. (ABM, 1998).

IISI (1998) apresenta os seguintes valores médios, obtidos da Tabela 27: gusa – 976 kg/t aço líq.; sucata – 124 kg/t aço líq.; gusa frio – 19 kg/t aço líq.; minério de ferro – 21 kg/t aço líq.; oxigênio – 51 Nm³/t aço líquido. O volume produzido de GAC varia consideravelmente entre 70 a 101 Nm³/t aço líq. (média 84 Nm³/t aço líq.) com poder calorífico inferior médio de 8,5 MJ/ Nm³.

Tabela 27 – Insumos e produtos para 5 aciarias a oxigênio (IISI, 1998)

Aciaria O ₂	Unidade	1	2	3	4	5
Gusa	kg/t aço líq.	966	1157	n.d.	824	959
	% C	n.d.	4,5	n.d.	4,5	4,0
	% Si	0,4	0,3	n.d.	0,75	0,31
	Temperatura (°C)	1351	1500	n.d.	1354	1345
Sucata	kg/t aço líq.	114 (10%)	27 (2%)	n.d.	283 (26%)	72 (7%)
Gusa frio	kg/t aço líq.	34	3	2	-	38
Min. Ferro	kg/t aço líq.	15	21	25	-	24
Carga total	kg/t aço líq.	1099	1208	n.a.	1107	1093
Oxigênio	Nm ³ /t aço líq.	53	52	50	51	50
Elettricidade	kWh/t aço líq.	25	28	42	14	20
Outros ^a	MJ/t aço líq.	114	439	80	489	135
Combustão interrompida		sim	sim	n.d.	sim	sim
Produção de aço líquido	Mt/ano	5,215	7,024	n.d.	3,050	4,287
Produção de GAC	MJ/t aço líq.	666	844	730	517	798
Produção de vapor	MJ/t aço líq.	154	-	169	48	-
Energia líquida ^b	MJ/t aço líq.	322	301	264	68	527

Nota: a) Outros pode incluir coque, GCO, GN e ar comprimido; o balanço de energia é positivo para os parâmetros adotados, ou seja, há produção de energia na aciaria. Se não há recuperação de GAC nem de vapor o balanço é negativo.

De antemão podemos verificar a grande sensibilidade dos fatores de emissão da cadeia de produção com relação às cargas de gusa e sucata. Cada um destes insumos está associado a uma rota de produção envolvendo outras etapas. Neste primeiro momento os valores foram fixados para todos os níveis de emissão para isolar tais efeitos e por outro lado enfatizar as diferenças na presente etapa de aciaria a oxigênio. Para alguns poluentes há uma dependência da quantidade e qualidade da sucata empregada. Tais variações na razão gusa/sucata serão testadas no capítulo III. A Tabela 28 apresenta insumos e produtos energéticos de aciarias localizadas na Europa.

Tabela 28 – Insumos e produtos energéticos em 4 Aciarias a oxigênio na Europa^a (EIPPCB, 1999)

Insumos	Unidade	Quantidade
Minério de ferro	kg / tonelada de aço líquido	7-20
Gusa	kg / tonelada de aço líquido	820-980
Sucata	kg / tonelada de aço líquido	170-255
Coque	kg / tonelada de aço líquido	0,02 – 0,48
Cal	kg / tonelada de aço líquido	30-55
Dolomita	kg / tonelada de aço líquido	1,5 – 4,0
Fe-ligas	kg / tonelada de aço líquido	3-9
Gás natural	MJ / tonelada de aço líquido	20-55
Eletricidade^b	MJ/t aço líq. (kWh/t aço líq.)	101-304 (11-33)
Vapor	MJ / tonelada de aço líquido	30-140
Oxigênio	m ³ /tonelada de aço líquido	45-55
Ar comprimido	m ³ /tonelada de aço líquido	4-18
Água	m ³ /tonelada de aço líquido	0,4 – 5,0
Produtos		
GAC^c	MJ / tonelada de aço líquido	0 – 650-840
Vapor^d	MJ / tonelada de aço líquido	0 – 20-270

Nota: a) Os dados provêm de 4 plantas de 4 países europeus diferentes, consideradas líderes em proteção ambiental e produtividade; b) para o cálculo do conteúdo energético primário de eletricidade foi usado o fator de conversão térmico 1 kWh = 9,2 MJ; c) zero no caso de sistema de combustão completa; d) zero no caso de sistema com recuperação de GAC mas sem recuperação de calor, e valor mais alto para sistema de combustão parcial ou completa com recuperação de vapor.

Material particulado

- Emissões geradas no conversor LD

Plantas com sistemas de combustão completa ou parcial

Neste caso, o gás contém entre 15-20 kg de particulado/t aço líquido (EIPPCB, 1999). As concentrações reportadas por EC (1996) são de 10-200 mg/Nm³ para as plantas européias, das quais 5 com ESPs e 8 com scrubbers úmidos. EIPPCB (1999) indica uma faixa menor, de

25-100 mg/Nm³, e de 10-50 mg/Nm³, no caso da empresa Hoogovens na Holanda, ambos utilizando scrubbers úmidos para despoeiramento. Portanto, os fatores de emissão também variam bastante, entre 20-200 g/t aço líquido, mas a faixa de valores inferior parece ser mais representativa, entre 20-50 g/t aço líquido (EC, 1996).

Combustão interrompida sem recuperação do gás de escape

O gás é queimado e as concentrações de particulado variam entre 24-174 mg/ Nm³ nos 17 valores reportados em EC (1996), todos para instalações com *scrubbers* (maior parte com eficiências de remoção maiores que 99%). Os fatores de emissão ficam entre 15-185 g/t aço líq., sendo 3 conversores com 190 g/t aço líq., 1 com 140 g/t aço líq. e os restantes abaixo de 100 g/t aço líq. Os valores acima de 100 mg/Nm³ foram obtidos através de mensurações descontínuas, levando a um maior grau de incerteza. EIPPCB (1999) se refere a tais dados para estabelecer uma média de 74 g/t aço líq., enquanto Haskoning (1993) indica a faixa de 20-40 g/t aço líq. para *scrubbers*, confirmando a faixa de emissões inferior. Poderiam ser utilizados precipitadores eletrostáticos (ESP) para o despoeiramento, ao contrário dos filtros devido às condições de processo.

Combustão interrompida com recuperação do gás de escape

Concentrações reportadas da ordem de 20-40 mg/Nm³, para 33 conversores em 11 plantas, incluindo 1 filtro, 14 scrubbers e 8 ESPs, com fatores de emissão na faixa 1,5-16 g/t aço líq. (EC, 1996). EIPPCB (1999) se refere a tais dados para estabelecer uma média de 8 g/t aço líq. O material particulado residual no GAC é emitido na queima posterior em outra etapa de produção, no entanto tais valores são presumivelmente pequenos levando ainda em conta a limpeza adicional em tais etapas.

Entre as 29 plantas reportadas, 7 usam combustão completa, 9 combustão interrompida sem recuperação de gases e 13 combustão interrompida com recuperação de gases.

- Outras emissões (pré-tratamento do gusa e emissões secundárias)

1. Pré-tratamento do gusa (dessulfuração, separação da escória de dessulfuração e transferência do gusa):

Antes do abatimento, a quantidade específica de particulados apresenta uma faixa 130-1230 g/t aço líq. (EC, 1996). Depois do abatimento, aplicando sistemas eficientes de extração (*hood*) e subsequente despoeiramento (sistemas reportados incluem filtros, *scrubbers* e ESPs, os fatores de emissão ficam entre 2-9 g/t aço líq. em 7 plantas, para os casos reportados em que os sistemas de limpeza são exclusivos; em 9 plantas as emissões de várias outras etapas são abatidas em conjunto, dificultando uma análise mais detalhada; e em outras 9 plantas incorporam emissões somente das etapas de separação da escória e de transferência, sendo reportado valores antes do abatimento entre 230-450 g/t aço líq. e fatores de emissão na faixa 1-20 g/t aço líq. (EC, 1996). O resíduo sólido gerado, com alto teor de ferro pode ser reciclado em plantas de sinterização. A composição dos pós dependem fortemente do tipo de agente dessulfurante utilizado.

2. Carregamento, emissões secundárias durante sopro de oxigênio e vazamento de aço:

Em somente 9 plantas reportadas as emissões desta etapa são tratadas separadamente, mas apenas 5 valores são indicados, com o total antes do abatimento sendo de 110-1830 g/t aço líq., utilizando como sistemas de limpeza filtros, *scrubbers* ou ESP, com fatores de emissão entre 1-30 g/t aço líq. (máximo de 15 g/t aço líq. para filtros).

3. Metalurgia de panela (secundária):

Os valores reportados para quantidades específicas de particulados antes do abatimento estão na faixa de 80 a 275 g/t aço líq., resultando em fatores de emissão entre 1 e 7 g/t aço líq. para 24 instalações e 5 valores mais altos entre 15 e 40 g/t aço líquido.

Em resumo, os fatores reportados em EC (1996) para outras emissões estão na faixa de 5-80 g/t aço líq., na qual estão incluídas emissões do lingotamento. Para as unidades que fazem a coleta do material particulado em conjunto, os fatores de emissão, cerca de 40 g/t aço líq., são compatíveis com a alternativa de limpeza independente. Somando as emissões

primárias e secundárias, mostradas na Tabela 29, podemos obter o quadro geral de fatores de emissão para a etapa de Aciaria a oxigênio.

Considerando o nível Baixo no qual se aplica combustão interrompida com recuperação de GAC e extração e limpeza eficientes, uma faixa de 22-96 g/t aço líq. pode ser adotada ($2+20=22$ e $16+80=96$), com valor médio de 48 g/t aço líquido, incluindo emissões do conversor e outras.

O nível Médio, entendido como uma média dos fatores de emissão reportados na amostra européia, é mais difícil de estabelecer devido ao largo espectro de sistemas adotados e condições operacionais. Por isso adotamos para este nível os sistemas de combustão interrompida sem recuperação de gás, para o qual a faixa é de 35-265 g/t aço líquido ($15+20=35$ e $185+80=265$), com média de 120 g/t aço líquido. Uma outra maneira de definir o nível Médio seria considerar o universo das 29 plantas reportadas, de acordo com os percentuais dos sistemas de combustão citados anteriormente. A média ponderada é de ($8*43\% + 80*40\% + 50*17\%$) 44 g/t aço líq., e somando as outras emissões (faixa de 20-80 g/t aço líquido), a faixa se torna 64-124, com média 84 g/t aço líq. ($44+40$). Este valor é indicado como um valor superior da faixa de melhores alternativas disponíveis (EIPPCB, 1999). Como EC (1996) aponta que as plantas européias estão em geral nesta faixa, o cálculo parece ser razoável. Finalmente, UNEP e IISI (1997) apresenta o valor indicativo de 85 g/t aço líq. sem maiores explicações.

Considerando o nível Alto no qual se aplica combustão completa e extração e limpeza eficientes, uma faixa de 40-280 g/t aço líq. pode ser adotada ($20+20=40$ e $200+80=280$), com valor médio de 90 g/t aço líquido, incluindo emissões do conversor e outras.

Pode-se notar que as premissas e dados de bom funcionamento dos sistemas de limpeza levam a faixas e médias bem próximas umas das outras. Portanto, uma alternativa para a definição de níveis de emissão seria tomar médias ponderadas dos sistemas adotados tomando, por exemplo, os diferentes valores inferiores e superiores das faixas e não os diferentes sistemas em boas condições de operação. Isso seria recomendável para “espalhar” mais as faixas e estabeleceria diferenças entre sistemas bem e mal operados. No entanto, tal alternativa apresenta desvantagens quando se pretende avaliar fatores de emissão para outros poluentes, para os quais as diferenças são muito grandes de acordo com o sistema adotado,

como é o caso das emissões de CO, tratadas adiante. As faixas poderiam ser: Baixo 20-100, Médio 100-300 e Alto 300-500.

O nível de emissão Extremo leva em consideração o total de material particulado envolvido nas operações, isto é, somando a fração coletada e a emitida. EC (1996) apresenta uma ampla faixa de 6-30 kg/t aço líquido. As quantidades dependem do tipo de operação de sopro aplicada. Os valores abaixo de 10 kg/t aço líq. em sua maior parte se referem a sistema de sopro da base enquanto os valores superiores são para sistemas de combustão completa com sopro do topo. Os sistemas de sopros combinados ficam entre 10 e 15 kg/t aço líquido.

Tabela 29 – Fatores de emissão de particulados depois do abatimento para etapas e tipo de operações em aciarias a oxigênio

	Operação/fonte de emissão	Material particulado (g/t aço líq.)	
Emissões primárias do conversor e da panela	Combustão completa	13 valores reportados; faixa de 20-200	Valor médio - 50
	Combustão interrompida sem rec. GAC	17 valores reportados; faixa de 15-185	Valor médio - 80
	Combustão interrompida com rec. GAC	13 valores reportados; faixa de 1,5 - 16	Valor médio - 8
Outras emissões	Dessulfuração	Faixa de 2-9	
	Separação da escória e descarregamento do gusa	Faixa de 1-17	
	Carregamento, vazamento, separação da escória e secundárias do conversor e da panela	Faixa de 1-40	
	Lingotamento contínuo e outras	Faixa de 1-13	
	Total outras emissões	Faixa de 5-80	Valor médio - 40

SO₂

As emissões não são significativas e poucos dados estão disponíveis. EC (1996) apresenta um valor máximo reportado de 0,5 g/t aço líq. para combustão interrompida com recuperação de GAC. Para combustão interrompida sem recuperação de GAC, dois valores obtidos com mensuração contínua de 20 mg/ Nm³ são reportados, levando a um fator de emissão de 18 g/t aço líq., e 4 valores com mensurações descontínuas (de 1 a 10 vezes ao ano) em uma faixa de 2-20 g/t aço líq, que estão na mesma ordem de grandeza que as anteriores. Não há nenhuma informação para sistemas de combustão total. Portanto, definiu-se uma faixa ampla de 0,5-20 g/t aço líq., que deve ser encarada apenas como indicativa.

NO_x

EC (1996) reporta 4 valores em torno de 30 mg/ Nm³, correspondendo a fatores de emissão de 20-28 g/t aço líq. para combustão interrompida sem recuperação de gás, e 4 valores entre 14-23 mg/ Nm³, com fatores de emissão de 6-15 g/t aço líq. quando há recuperação dos gases. EIPPCB (1999) indica 5-20 g/t aço líq. como uma faixa de melhores tecnologias disponíveis. Energetics (2000) apresenta o valor 36 g/t aço líq. Não há nenhuma informação para sistemas de combustão total. Portanto, definiu-se uma faixa ampla de 5-36 g/t aço líq., que deve ser encarada apenas como indicativa.

CO

As emissões dependem do tipo de sistema utilizado. Usando combustão interrompida com recuperação de gases, o monóxido de carbono é recuperado para utilização como combustível em outras etapas de produção, pois o GAC tem um alto teor de CO (70-80%). Usando combustão completa, 7 valores são reportados EC (1996) a partir de mensurações contínuas, na faixa de 0,05 a 0,35% em volume, correspondendo a fatores de emissão de 1000 e 4000 g/t aço líquido.

PAH – Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Poucos valores reportados. EIPPCB (1999), baseado em dados provenientes de 2 plantas, apresenta a faixa 0,08-0,16 mg/t aço líq. Como PAH estão presentes no insumo de sucata, as emissões dependem desse fator, assim como dos dispositivos de limpeza.

PCDD/F

EIPPCB (1999) apresenta a faixa 0,001-0,06 µg I-TEQ/t aço líq. sem nenhuma citação de referência.

HCl e HF

Para as emissões de HCl e HF poucos dados estão disponíveis. Infomil (1997) apresenta fatores de emissão de 8-10 mg HF /t aço líq. e adverte que se *fluorspar* (CaF₂) for usado na etapa de dessulfuração do gusa, as emissões podem ser maiores. O volume produzido

de GAC varia consideravelmente entre 70 a 101 Nm³/t aço líq. (média 84 Nm³/t aço líq.) com poder calorífico inferior médio de 8,5 MJ/ Nm³ (IISI, 1998).

Os parâmetros e os fatores de emissão estabelecidos para cada nível são mostrados na Tabela 30 e na Tabela 31, respectivamente.

Tabela 30 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para Aciaria a oxigênio

ACIARIA A OXIGÊNIO	Nível de emissão atmosférica			
	Baixo	Médio	Alto	Extremo
Insumos por tonelada de aço líquido	Gusa – 976 kg Sucata – 124 kg Min. Fe. – 21 kg Cal – 45 kg Oxigênio – 51 Nm ³ , Eletricidade – 26 kWh	Gusa – 976 kg Sucata – 124 kg Min. Fe. – 21 kg Cal – 45 kg Oxigênio – 51 Nm ³ , Eletricidade – 26 kWh	Gusa – 976 kg Sucata – 124 kg Min. Fe. – 21 kg Cal – 45 kg Oxigênio – 51 Nm ³ , Eletricidade – 26 kWh	Gusa – 976 kg Sucata – 124 kg Min. Fe. – 21 kg Cal – 45 kg Oxigênio – 51 Nm ³ , Eletricidade – 26 kWh
Sistema de recuperação de energia^a	Combustão interrompida c/ produção de GAC e vapor	Combustão interrompida c/ produção de GAC	Combustão parcial ou completa com produção de vapor	Combustão parcial ou completa sem qualquer recuperação
CP/PP Pré-tratamento do gusa	Extração eficiente e despoeiramento com filtros ou ESP	Extração eficiente e despoeiramento com filtros ou ESP	Extração e despoeiramento menos eficientes com filtros ou ESP	Sem controle
CP/PP Conversor LD	Despoeiramento com <i>scrubbers</i> ou ESP	Despoeiramento com <i>scrubbers</i> ou ESP	Despoeiramento menos eficiente com <i>scrubbers</i> ou ESP	Sem controle
CP/PP Emissões secundárias	Despoeiramento com filtros ou ESP	Despoeiramento com filtros, <i>scrubbers</i> ou ESP	Despoeiramento menos eficiente com filtros, <i>scrubbers</i> ou ESP	Sem controle

Nota: GAC - 714 MJ/t aço líq. com média de 84 Nm³/t aço líq. e com poder calorífico inferior médio de 8,5 MJ/ Nm³ (IISI, 1998); e vapor - 270 MJ/t aço líq. (87 kg/t aço líq.) para combustão completa.

Fonte: Elaboração própria a partir de EC (1996), Haskoning (1993), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

Tabela 31 – Fatores de emissão atmosféricas em Aciarias a oxigênio para níveis selecionados.

Aciaria a oxigênio (Conversor LD)		Nível de emissão atmosférica							
		BAIXO		MÉDIO		ALTO		EXTREMO	
		Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor
Material particulado	g/t aço líq.	20-100	48	100-300	120	300-500	280	12000-28000	16000
SO ₂	g/t aço líq.	0,5-20	0,5	0,5-20	18	0,5-20	18	0,5-20	20
NO _x	g/t aço líq.	5-36	15	5-36	20	5-36	28	-	36
CO	g/t aço líq.		0		0	1000-4000	3000		6000
PAH	mg/t aço líq.		0,16		0,16		0,16		0,16
PCDD/F	µg I-TEQ/t aço líq.		0,06		0,06		0,06		0,06

Fonte: Elaboração própria a partir de EC (1996), Haskoning (1993), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

II.8 Aciaria Elétrica

Em geral, as plantas siderúrgicas com aciarias elétricas apresentam grande variedade entre si no que se refere às configurações e tamanho de forno, práticas operacionais, os produtos e os insumos materiais. Podemos citar as alternativas de fornos elétricos a arco de corrente contínua e corrente alternada, as diversas tecnologias como injeção de oxigênio, pós combustão ou pré-aquecimento de sucata, o produto aço que pode ser classificado em aço carbono e aço liga, havendo certas diferenças para os insumos e rejeitos de cada tipo, e finalmente as quantidades de sucata, ferro esponja e gusa que constituem a carga do forno. Tal diversidade dificulta a determinação de parâmetros para os níveis de emissão desejados. Mesmo assim, estabelecemos os parâmetros de acordo com critérios de predominância no setor como um todo e deixamos para o capítulo III o teste de variações destes parâmetros.

A carga metálica é introduzida no forno em bateladas (há também carregamento contínuo) e os eletrodos de carbono são ajustados para permitir a formação do arco elétrico e dar início à fusão. A energia elétrica pode ser suplementada com gás natural, óleo, carvão ou injeção de oxigênio. Após a fusão ser completada, a carga é oxidada para redução do teor de carbono e eliminação de impurezas. Depois de completada a oxidação, o aço líquido é vazado. Atualmente, a etapa de metalurgia secundária é realizada fora do forno elétrico a arco, nas chamadas painéis. A separação da metalurgia primária (carregamento, fusão, oxidação) da metalurgia secundária (refino) foi adotada em razão da crescente demanda por aços de maior qualidade e pela possibilidade de reduzir os tempos de corrida, aumentando a produtividade.

No que diz respeito ao uso de corrente elétrica, os fornos podem ser de dois tipos, de corrente alternada (CA) e de corrente contínua (CC). Os fornos CC, que têm sido cada vez mais utilizados, apresentam algumas vantagens com relação aos fornos CA. Nos fornos CC apenas um eletrodo é usado e a base da cuba serve como anodo, resultando em melhor distribuição do calor, o que permite reduzir o consumo elétrico e de eletrodos, reduzir o tempo de vazamento e aumentar a vida útil dos refratários. A tecnologia CC é aplicável a fornos de maior porte (80-130 toneladas) e os custos de capital são maiores. Outra alternativa é o uso de fornos com transformadores de alta potência (UHP – *Ultra High Power*).

As emissões da aciaria elétrica podem ser divididas em primárias e secundárias. As primárias são provenientes do forno elétrico durante a produção do aço, respondendo por cerca

de 95% das emissões. As emissões secundárias incluem outras fontes como pré-aquecimento de sucata, carregamento, vazamento, escape de pós e manuseio da escória.

O volume de gás de escape varia consideravelmente entre 6000 e 16000 Nm³/t aço líquido. EIPPCB (1999) adota 6000-8000 Nm³/t aço líquido. Quanto a energia elétrica, é importante destacar que os sistemas de limpeza de gases consomem aproximadamente 30 kWh/t aço líq. e o forno panela consome aproximadamente 35 kWh/t aço líq. (IISI, 1998). Quanto ao uso de oxigênio, podemos citar os seguintes valores: injeção de oxigênio de 20-30 Nm³/t aço líq., 10 Nm³/t aço líq. de oxigênio para pós-combustão e 12 Nm³/t aço líq. de oxigênio para queimadores.

É importante observar os prós e contras para algumas opções tecnológicas que reduzem o consumo de energia na aciaria elétrica: o pré-aquecimento de sucata pode aumentar as emissões de PCDD/F, PCB e PAH; a injeção de oxigênio resulta em um aumento da geração de gases e fumos; e a adição de carvão resulta em maiores emissões de benzeno. Tais *trade-offs* são importantes de serem assinalados porque as opções de eficiência elétrica citadas acima são consideradas no nível de emissão Baixo.

EIPPCB (1999) indica o consumo de 13-15 kg of carvão/t aço líq. como MTD. IISI (1998) apresenta valores para 20 plantas com consumo de carvão entre 6-25 kg/t aço líq. e média de 13,6 kg/t aço líq. Assumimos um consumo de carvão 10 kg/t aço líq. para o nível Baixo, 15 kg/t aço líq. para o nível Médio, 20 kg/t aço líq. para o nível Alto e 25 kg/t aço líq. para o nível Extremo.

Para o nível Baixo é razoável considerar uma planta eficiente, com baixo consumo de energia elétrica. Há uma série de tecnologias adotadas pelas plantas com forno elétrico (IISI, 1998, Worrell et al., 1998, EIPPCB, 1999): pré-aquecimento de sucata (processos *Shaft* or *Consteel*), queimadores de oxi-combustível, pós-combustão, controle automatizado, sistema de vazamento EBT. Em princípio, altas eficiências podem ser alcançadas com os diversos tipos de fornos – CA, CC, UHP CA, UHP CC, *Double Shell*.

Utilizando 100% de sucata, o consumo pode chegar a 1030-1080 kg/t aço líq. (EIPPCB, 1999). Com carga de 82/18%-sucata/DRI atinge 874/196 kg/t aço líq. em uma planta americana (Worrell et al., 1998) e com 34/66% sucata/DRI fica em 358-704 kg/t aço líq. em uma planta da base de dados de IISI (1998). O consumo de ferro-ligas é de cerca de 10

kWh/t aço líq. para aços carbono, e atinge a faixa de 146-165 kg/t aço líq. (IISI, 1998). O consumo de fluxos está na faixa 30-80 kg/t aço líquido.

Material particulado

Na geração dos gases primários grande quantidade de material particulado é carregado: para aços carbono e baixa liga uma faixa de 14-20 kg/t aço líq., para aços alta liga, 6-15 kg/t aço líq. Para o nível de emissão Extremo, consideramos 15 kg/t aço líq. Considerando a geração de gases na faixa de 6000/8000 Nm³/t aço líq., e se as concentrações de particulado nas emissões, incluindo as primárias e secundárias, depois do abatimento ficam em 10 mg/Nm³ e 50 mg/Nm³, levando a fatores de emissão de 60/80 g/t aço líq. e 300/400 g/t aço líq., respectivamente. Theobald (1995) *apud* EIPPCB (1999) apresenta 10 g/t aço líq., enquanto EPA (1995) apresenta 21.5 g/t aço líq. Para EC (1996) fatores de emissão média de 100, 110 e 124g/t aço líq. são indicadas para países europeus.

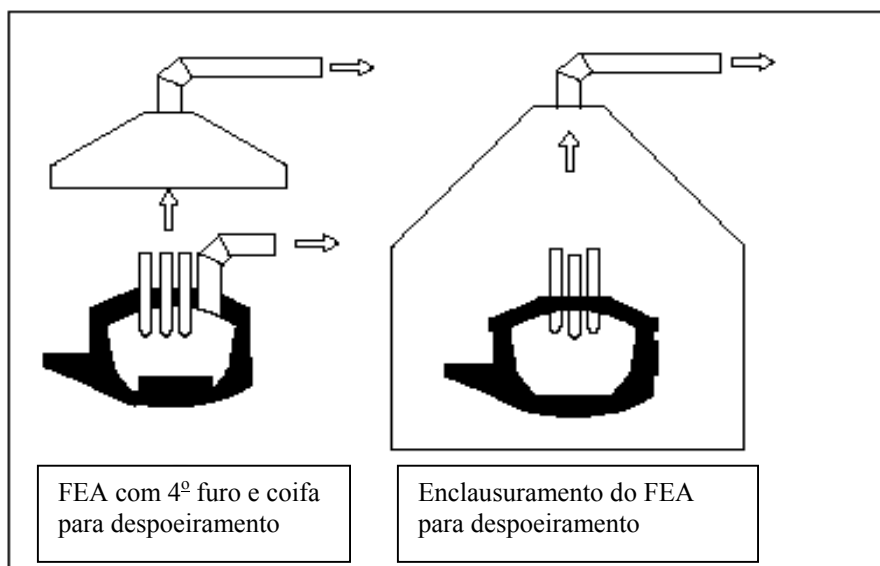


Figura 10 - Sistemas de despoeiramento da Aciaria Elétrica

Os pós removidos da aciaria elétrica são um dos problemas mais graves enfrentados pelas plantas semi-integradas. Os pós são considerados nos Estados Unidos (sob o código K061), Europa e Japão como resíduos perigosos pois contêm quantidades elevadas de zinco (de 10 a 35% em peso) e outros metais pesados. As concentrações desses metais depende da

qualidade da sucata utilizada. Os sistemas de despoeiramento de maior eficiência são mostrados na Figura 10 .

SO₂

O SO₂ não constitui uma emissão crítica para os fornos elétricos. São reportadas emissões de 5-10 mg/Nm³ para fornos sem injeção de carvão ou óleo combustível (EC EAF, 1994), levando a fatores de emissão de 30-60 g/t aço líq. para 6000 Nm³/t aço líq., ou 40-80 g/t aço líq. para 8000 Nm³/t aço líq. Para os fornos com injeção de carvão e/ou óleo, as concentrações são de 20-50 mg/Nm³ (EC EAF, 1994) com fatores de emissão 120-300 g/t aço líq. para 6000 Nm³/t aço líq., e 160-400 g/t aço líq. para 8000 Nm³/t aço líq. EC (1996) e valores entre 27-223 g/t aço líq. para 6 plantas na Europa (média de 89 g/t aço líq.). Energetics (2000) apresenta emissões de 318 g/t aço líquido.

NO_x

De modo geral, os dados para emissões são incompletos. EC (1996) apresenta uma média de 250 g/t aço líq. e 10 valores (48/90/167/185/223/250/260/334/711/990) bem dispersos. EIPPCB (1999) indica fatores de emissão de 120-240 g/t aço líq. como típicos de “melhores tecnologias disponíveis” baseados em 9 mensurações em uma planta na Alemanha (UBA- BSW, 1996). Dados para plantas EAF na Suécia indicam a faixa 22-680 g/t aço líq. (Lindblad, 1998). Energetics (2000) apresenta 45 g/t aço líq. para EAFs nos EUA. EIPPCB (1999) considera que as emissões de NO_x não exigem maiores preocupações.

CO

EC (1996) apresenta 9 valores (9/14/35/84/88/104/991/1211/1292). EIPPCB (1999) considera a faixa de 740-3900 baseado em 9 medidas de uma planta na Alemanha (UBA- BSW, 1996). ENERGETICS (2000) apresenta um valor extremo de 8172 g/t aço líq., sem maiores explicações. O uso de oxigênio e combustíveis nos fornos elétricos aumenta o poder calorífico (conteúdo de CO e H₂) do gás de escape. O CO é oxidado através da pós-combustão que por sua vez aumenta a eficiência energética da aciaria.

VOC

Poucos dados disponíveis, os que existem são apenas indicativos. EIPPCB (1999) apresenta 40 g/t aço líq. e faixa de 16-130 g/t aço líq. (Werner, 1997; Theobald, 1995). EC (1996) apresenta 3 mensurações descontínuas 1/21/69 g/t aço líq. sem comentários adicionais. Energetics (2000) apresenta 159 g/t aço líquido.

HCl

Poucos dados disponíveis. EC (1996) apresenta 3 valores (1 estimado, 1 de mensuração descontínua e 1 de mensuração contínua) 3,2/3,3/10,6 g/t aço líquido. EIPPCB (1999) apresenta a faixa 0,8-9,6 g/t aço líq. medida em uma planta na Alemanha (UBS-BSW, 1996).

HF

Poucos dados disponíveis. EC (1996) apresenta 9 valores (6 de mensurações descontínuas e 3 de mensurações contínuas) 0,03/0,14/0,42/1,06/1,32/2,09/3,9/5,3/9,3 g/t aço líquido. EIPPCB (1999) apresenta a faixa 0,7-4,0 g/t aço líq. medida em uma planta na Alemanha (UBS-BSW, 1996).

PAH – Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Poucos dados disponíveis. EIPPCB (1999), baseado em 9 mensurações apresenta a faixa 3,5-71,0 mg/t aço líq., com média de 35 mg/t aço líq. (Werner, 1997); Lindblad (1992) apresenta 13 mensurações realizadas em 7 plantas: 8/23/84/120/180/240/920 mg/t aço líquido. Os PAH são provenientes da sucata (Schiemann, 1995) mas também podem ser formados durante a operação do forno elétrico. A absorção de PAH por filtros de manga não pôde ser confirmado (Werner, 1997). O PAH emitido pode estar presente na forma de vapores ou de espécies adsorvidas na superfície de material particulado (IISI e UNEP, 1997)

PCB – Bifenilas policloradas

EIPPCB (1999) apresenta a faixa 1,5-45,0 mg/t aço líq. baseado em duas referências: UBS-BSW (1996) – 9 medidas entre 1,5-16,0 mg/t aço líq. (média de 7,8 mg/t aço líq.); e Werner (1997) – 9 medidas entre 2-45 mg/t aço líq. (média de 17 mg/t aço líq.).

As emissões de PCB são ambientalmente relevantes e variam consideravelmente (EIPPCB, 1999). A sucata normalmente é a maior fonte de emissões (Schiemann, 1995) e o pré-aquecimento de sucata pode aumentar as emissões de PCB. Werner (1997) mostrou que as emissões de PCB não se alteram mesmo com operação eficiente de filtros.

PCDD/F

EIPPCB (1999) apresenta a faixa 0,07-9,00 μg I-TEQ/t aço líq. baseado nas seguintes referências: Lindblad (1992) – dados de 8 plantas na Suécia entre 0,2-9,0 μg I-TEQ/t aço líq.; Theobald (1995) – dados de 4 plantas na Alemanha entre 0,7-1,8 μg I-TEQ/t aço líq.; LUA NRW (1997): 0,3-5,7 μg I-TEQ/t aço líq.; EC EAF (1997): dados de 1 planta na Dinamarca com média de 1,7 μg I-TEQ/t aço líquido. Não há informações confiáveis sobre a principal fonte das emissões de PCDD/F, se o insumo de sucata ou a *de novo* síntese. Com baixas temperaturas do gás de escape, menores que 75°C, as emissões ficam abaixo de 1 ng I-TEQ/Nm³ pois a volatilidade de PCDD/F é reduzida, permitindo assim que os PCDD/F sejam adsorvidos nas partículas retidas pelos filtros.

EIPPCB (1999) considera como MTD a minimização de compostos organoclorados através de pós-combustão apropriada (não a mesma que é destinada à recuperação de calor) no interior do sistema de dutos do gás de escape ou então em uma câmara de pós-combustão separada com rápido resfriamento para evitar a síntese *de novo* ou a injeção de pó de linhita nos dutos antes da entrada dos filtros. Estas alternativas podem atingir concentrações entre 0,1-0,5 ng I-TEQ/Nm³, o que significa fatores de emissão de 0,6-3,0 μg I-TEQ/t aço líq. para 6000 m³/t aço líq. ou 0,8-4,0 para 8000 m³/t aço líquido. Considerando tais dispositivos, a eficiência da remoção de PCDD/F pode atingir 98%. Com concentrações de 0,1-0,5 ng I-TEQ/Nm³, o gás de escape antes do abatimento pode apresentar concentrações de 5-25 ng I-TEQ/Nm³, e fatores de emissão de 30-150 μg I-TEQ/t aço líquido. Portanto, não é muito fácil estabelecer níveis de emissão confiáveis quando não se usam tais dispositivos.

Benzeno

EIPPCB (1999) apresenta a faixa 0,2-4,4 g/t aço líq. baseado em 9 mensurações de uma planta na Alemanha com média de 1,9 g/t aço líq. (UBA-BSW, 1996). De acordo com EIPPCB (1999), as emissões de benzeno dependem acentuadamente da carga de carvão.

Clorobenzeno

EIPPCB (1999) apresenta dados de Lindblad (1992): 20 mensurações (3-37 mg/t aço líq.) de 9 plantas com média de 22 mg/t aço líquido. Poucos detalhes disponíveis.

Os parâmetros e os fatores de emissão estabelecidos para cada nível são mostrados na Tabela 32 e na Tabela 33, respectivamente.

Tabela 32 - Parâmetros para os níveis selecionados de emissão para Aciaria elétrica

ACIARIA ELÉTRICA	Nível de emissão atmosférica			
	Baixo	Médio	Alto	Extremo
Insumos por tonelada de aço líquido	(a 100% de sucata) Sucata – 1050 kg Elet. – 310-410 kWh (350 kWh) Oxigênio – 30-42 Nm ³ Fe-ligas – 6 kg Cal – 45 kg Carvão – 13-15 kg GN – 4-10 Nm ³ (60% DRI e 40% sucata) Sucata – 440 kg DRI – 660 kg Elet. – 450-530 kWh (500 kWh) Oxigênio – 17-30 Nm ³	(a 100% sucata) Sucata – 1050 kg Elet. – 440-500 kWh (480 kWh) Oxigênio – 20-40 Nm ³ Fe-ligas – 6 kg Cal – 45 kg Carvão – 13-15 kg GN – 4-10 Nm ³ (60% DRI e 40% sucata) Sucata – 440 kg DRI – 660 kg Elet. – 570-680 kWh (620 kWh) Oxigênio – 17-30 Nm ³	(a 100% de sucata) Sucata – 1050 kg Elet. – 550-700 kWh (600 kWh) Oxigênio – 15-25 Nm ³ Fe-ligas – 6 kg Cal – 45 kg Carvão – 13-15 kg GN – 4-10 Nm ³ (60% DRI e 40% sucata) Sucata – 440 kg DRI – 660 kg Elet. – 600-730 kWh (730 kWh) Oxigênio – 17-30 Nm ³	(a 100% de sucata) Sucata – 1050 kg Elet. – 550-700 kWh (700 kWh) Oxigênio – 15-25 Nm ³ Fe-ligas – 6 kg Cal – 45 kg Carvão – 13-15 kg GN – 4-10 Nm ³ (60% DRI e 40% sucata) Sucata – 440 kg DRI – 660 kg Elet. – 600-730 kWh (800 kWh) Oxigênio – 17-30 Nm ³
Sistema de coleta de gases primários	4º furo AC (ou 2º furo DC) p/ extração direta + evacuação; 4º furo (ou 2º furo) p/ extração direta + <i>dog-house</i>	4º furo AC (ou 2º furo DC) p/ extração direta + evacuação; 4º furo (ou 2º furo) p/ extração direta + <i>dog-house</i>	4º furo AC (ou 2º furo DC) p/ extração direta	Extração precária
Sistema de limpeza de gases	Pós-combustão + injeção de linhita ou apagamento rápido + filtro	Extração eficiente e despoeiramento com filtros ou ESP	Extração e despoeiramento menos eficientes com filtros ou ESP	Sem controle
CP/PP Emissões secundárias	Despoeiramento com filtros ou ESP	Despoeiramento com filtros, <i>scrubbers</i> ou ESP	Despoeiramento menos eficiente com filtros, <i>scrubbers</i> ou ESP	Sem controle

Notas: a) Metalização do DRI de 94,5%; b) para aço alta-liga, carga de ferro-ligas na faixa de 140-165 kg; c) Pré-aquecimento de sucata; pós-combustão; injeção de oxigênio; d) eficiências elevadas podem ser obtidas com qualquer um destes tipos de fornos, CA, CC, UHP CA, UHP CC, *Double Shell*.

Fonte: Elaboração própria a partir de EC (1996), Haskoning (1993), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

Tabela 33 - Fatores de emissão atmosféricas em Aciarias Elétricas para níveis selecionados

Aciaria elétrica		Nível de emissão atmosférica							
Fatores de emissão		BAIXO		MÉDIO		ALTO		EXTREMO	
		Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor	Faixa	Valor
Material particulado	g/t aço líq.	10-80	10	100-200	124	300-700	400	14000-20000	15000
SO ₂	g/t aço líq.	27-120	50	100-223	120	300-400	300	300-400	400
NO _x	g/t aço líq.	22-120	120	100-223	250		334		680
CO	g/t aço líq.	9-104	104	991-1292	991	991-1292	1292		3900
VOC	g/t aço líq.		16		40		130		130
HCl	g/t aço líq.		3,2		3,2		10,6		10,6
HF	g/t aço líq.		0,7		4,0		9,3		9,3
PAH	mg/t aço líq.		8		120		240		920
PCB	mg/t aço líq.		7,8		17		45		45
PCDD/F	µg I-TEQ/t aço líq.	0,6-3,0	0,6	3-30	9	30-150	30	30-150	150
Benzeno	g/t aço líq.	0,2-4,4	0,2	0,2-4,4	1,9	0,2-4,4	4,4	0,2-4,4	4,4
Cloro-benzeno	mg/t aço líq.	3-37	3	3-37	22	3-37	37	3-37	37

Fonte: Elaboração própria a partir de EC (1996), Haskoning (1993), UNEP e IISI (1997), IISI (1998) e EIPPCB (1999).

II.9 Lingotamento e Laminação

No Lingotamento Convencional, o aço é vazado nas lingoteiras e ao ser resfriado toma a forma de lingotes que depois são levados para fornos de reaquecimento (fornos-poço) que os preparam para serem laminados. O Lingotamento Contínuo dispensa os fornos de reaquecimento, pois o aço sai da aciaria diretamente para uma primeira etapa de laminação. O rendimento placa/aço líquido é maior, proporcionando melhor qualidade do produto final e redução do consumo de energia (aproximadamente 70%). A introdução do Lingotamento Contínuo revelou-se um dos fatores mais importantes para a redução do consumo energético nas plantas siderúrgicas na última década. Hoje, aproximadamente dois terços da produção

mundial de aço envolve o Lingotamento Contínuo²⁹. As emissões atmosféricas, os efluentes líquidos e resíduos sólidos não são relevantes e não serão destacados.

A laminação do aço consiste em diversas etapas em série, que dão forma diferenciada aos produtos (chapas, bobinas, barras, perfis e fios). Geralmente a primeira etapa é a laminação a quente, na qual o aço é aquecido a uma temperatura inferior à temperatura de fusão. Como neste trabalho utilizaremos como produto referência “1 tonelada de aço líquido”, isto é, o produto da etapa de Aciaria, não entraremos em detalhes sobre os insumos e emissões atmosféricas da etapa de Laminação a Quente e seguintes. Na Tabela 34 são mostrados valores médios para a Europa que serão utilizados como complemento aos resultados finais do capítulo III para comparação com outras fontes.

Tabela 34 - Insumos e fatores de emissão da etapa de Laminação a Quente

	Insumos	Emissões atmosféricas
Insumos por tonelada de aço laminado	1018 kg de aço em lingotes 1GJ de combustíveis (gás natural, GCO, GAF, GAC); 1,1 GJ (119 kWh) de energia elétrica; 33 MJ de vapor; 2 MJ de oxigênio	65 g de material particulado 80 kg de CO ₂ 25 g de SO ₂ 250 g de NO _x

Fonte: EC (1996) e UNEP e IISI (1997)

II.10 Redução direta (ferro esponja)

A redução direta envolve a produção de ferro primário sólido a partir de minério de ferro e um agente redutor, por exemplo gás natural. O produto sólido é denominado ferro-esponja (em inglês, Direct Reduced Iron - DRI). Processos de redução direta foram introduzidos em escala industrial nos anos 50 e naquele tempo havia uma expectativa de aumento da produção de ferro esponja que viria substituir a produção de ferro-gusa, obtido através do uso de coque em altos-fornos. A previsão era de aproximadamente 100 Mt de ferro-esponja produzidas pelos anos 90, no entanto, como a economicidade do processo sempre dependeu de uma fonte barata e abundante de combustível redutor e, além disso, a demanda

²⁹ Seguindo a tendência de compactação dos processos siderúrgicos, o desenvolvimento tecnológico aponta para a junção das etapas de Lingotamento e Laminação, como por exemplo o Lingotamento de Tiras Finas. Ver AISI (1997) para um quadro das tendências tecnológicas na etapa de Lingotamento.

por ferro-esponja em plantas semi-integradas a forno elétrico tenha diminuído devido ao aumento de sucata disponível, a produção não cresceu tanto e atualmente está em cerca de 30 Mt (IISI e UNEP, 1997). Mesmo assim, a disponibilidade de sucata de boa qualidade ainda é um problema e o uso de ferro-esponja é crescente. Portanto, a rota de produção semi-integrada com carga de sucata e ferro-esponja, combinada com refino de panela a vácuo e laminação de tiras a frio tende a crescer em volume de produção.

Apesar de já conhecido, a redução direta foi comercialmente adotada nos anos 60. O processo Midrex responde por cerca de 65% da produção mundial com 40 plantas em operação (IISI, 1998). Por esta razão vamos considerá-lo como representativo dos processos de produção de ferro-esponja nesta dissertação. Outros processos de redução direta estão em operação e em desenvolvimento (Tabela 35).

O Midrex utiliza gás natural para reduzir pelotas e/ou minério de ferro em um forno de cuba. A magnetita (Fe_2O_3) é reduzida por um gás contendo H_2 e CO . Tal gás é produzido no reformador catalítico a partir da mistura de gás natural e o gás de escape do forno. A recuperação de calor é obtida aproveitando os gases de escape do reformador, que preaquecem o ar de combustão no reformador e a mistura de gases no forno de redução.

Na Tabela 35 são mostradas certas características de processos de redução direta e na Tabela 36 insumos em plantas de redução direta do processo Midrex.

Reações químicas no processo		
Redução:	Carburização:	Reforma:
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{H}_2 \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{H}_2\text{O}$	$3 \text{Fe} + 2 \text{CO} \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + 3 \text{CO}_2$	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \rightarrow 2 \text{CO} + 2 \text{H}_2$
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3 \text{CO} \rightarrow 2 \text{Fe} + 3 \text{CO}_2$	$3 \text{Fe} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{Fe}_3\text{C} + 2 \text{H}_2$	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$

Tabela 35 – Características de processos de redução direta (Infomil, 1997; IISI eUNEP, 1997)

Processo	Midrex	HyL III	Fior	Carbeto de ferro (Fe ₃ C)	Fastmet	SL/RN
Estatuto	Industrial	Industrial	Industrial	Industrial	Demonstração	Industrial
Tipo de reator	Cuba	Cuba	Leito fluidizado	Leito fluidizado	Rotativo	Rotativo
Fonte de ferro	Min. Ferro; pelota	Min. Ferro; pelota	Finos de min.; concentrados	Finos de min.; concentrados	Finos de min.; concentrados	Min. Ferro; pelota
Combustível	Gás natural	Gás natural	Gás natural	Gás natural	Gás natural; Carvão	Carvão
Capacidade típica (kt/ano)	1000	1000	400	320	450	50 e 200
Consumo energia líquida (GJ/t produto)	10,5	11,3	16,8	12,6	12,6	14,8
Produto	DRI/HBI	DRI	HBI	Fe ₃ C em pó	DRI/HBI	DRI
Metalização do produto (%)	> 92	> 92	> 92	> 90	> 92	n.d.
% C	1-2	1-2	0,5	< 6,0	< 0,2	n.d.

Notas: DRI – Direct Reduced Iron (ferro-esponja); HBI – Hot Briquetted Iron

Tabela 36 – Insumos em plantas de redução direta Midrex (Midrex, 1999)

Insumos	Unidade	Quantidade
Minério de ferro e/ou pelotas	kg / tonelada de ferro-esponja	1450
Gás Natural	MJ / tonelada de ferro-esponja	10.470
Eletricidade	MJ/t fe.esp. (kWh/t fe.esp.)	396 (110)
Água	m ³ / tonelada de ferro-esponja	1,5

Nota: Gás natural – 288 m³ / tonelada de ferro-esponja, para 36,3 MJ/Nm³

Não foram encontrados dados de emissões para plantas de redução direta, mas considera-se o impacto ambiental bem reduzido. As emissões de particulado são baixas e facilmente coletadas e a água pode ser recirculada em grande parte. Além disso, a utilização de gás natural leva a menores emissões de CO₂ que uma unidade que consome carvão (Infomil, 1997). No entanto, o ferro-esponja contém ganga na faixa de 3-6%, o que ocasiona maior consumo de energia elétrica nos fornos elétricos a arco.

II.11 Fusão redutora (COREX)

Os processos de fusão redutora envolvem a redução do minério de ferro sem a necessidade da etapa de coqueificação. O princípio básico está na redução, por carbono ou monóxido de carbono, dos óxidos de ferro em estado líquido, de maneira diversa à realizada no Alto-forno em que a redução ocorre no estado sólido. O que estimula a adoção de processos de fusão redutora é principalmente o menor custo de capital e o menor impacto

ambiental. Entre os processos de fusão redutora existentes, o COREX é o de uso comercial/industrial mais avançado.

O processo COREX consiste basicamente de um reator e de uma cuba (Figura 11), na qual o minério de ferro é pré-reduzido por um gás redutor produzido no reator, também utilizado para fusão e redução final da carga metálica para obtenção de metal líquido (cerca de 4,5% de carbono, 0,02% de enxofre e 0,5% de silício), com características similares ao ferro-gusa produzido nos Altos-fornos. No reator, a combustão do carvão com o oxigênio permite que temperaturas superiores a 1000 °C sejam atingidas, suficiente para a redução final do ferro-esponja e decomposição dos voláteis de carbono, resulta em um gás redutor (CO e H₂) que promove a redução final do ferro-esponja e é levado para a cuba de pré-redução. O processo garante a eliminação no reator de componentes indesejáveis como alcatrão e fenóis.

O gás redutor passa por resfriamento e despoeiramento (e reciclagem dos pós) antes de ser levado para a cuba, onde em contra-corrente ocorre a pré-redução a cerca de 800 °C. O gás é retirado pela parte superior e passa por um sistema de limpeza (*scrubbers*) para enfim ser utilizado como gás de exportação.

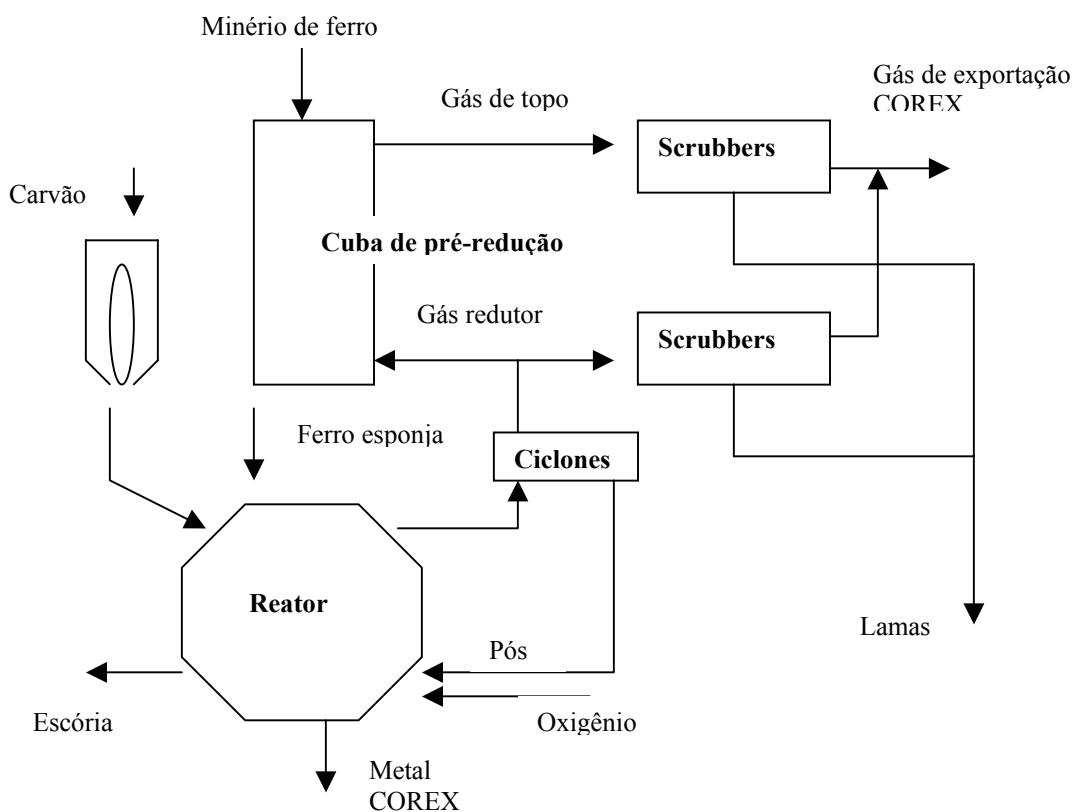


Figura 11 - Diagrama esquemático de uma planta de fusão redutora COREX

O gás de exportação COREX é formado por cerca de 45% de CO, 32% de CO₂, 16% de H₂, 2% de H₂O, 2% de CH₄ e 3% de N₂, e tem um poder calorífico inferior de aproximadamente 7,5 MJ/m³. O gás pode ser utilizado para uma série de aplicações, como geração de energia elétrica, combustível em plantas de redução direta, produção de gás de síntese (na fabricação de amônia e metanol) e aquecimento em outras etapas siderúrgicas.

O processo COREX permite a utilização de uma grande variedade de tipos de carvão não metalúrgicos, em comparação à faixa estreita de carvões coqueificáveis que a rota de produção integrada exige. As características do gás de exportação dependem do tipo (% de voláteis) e da quantidade de carvão utilizada, o que permite que a flexibilidade no uso do gás seja considerável.

Os insumos e emissões variam com o tipo de arranjo da planta. Utilizamos os dados de uma planta com capacidade de produção de 800 mil toneladas de metal COREX por ano.

Tabela 37 - Insumos e emissões para a produção de metal COREX (VAI, 1997)

	Insumos	Emissões e resíduos
Insumos por tonelada de metal COREX	444 kg de minério de ferro e 932 kg de pelotas; 990 kg de carvão; 325 kg de calcário e 10 kg de cal; 75 kWh de energia elétrica; 560 m ³ de oxigênio	130 g de material particulado 53 g de SO ₂ 114 g de NO _x 1450 Nm ³ de gás de exportação 1450 kg de CO ₂ 380 kg de escória 25 kg de pós e 62 kg de lamas 60 g de NH ₃ ; 0,04 g de fenóis; 0,01 g de sulfetos e 1 g de cianetos

Apesar das maiores quantidades de carvão e oxigênio utilizadas, o consumo de energia por tonelada de metal COREX é inferior ao das plantas integradas por tonelada de ferro-gusa em razão da produção de gás de exportação.

II.12 Sucata

A sucata de aço é utilizada em diferentes proporções na carga das aciarias. No caso das aciarias elétricas, a sucata pode atingir 100% da carga, enquanto nas aciarias a oxigênio pode

atingir cerca de 30%. Existem quatro tipos de sucata, tal como mostrado na (UN, 1993; UNCTAD, 1999; Andrade et al, 2000b):

- Sucata interna (*home scrap, circulating scrap*) – geração na própria planta siderúrgica³⁰, principalmente nas etapas de Lingotamento e de Laminação;
- Sucata industrial (*prompt scrap, industrial scrap*) – geração nas indústrias transformadoras de produtos siderúrgicos. Trata-se de sucata de alta qualidade (baixa quantidade de materiais contaminantes e composição química conhecida). Sua geração acompanha a produção siderúrgica, a coleta é contínua e previsível;
- Sucata de produtos (*obsolete scrap*) – geração a partir do fim da vida útil (ou por acidentes) de produtos contendo aço, como automóveis, eletrodomésticos, tanques de estocagem, silos etc.;
- Sucata de bens de capital (*capital scrap*) – geração a partir da demolição de unidades industriais e obsolescência de máquinas e equipamentos.

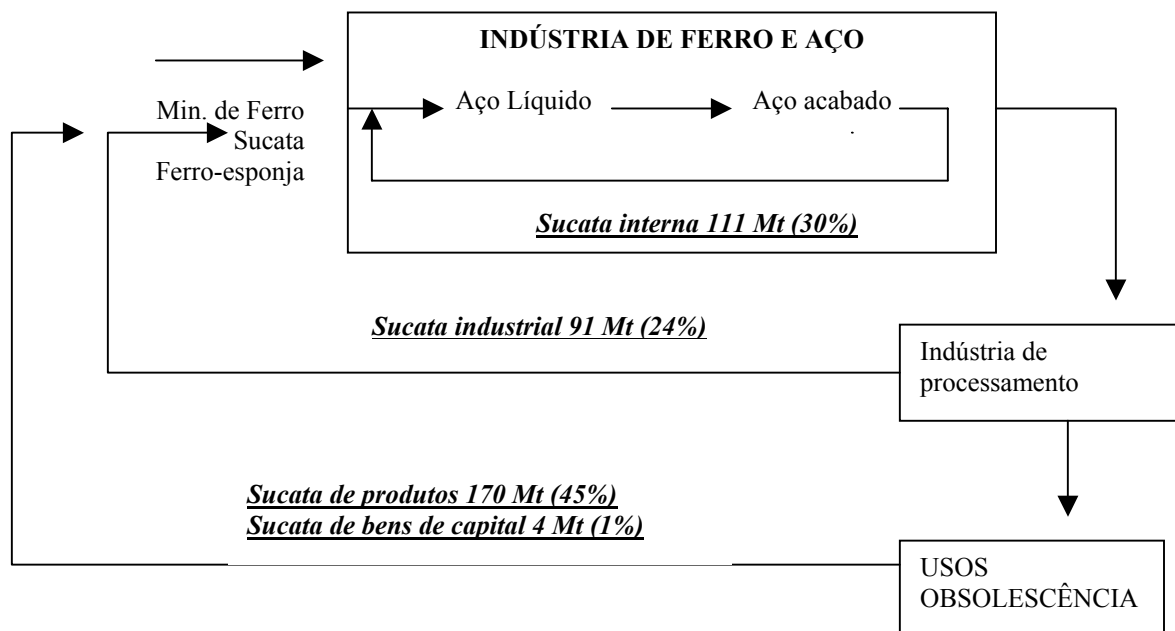


Figura 12 -Fluxos de sucata na indústria de ferro e aço (os números da produção mundial indicam a oferta e a participação de cada tipo de sucata, respectivamente, para o ano de 1998)

³⁰ A difusão da tecnologia de Lingotamento Contínuo em substituição ao Lingotamento Convencional reduziu a disponibilidade de sucata interna de 250-350 kg para cerca de 100 kg por tonelada de aço. Com a nova tecnologia de lingotamento de tiras finas a produção é reduzida ainda mais, para cerca de 3 kg por tonelada de aço.

Tabela 38 - Consumo mundial de sucata por unidade metalúrgica

(milhões de toneladas)	1998	2010 (estimativa)
Fundição de ferro	37	35
Fundição de aço	6	6
Alto-forno	2	3
Aciaria <i>Open Hearth</i>	16	0
Aciaria a Oxigênio	80 (21%)	70
Aciaria Elétrica	235 (63%)	346
Total	376	460

Fonte: UNCTAD (1999) e Andrade et al. (2000b)

A expectativa é de redução da geração de sucata interna, aumento modesto da sucata industrial e aumento significativo da sucata de obsolescência (UNCTAD, 1999). A Tabela 38 mostra que as aciarias elétricas vão continuar demandando a maior parte da sucata no mundo. Apesar da crescente utilização de ferro-esponja nos fornos elétricos, a estimativa é de aumento da participação da sucata nestes fornos de 63% para 75%. Um dos principais condicionantes para um consumo elevado de sucata em uma região ou país é a existência de uma rede bem organizada de coleta, além, é claro da presença de aciarias elétricas.

As emissões relacionadas à sucata seriam aquelas provenientes do transporte e da preparação para a carga nas plantas siderúrgicas. Utilizando a tecnologia de pré-aquecimento de sucata, que permitem a redução do consumo de energia elétrica nos fornos elétricos, ocorrem emissões de PCDD/F, que recentemente se tornaram mais um fator de preocupação para o controle de emissões em fornos elétricos (EIPPCB, 1999).

II.13 Outras etapas de produção

Os fatores de emissão de outras etapas de produção foram detalhados ao longo do estudo mas não serão apresentados tal como nas etapas das plantas siderúrgicas já citadas. Foram utilizados no Caso Base para todos os 4 níveis de emissão os fatores mostradas na Tabela 39.

Os dados para as etapas de mineração são extremamente esparsos. Além disso não é trivial estabelecer fatores de emissão médios e, na maior parte dos casos, as emissões fugitivas são significativas, comprometendo a acuidade de tais fatores. Mesmo assim, as referências utilizadas (EPA, 1995, Spath et al., 1999) permitiram certo conforto para o presente trabalho, na medida em que reúnem ampla base de informações e representam valores não apenas de uma ou outra planta, mas sim de um conjunto de unidades de produção.

Foram considerados as emissões sob controle de dispositivos de coleta e despoeiramento. Caso sejam adotados os fatores de emissão relativos a equipamentos de controle com menor eficiência (de 99% para 95%, por exemplo), as emissões equivalentes à produção de uma tonelada de aço líquido tem crescimento significativos. Mais ainda, se as emissões não forem abatidas por nenhum dispositivo de controle, os efeitos se tornam extremos e essas etapas passam a ser as principais emissoras por tonelada de aço líquido.

Tabela 39 - Fatores de emissão utilizados no Caso base (valores em gramas por unidade de produto)

		Calcáreo	Min. Fe	Carvão	Calcinação	Óleo Comb.	Gás Nat.	Eleticidade
	unidades	toneladas	toneladas	toneladas	toneladas	toneladas	m3	kWh
Particulado	gramas	300	150	1000	290	0	0	0,1
SOx	gramas	0	0	3	830	0	0	3,91
NOx	gramas	0	0	342	1000	1717	0,002	1,74
CO	gramas	0	0	231	5000	1667	0,0005	0,11
VOC	gramas	0	0	71	0	67	0,0003	0,013
CH4	gramas	0	0	3032	0	53	11	0,0041

Notas: a) Calcáreo - etapas de moagem e peneiragem controladas (EPA, 1998); b) Minério de ferro – emissões controladas (EPA, 1995); c) Mineração de carvão ponderadas pelo mix de unidades em minas e a céu aberto nos EUA (Spath et al., 1999); d) Planta de Calcinação – Emissões de particulados controladas variam entre 146-835 gramas por tonelada de cal (EPA, 1998); Geração elétrica – mix de plantas da rede nos EUA em 1996 (EIA 1998a; EIA, 1998b).

II.14 Efluentes Líquidos ³¹

As plantas siderúrgicas envolvem um grande volume de água, da ordem de 100-200 m³ por tonelada de aço (UNEP e IISI, 1997) que é utilizado para uma série de diferentes

³¹ A geração de efluentes líquidos não será tratada em profundidade neste trabalho. Apesar de extremamente importantes nos processos siderúrgicos, os efluentes líquidos serão considerados apenas para a contabilidade exergética, realizada no capítulo IV. É preciso destacar que em virtude da forte dependência das condições específicas de cada planta não se pode adotar a metodologia de fatores de emissão como realizado para as emissões atmosféricas. Os valores apresentados são apenas indicativos.

aplicações nas plantas, como resfriamento direto e indireto, sistemas de limpeza de gases (*scrubbers*) e outros usos variados no processo. O índice a ser destacado é o percentual de recirculação de água nas plantas, que pode atingir níveis superiores a 95%.

II.15 Resíduos Sólidos

A indústria siderúrgica além de intensiva em energia e materiais, rejeita um grande volume de resíduos sólidos. A palavra rejeito, no entanto, é transmutada para subproduto quando se refere à maior parte dos resíduos sólidos gerados. O exemplo mais evidente são as escórias de Alto-forno, utilizadas para uma série de aplicações em outras atividades econômicas: como aditivo na produção de cimento, na pavimentação de estradas, na regulação de solos para agricultura e na produção de materiais diversos de construção, cujo índice de aproveitamento é superior a 95%. Outras escórias também são recicladas mas com índices menores de aproveitamento interno e externo (Tabela 40).

Tabela 40 – Valores de geração e reciclagem de resíduos sólidos nas plantas siderúrgicas

Resíduos sólidos p/ países da Europa (EC, 1996)			
<u>Pós e lamas de Alto-forno</u> Reciclagem interna (para plantas de Sinterização) – 65% Reciclagem externa – 2% Aterros - 33%	Provenientes dos sistemas de despoeiramento com ciclones + <i>scrubbers</i> para tratamento do Gás de AF e filtros ou scrubbers p/ outras etapas. Presença de zinco e chumbo		
		Faixa (kg/gusa)	Valor (kg/t gusa)
	Pós	6-17	12
	Lamas	3-5	5
	Total	9-22	17
<u>Escória de Alto-forno</u> Reciclagem externa – 98% (26% p/ Planta de Cimento + 8% p/ Pavimentação + 64% Outros usos) Aterros - 2% (< 5% no mundo)	Referência	Faixa (kg/gusa)	Valor (kg/gusa)
	IISI (1998)	280-343	300
	EIPPCB (1999) e Szekely (1995)	210-310	250
<u>Escória de Aciaria a Oxigênio</u> Reciclagem interna – 28% Reciclagem externa – 46%	Origem da escória	Faixa (kg/t aço líq.)	Valor (kg/t aço líq.)
	Dessulfuração	3-20	10
	Forno a Oxigênio	100-130	115

Aterros - 26% (> 50% no mundo)	Metalurgia Secundária	2-16	7
	Total	105-166	132
Pós e lamas de Aciaria a Oxigênio	Provenientes dos sistemas de tratamento do Gás de Aciaria (secos ou úmidos) Partículas maiores são recicladas no BOF ou na Sinterização Partículas menores contêm zinco e chumbo, que dificultam reciclagem		
	Reciclagem interna	Reciclagem externa	Aterros
Pós - Seco (Filtros ou ESP) 4 kg/t aço líquido	55%	33%	12%
Lamas - Úmido (<i>scrubbers</i>) 17 kg/t aço líquido	51%	7%	42%
<u>Escória de Aciaria Elétrica</u>	Origem da escória	Faixa (kg/t aço líq.)	Valor (kg/t aço líq.)
Total Reciclagem interna – 5% Reciclagem externa 34% Aterros – 61%			
<u>Aço carbono</u> Reciclagem interna – 3% Reciclagem externa 28% Aterros – 69%	Forno Elétrico a Arco Metalurgia Secundária Total	100-150 10-30 110-180	129 20 109
<u>Aço alta liga</u> Reciclagem interna – 18% Reciclagem externa 48% Aterros – 34%	Forno Elétrico a Arco Metalurgia Secundária Total	100-135 30-40 130-175	120 35 161
Pós de Aciaria Elétrica	Reciclagem interna	Reciclagem externa	Aterros e Armazenagem
10-20 (15) kg/t aço líq. (IISI, 1998)	4%	27%	64% e 5%
Laminação a quente	Metálicos	Lamas	Óleos e graxas
kg por tonelada de aço laminado (IISI eUNEP, 1997)	1,8	3,0	1,7
Laminação a frio – <i>Pickling</i>, <i>annealing</i> e têmpera	<i>Pickle Liquor</i> (proveniente da aplicação de ácidos)	Lamas	Óleos e graxas
Acabamento			
kg por tonelada de aço (IISI eUNEP, 1997)	1,8	2,0	0,15

No próximo capítulo o perfil ambiental de cada etapa de produção, com ênfase nas emissões atmosféricas, é utilizado para a análise e comparação das diversas plantas e rotas de produção de aço, com base em uma metodologia de inventário de ciclo de vida.

Capítulo III

INVENTÁRIO DOS FLUXOS DE ENERGIA E MATERIAIS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE AÇO

O objetivo do Capítulo III é modelar os fluxos de energia e materiais para os diversos processos de produção de ferro e aço com o intuito de tecer comparações entre eles e realizar simulações dos efeitos da adoção de alternativas de redução das emissões atmosféricas abordadas no capítulo II.

São estabelecidas faixas de emissões atmosféricas para etapas de produção selecionadas e verificadas as emissões correspondentes para rotas de produção de aço. Foi desenvolvido um modelo simples baseado em álgebra matricial para simular as emissões de tais rotas de acordo com diversas opções de insumos e tecnologias de controle e prevenção de poluição.

Não é tarefa das mais fáceis estabelecer níveis e faixas de emissões de poluentes. Um trabalho criterioso precisa ser realizado para que comparações sejam feitas sobre a *performance* das plantas siderúrgicas a partir de dados de emissões, posto que as incertezas são inúmeras e variadas. Os dados de emissão reportados muitas vezes não podem ser explicados por diferenças nos dispositivos de abatimento de poluentes e na eficiência dos procedimentos operacionais adotados. Outros fatores como diferenças nos métodos de medição, idade e projeto das plantas, insumos materiais e energéticos, além de condições locais podem ter forte influência nos resultados (EC, 1996).

III.1 Escopo e premissas principais

O produto referência escolhido é a tonelada de aço líquido. As etapas de Lingotamento, Laminação e Acabamento foram excluídas nessa parte do trabalho para que a comparação entre processos de produção pudesse ser feita de modo adequado, sem interferências do tipo de produto a ser fabricado, se placas, tarugos, chapas e outros. A inclusão das emissões destas etapas está incluída no parte final do capítulo para verificar as emissões totais dos produtos,

embora não tenha sido dado um tratamento no mesmo nível de detalhe que as etapas anteriores.

Três processos de produção principais (Figura 13, Figura 14 e Figura 15) são considerados:

1. Integrado Convencional (Pelotização e Sinterização – Coqueria – Alto Forno – Aciaria a Oxigênio);
2. Semi-integrado (Aciaria Elétrica utilizando sucata e ferro-esponja); e
3. Integrado com Fusão Redutora (Pelotização – COREX – Aciaria a Oxigênio ou Elétrica)

A rota Integrada com Redução Direta COREX apresenta duas alternativas, com Aciaria a Oxigênio ou Elétrica. Desdobramos esta rota em duas alternativas e, sendo assim, o estudo se concentra em 4 rotas. Os diagramas esquemáticos de cada processo mostrado nas figuras citadas também definem, por intermédio da linha tracejada, as fronteiras do sistema “planta siderúrgica”. Nota-se de imediato que o Inventário de Ciclo de Vida aqui apresentado não inclui os energéticos e materiais utilizados nas etapas de transporte dos insumos, tampouco os materiais de que são feitas as plantas de produção (máquinas e equipamentos) e as edificações associadas de toda a cadeia de produção³². Como veremos adiante, uma série de materiais utilizados nos processos, mesmo nas plantas siderúrgicas, não foi considerada neste capítulo³³. Quanto aos poluentes, o foco é voltado para as emissões atmosféricas, embora excluindo os fatores de emissão de metais. São dois os motivos que nos levam a estas simplificações. O primeiro é a indisponibilidade de uma base de dados consistente e confiável; o segundo é a relativa importância de tais materiais na contabilidade total de emissões.

Um inventário de Ciclo de Vida mais completo deveria incluir as fases de uso e descarte dos produtos de aço, mas na presente dissertação o foco é voltado apenas para a produção de aço.

³² Em estudo de ciclo de vida para geração elétrica a carvão, Spath et al. (1999) mostram que as atividades de transporte são relevantes para as emissões de amônia, CO, VOCs e NOx, considerando transporte fluvial.

³³ Realizamos um ICV simplificada (denominada *abridged LCI*) que permite a seleção das etapas e dos insumos de produção mais importantes (van Berkel et al., 1997b).

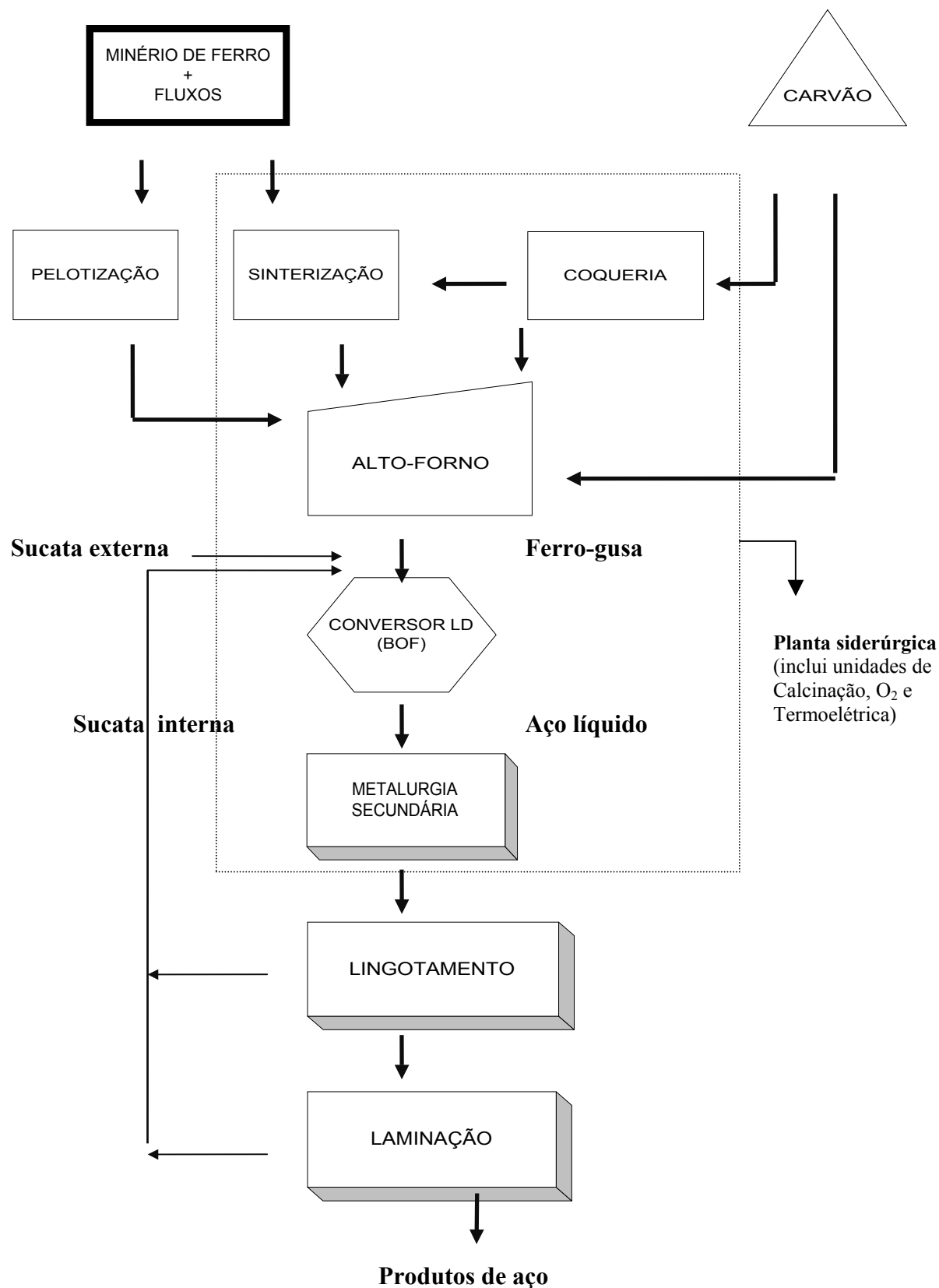


Figura 13 – Diagrama esquemático de uma planta integrada convencional (as etapas de Lingotamento e Laminação, não avaliadas, geralmente fazem parte das plantas siderúrgicas)

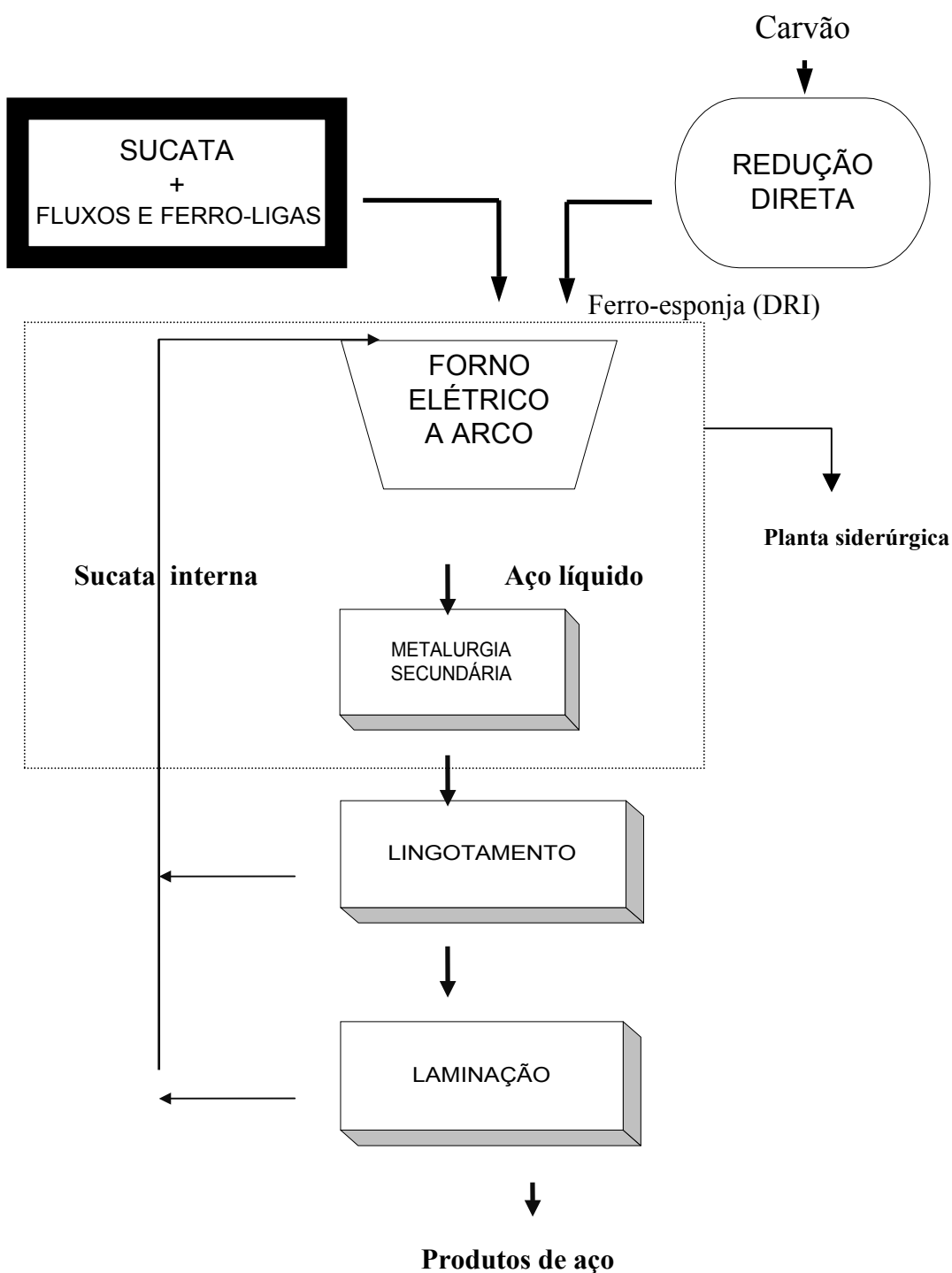


Figura 14 – Diagrama esquemático de uma planta semi-integrada (as etapas de Lingotamento e Laminação, não avaliadas neste trabalho, geralmente fazem parte das plantas siderúrgicas)

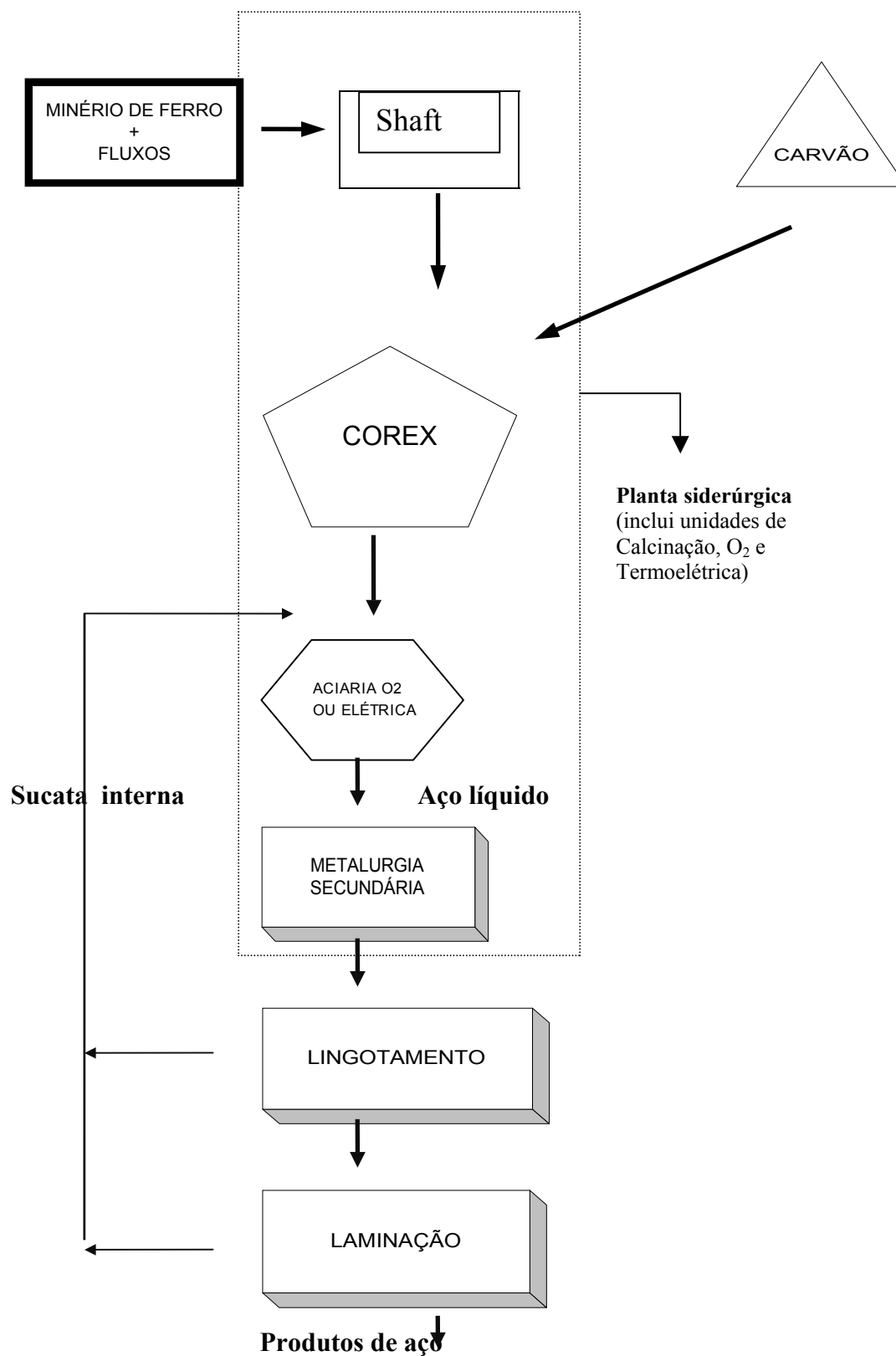


Figura 15 - Usina Integrada Com Fusão-Redutora (Corex) e Aciaria a Oxigênio ou Elétrica (as etapas de Lingotamento e Laminação, não avaliadas neste trabalho, geralmente fazem parte das plantas siderúrgicas)

III.2 Descrição do modelo

Qualquer modelagem dos sistemas de produção de aço tem de enfrentar a inerente complexidade dos processos envolvidos. Como o nosso maior objetivo é simular os efeitos das diferentes tecnologias e arranjos selecionados na emissão de poluentes atmosféricos, uma série de premissas e simplificações foram adotadas, como veremos a seguir. O modelo foi desenvolvido de forma simplificada, com técnicas de álgebra matricial, a partir da elaboração das técnicas de insumo-produto criadas por Leontief na abordagem de sistemas econômicos. Nas matrizes de Leontief as linhas e colunas representam setores econômicos, enquanto no presente trabalho representam etapas de produção de aço.

Os dados de entrada incluem o consumo de energia e materiais e emissões por unidade de produto de cada etapa, por exemplo, quilogramas de coque e gramas de óxidos de nitrogênio por unidade de ferro gusa. Os resultados do modelo estabelecem o total de emissões de cada poluente considerado por tonelada de aço produzido, considerando todas as etapas de produção.

Cada etapa de produção tem um produto principal que é utilizado em outra(s) etapa(s). Portanto, para um determinado sistema de produção de aço é possível definir uma matriz \mathbf{Z} de *commodities* que representam o consumo de produtos entre as etapas, na qual z_{ij} é o fluxo do insumo principal da etapa i (toneladas de coque, por exemplo) para a etapa j (Alto-forno). A partir de \mathbf{Z} e \mathbf{X}_j , isto é, o total produzido pela etapa j , neste caso toneladas de ferro-gusa, uma matriz \mathbf{A} de coeficientes técnicos a_{ij} pode ser obtida, na qual:

$$a_{ij} = z_{ij}/X_j \quad (1)$$

Deste modo, a_{ij} representa o montante de coque utilizado na produção de uma tonelada métrica (t) de ferro-gusa no Alto-forno³⁴. O vetor \mathbf{X} representa a soma dos efeitos diretos e indiretos da produção. A partir da abordagem de Leontief (Lave et al., 1995; Miller e Blair, 1985) e considerando \mathbf{Y} o vetor de demanda final, considerada a etapa de produção que utiliza aço líquido (o Lingotamento), obtém-se:

³⁴ Em geral, é mais comum encontrar nas bases de dados disponíveis os elementos da matriz \mathbf{A} do que os elementos da matriz \mathbf{Z} . Os a_{ij} foram obtidos diretamente, sem a necessidade de cálculos.

$$X - AX = Y \quad (2)$$

$$X = (I - A)^{-1} Y \quad (3)$$

onde I é a matriz identidade. Esta é a famosa expressão que inclui a inversa de Leontief. Para introduzir a emissão de poluentes é definida a matriz D na qual a emissão de cada poluente i é expressa por tonelada de cada produto principal das etapas j . Cada d_{ij} representa o fator de emissão de cada etapa. O vetor D^* representa o montante total emitido de cada poluente:

$$D^* = D X \quad (4)$$

$$D^* = D [(I - A)^{-1} \cdot Y] \quad (5)$$

É importante mencionar que são inúmeras as possibilidades de agregação de setores, que neste caso são as etapas de produção. Poderíamos subdividir as etapas consideradas em outras, por exemplo, os várias passos de produção do ferro-gusa em que as operações principais são realizadas no Alto-forno mas que dependem do carregamento de insumos materiais e energéticos, da coleta do subproduto Gás de Alto Forno (GAF), da retirada de escória e tratamento de poluentes. Ou então poderíamos considerar as etapas de Lingotamento, Laminação e Acabamento e ter como vetor de demanda final um determinado produto de aço que sai da planta siderúrgica. Para nossos propósitos de comparação com simulações das rotas de produção foi mais adequado fazer as simplificações descritas.

Outros tipos de modelos são necessários para uma descrição mais completa dos fluxos de energia e materiais dos processos, que possam incluir todos os subprodutos³⁵ e rejeitos de cada etapa, além de outras etapas de produção.

A Tabela 41, a Tabela 42, a Tabela 43 e a Tabela 44 representam os parâmetros adotados na matriz de insumos e produtos (matrizes de coeficientes técnicos $A_{n \times n}$) para a 4

³⁵ No capítulo IV, em que uma contabilidade exergética é realizada utilizando a mesma metodologia, consideramos o fluxo de subprodutos, efluentes líquidos, rejeitos sólidos e emissões de CO₂.

rotas estudadas de acordo com o nível de emissões Médio estabelecidos no capítulo II³⁶. As linhas representam a produção das etapas e as colunas representam o consumo das mesmas etapas na matriz quadrada 13x13. Portanto, cada célula a_{ij} representa a quantidade do produto i (linhas) utilizadas para produzir uma unidade do principal produto da etapa j (colunas). Por exemplo, a_{ij} pode representar a quantidade em massa de coque (0,358 toneladas) usada para produzir uma unidade (1 tonelada) de ferro gusa no alto-forno, ou representar a energia elétrica (0,5 kWh) utilizada para produzir 1 Nm³ de gás oxigênio (ver Tabela 41). Subprodutos e outros insumos, tais como ferro-ligas, dolomita, nitrogênio, refratários, ar comprimido, vapor, gases combustíveis, materiais reciclados, eletrodos de grafite e água, são incluídos apenas no capítulo IV, na contabilidade exergética de cada etapa de produção com o objetivo de calcular as perdas e eficiências exergéticas.

Tabela 41 – Matrizes **A** com os principais fluxos de energia e materiais da rota de produção integrada convencional para o nível Médio

Rota Integrada Convencional		ETAPAS DE PRODUÇÃO (CONSUMO)													
		Calcáreo	Cal	Min. Fe	Óleo	GN	Elettricidade	O ₂	Pelotiz.	Sinter	Carvão	Coque	Sucata	Ferro-gusa	Aciaria O ₂
PRODUTOS		t	t	t	t	m ³	kWh	m ³	t	t	t	t	t	t	t
t/unidade	Calcáreo	0	1,6	0	0	0	0,000057	0	0,03	0,15	0	0	0	0,15	0
t/unidade	Cal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,055
t/unidade	Min. Fe	0	0	0	0	0	0	0	1,025	0,95	0	0	0	0,15	0,021
t/unidade	Óleo	0,051	0,016	0,003	0	0	0	0	0,003	0	0,008	0	0	0	0
m ³ /unid.	Gás natural	0	68	0	0	0	0,0252	0	0	0	0	0	0	30	5
kWh/unid.	Elettricidade	15	20	27	0	0	0	0,5	40	31	10	30	0	85	26
Nm ³ /unid.	Oxigênio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	52
t/unidade	Pelotas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,39	0
t/unidade	Sinter	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,16	0
t/unidade	Carvão	0	0,07	0	0	0	0,00026	0	0,01	0	0	1,25	0	0,084	0
t/unidade	Coque	0	0	0	0	0	0	0	0	0,052	0	0	0	0,358	0
t/unidade	Sucata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,124
t/unidade	Ferro-gusa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,976
t/unidade	Aço Ac.O ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: Valores válidos para eletricidade consumida em etapas de produção a montante. Eletricidade e vapor são gerados nas plantas siderúrgicas com eficiência de 36%. Assumiu-se que a auto-produção de eletricidade é de 50%. O restante da eletricidade é obtida da rede, com geração a partir de termelétricas a carvão e gás natural, hidroelétricas e plantas nucleares com eficiência global de 40%.

³⁶ Uma série de referências da literatura do setor foi utilizada no capítulo II para a obtenção da base de dados, dentre as mais importantes (AIS, 1997; EC, 1996; EICCPB, 1999; IISI e UNEP, 1997; MIDREX, 1998).

Tabela 42 – Matrizes **A** com os principais fluxos de energia e materiais da rota de produção semi-integrada para o nível Médio

Rota Semi-integrada		ETAPAS DE PRODUÇÃO (CONSUMO)											
		Calcáreo	Cal	Min. Fe	Óleo	NG	Elettricidade	O2	Pelotiz.	Red. Dir.	Carvão	Sucata	Aço FEA
PRODUTOS		t	t	t	t	m3	kWh	m3	t	t	t	t	t
t/unidade	Calcáreo	0	1,600	0	0	0	0,000057	0	0,030	0	0	0	0
t/unidade	Cal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,067
t/unidade	Min. Fe	0	0	0	0	0	0	0	1,025	0	0	0	0
t/unidade	Óleo	0,051	0,007	0,003	0	0	0	0	0,003	0	0,008	0	0
m3/unid.	Gás natural	0	68	0	0	0	0,0252	0	0	300	0	0	10
kWh/unid.	Elettricidade	15	20	27	0	0	0	0,5	40	105	10	0	500
Nm3/unid.	Oxigênio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
t/unidade	Pelotas	0	0	0	0	0	0	0	0	1,418	0	0	0
t/unidade	Fe-esponja	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,196
t/unidade	Carvão	0	0,025	0	0	0	0,00026	0	0,010	0	0	0	0,015
t/unidade	Sucata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,874
t/unidade	Aço FEA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: 100% da eletricidade é obtida da rede, com geração a partir de termelétricas a carvão e gás natural, hidroelétricas e plantas nucleares com eficiência global de 40%.

Tabela 43 – Matrizes **A** com os principais fluxos de energia e materiais da rota de produção integrada com fusão redutora (COREX-Aciaria a oxigênio) para o nível Médio

Rota integrada c/ fusão redutora (COREX-Conv. O2)							ETAPAS DE PRODUÇÃO (CONSUMO)						
		Calcáreo	Cal	Min. Fe	Óleo	GN	Elettricidade	O2	Pelotiz.	Carvão	Sucata	COREX	Conv. O2
PRODUTOS		t	t	t	t	m3	kWh	m3	t	t	t	t	t
t/unidade	Calcáreo	0	1,600	0	0	0	0,000057	0	0,03	0	0	0,325	0
t/unidade	Cal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,055
t/unidade	Min. Fe	0	0	0	0	0	0	0	1,025	0	0	0,444	0,021
t/unidade	Óleo	0,051	0,016	0,003	0	0	0	0	0,003	0,008	0	0	0
m3/unid.	GN	0	68	0	0	0	0,0252	0	0	0	0	0	5
kWh/unid.	Elettricidade	15	20	27	0	0	0	0,5	40	10	0	75	20
Nm3/unid.	O2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	560	50
t/unidade	Pelotas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,932	0
t/unidade	Carvão	0	0,070	0	0	0	0,00026	0	0,010	0	0	0,990	0
t/unidade	Sucata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,380
t/unidade	Metal COREX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,720
t/unidade	Aço Ac.O2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: A eletricidade das etapas a montante é obtida da rede, com geração a partir de termelétricas a carvão e gás natural, hidroelétricas e plantas nucleares com eficiência global de 40%. Nas plantas siderúrgicas, eletricidade é 100% auto-gerada usando gás de exportação COREX em uma planta de ciclo combinado com eficiência de 48%.

Tabela 44 – Matrizes **A** com os principais fluxos de energia e materiais da rota de produção integrada com fusão redutora (COREX-Aciaria a oxigênio) para o nível Médio

Rota integrada c/ fusão redutora (COREX-FEA)							ETAPAS DE PRODUÇÃO (CONSUMO)							
		Calcáreo	Cal	Min. Fe	Óleo	GN	Elettricidade	O2	Pelotiz.	Carvão	Red. Dir.	Sucata	COREX	FEA
PRODUTOS		t	t	t	t	m3	kWh	m3	t	t	t	t	t	t
t/unidade	Calcáreo	0	1,6	0	0	0	0,000057	0	0,03	0	0	0	0,325	0
t/unidade	Cal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0,067
t/unidade	Min. Fe	0	0	0	0	0	0	0	1,025	0	0	0	0,444	0
t/unidade	Óleo	0,051	0,007	0,003	0	0	0	0	0,003	0,008	0	0	0	0
m3/unid.	GN	0	68	0	0	0	0,0252	0	0	0	300	0	0	10
kWh/unid.	Elettricidade	15	20	27	0	0	0	0,5	40	10	105	0	75	300
Nm3/unid.	O2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	560	40
t/unidade	Pelotas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,418	0	0,932	0
t/unidade	Carvão	0	0	0	0	0	0,00026	0	0,01	0	0	0	0,99	0
t/unidade	Fe-esponja	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,350
t/unidade	Sucata	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,165
t/unidade	Metal COREX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,583
t/unidade	Aço FEA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nota: A eletricidade das etapas a montante é obtida da rede, com geração a partir de termelétricas a carvão e gás natural, hidroelétricas e plantas nucleares com eficiência global de 40%. Nas plantas siderúrgicas, eletricidade é 100% auto-gerada usando gás de exportação COREX em uma planta de ciclo combinado com eficiência de 48%.

Seguindo as Equações 3 e 4, verificamos que a matriz X_{nx1} , obtida multiplicando a matriz inversa $(I - A)^{-1}_{nxn}$ pela matriz de demanda final Y_{nx1} (tonelada[s] de aço líquido), representa o total utilizado de cada um dos produtos. Ao multiplicar a matriz D_{mxn} (emissão de **m** poluentes de cada etapa **n**) por X , obtém-se D^*_{mx1} , que expressa o total de emissões de cada poluente para uma determinada quantidade de aço (Equação 5).

INVERSA $(I - A)^{-1}$		Y		X		D		X		D*
Matriz (n x n)	x	0	=	X ₁	$\Rightarrow \Rightarrow \Rightarrow$	Matriz (m x n)	x	X ₁	=	D ₁
		0								
		:								
		:								
		:								
		:								
		:								
		:								
		0								
		0								
		1		X _n				X _n		D _n

III.3 Caso Base

Os dados de entrada (constituintes das matrizes **A** e **D**) para o cálculo das emissões atmosféricas totais foram mostrados ao longo do capítulo II para cada um dos níveis estipulados. Para o Caso Base o total dos produtos por tonelada de aço líquido (matrizes **X**) de cada processo estão mostrados na Tabela 45. Para os processos integrados de fusão redutora COREX, não foram estabelecidos quantidades de insumos diferenciados de acordo com o nível de emissão, tal como realizado para os processos integrado convencional e semi-integrado.

Tabela 45 – Total de produtos por tonelada de aço líquido das rotas de produção por processo

		Integrada			Semi-integrada			COREX-BOF	COREX-EAF
Produto/t aço líq.		Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto	B-M-A	B-M-A
Calcáreo	toneladas	0,424	0,427	0,432	0,096	0,103	0,110	0,364	0,355
Cal	toneladas	0,055	0,055	0,055	0,045	0,045	0,045	0,062	0,073
Min. Ferro	toneladas	1,633	1,633	1,633	0	0	0	1,028	1,327
Óleo Comb.	toneladas	0,034	0,034	0,035	0,006	0,007	0,007	0,031	0,031
Gás natural	m3	40	42	44	24	27	30	11	124
Eletricidade	kWh	83	145	220	429	554	672	66	123
Oxigênio	Nm3	85	85	85	30	20	15	453	366
Pelotas	toneladas	0,381	0,381	0,381	0	0	0	0,671	1,042
Sínter	toneladas	1,132	1,132	1,132	0	0	0	0	0
Carvão	toneladas	0,645	0,637	0,770	0,128	0,160	0,191	0,740	0,618
Coque	toneladas	0,352	0,408	0,564	0	0	0	0	0
Sucata	toneladas	0,124	0,124	0,124	1,050	1,050	1,050	0,380	0,165
Ferro-gusa	toneladas	0,976	0,976	0,976	0	0	0	0	0
DRI	toneladas	0	0	0	0	0	0	0,000	0,352
Metal COREX	toneladas	0	0	0	0	0	0	0,720	0,583
Aço Líquido	toneladas	1	1	1	1	1	1	1	1

Nota: o Caso Base ainda considera uma outra opção de carga metálica em fornos elétricos com 196 kg de DRI e 976 kg de sucata por tonelada de aço líquido.

Para uma primeira visão geral, a Tabela 46 mostra, para o nível Médio, os valores totais de emissão de cada um dos 4 processos estudados, tanto para a rota de produção quanto para a planta siderúrgica considerada isoladamente. As etapas constituintes de cada rota foram apresentadas nas tabelas anteriores. Algumas considerações são importantes para uma melhor avaliação e compreensão dos resultados:

1. Os valores totais apresentados se baseiam em dados de entrada que, apesar de detalhadamente analisados e determinados de acordo com as premissas do capítulo II,

estão melhor situados em faixas para cada um dos 4 níveis estabelecidos. Sendo assim, importa não tanto os valores absolutos mas sim os valores relativos de cada processo, em que pese a noção de caso base e as simulações que se seguem;

2. O processo Integrado com Aciaria a Oxigênio foi amplamente difundido a partir dos anos 50, o Semi-integrado somente a partir dos anos 80 e o Integrado com Fusão Redutora COREX só foi adotado comercialmente nos anos 90, sendo ainda pequeno o número de plantas em operação. Portanto há uma diferença no tempo com relação à difusão dos processos que influencia a escolha de nossas premissas. Por exemplo, apesar de permitir considerável flexibilidade na estrutura das plantas, o processo COREX ainda não apresenta uma grande variedade, as plantas são mais novas e, sendo assim, refletem avanços tecnológicos de produtividade, eficiência e desempenho ambiental mais recente;
3. Os fatores de emissão de poluentes ainda pouco estudados e mensurados como PCB, PAH e PCDD/F não têm a mesma representatividade que outros, a exemplo dos particulados ou SO₂. Sendo assim, os fatores de emissão de fornos elétricos na rota COREX devem ser tomados apenas como indicativos (v. capítulo II).

Tabela 46 – Emissões totais para as rotas de produção e plantas siderúrgicas de processos de produção de aço (nível Médio)

<i>Nível Médio</i>		Integrada		Semi-integrada		COREX-BOF		COREX-EAF	
		Rota Prod.	Planta Sid.	Rota Prod.	Planta Sid.	Rota Prod.	Planta Sid.	Rota Prod.	Planta Sid.
Mat. Part.	g/t aço líq.	2069	911	384	124	1476	232	1521	221
SO₂	g/t aço líq.	2171	1507	2324	120	536	108	956	211
NO_x	g/t aço líq.	1640	921	1326	250	920	164	1389	389
CO	g/t aço líq.	24232	23834	1325	991	856	311	2052	1355
VOC	g/t aço líq.	164	100	59	40	82	0	129	40
H₂S	g/t aço líq.	101	101	0	0	0	0	0	0
HCl	g/t aço líq.	79	61	3	3	32	0	53	3
HF	g/t aço líq.	26	11	4	4	26	0	45	4
PAH	mg/t aço líq.	736	736	120	120	0	0	n.d.	n.d.
PCB	mg/t aço líq.	7	7	17	17	0	0	n.d.	n.d.
PCDD/F	μg/t aço líq.	11	11	9	9	0	0	n.d.	n.d.
Benzeno	g/t aço líq.	8	8	2	2	0	0	n.d.	n.d.
NH₃	g/t aço líq.	2	2	0	0	0	0	n.d.	n.d.
CH₄	g/t aço líq.	2419	27	497	0	2283	0	1914	0

Nota: Plantas Siderúrgicas: (1) Integrada – Calcinação, Sinterização, Coqueria, Alto-Forno, Aciaria a Oxigênio e Planta Termoeletrica e Planta de Oxigênio; (2) Semi-integrada – Aciaria Elétrica; (3) Calcinação, COREX, Aciaria a Oxigênio ou Elétrica, Planta Termoeletrica e Planta de Oxigênio.

De forma geral, o processo integrado apresenta os maiores valores de emissões, enquanto o processo Semi-integrado apresenta os menores, tanto para a rota de produção quanto para as plantas siderúrgicas. No entanto, algumas exceções surgem diante das comparações. Embora ainda pouco estudadas, as emissões de PCB das Semi-integradas pode ser bastante significativa devido aos contaminantes da carga de sucata nos fornos elétricos. Fica evidente para o caso das emissões elevadas de SO_2 e NO_x que os resultados para a rota Semi-integrada são muito sensíveis aos fatores de emissões das plantas termoelétricas, posto que 100% da eletricidade é obtida da rede e que no Caso Base foi estipulada uma geração elétrica a carvão de cerca de 50%.

Para as rotas e plantas integradas com fusão redutora COREX, as emissões são similares e são afetadas basicamente pela distribuição de cargas metálicas nas Aciarias (metal COREX, DRI e sucata). Fica patente que o maior percentual de emissões tem como fonte as etapas a montante, ou seja, há uma grande diferença entre os valores das plantas siderúrgicas e das rotas de produção. As emissões de metano (CH_4) nas rotas são bastante elevadas devido ao uso intensivo de carvão, cuja mineração é reconhecidamente uma grande fonte de emissões deste poluente. De modo geral, as plantas siderúrgicas COREX apresentam valores totais de emissão bastante reduzidos, próximos aos das plantas semi-integradas.

Para as plantas Integradas as emissões são reconhecidamente mais elevadas, o que não constitui nenhuma novidade, e a consideração da rota de produção torna tal fato mais acentuado. No entanto, como veremos ao longo deste capítulo III e do capítulo IV, de acordo com o nível de emissão tal desvantagem pode ser substancialmente reduzida, como provam as comparações entre plantas integradas no nível Baixo e do nível Alto para outros processos. Notaremos por intermédio das simulações, ao variarmos os dados de entrada, que os outros processos podem apresentar emissões tão ou mais elevadas para certos poluentes.

É interessante observar as diferenças, aliás já expressas em números na Tabela 46 no caso do nível Médio, entre as emissões das plantas siderúrgicas e das rotas de produção. Como regra geral, derivada das premissas adotadas³⁷, temos que para um dado poluente a diferença

³⁷ Lembramos que os fatores de emissão somente variam por níveis para as plantas siderúrgicas. Para as etapas a montante estes fatores são os mesmos para todos os níveis, e o que varia são as quantidades dos insumos destas etapas. As simulações tentarão dar conta destas variações.

aumenta desde o nível Baixo até o Alto como mostrado na Tabela 47, na qual as emissões das plantas siderúrgicas são uma fração das emissões totais da rota de produção. As plantas com insumos e tecnologias de controle e prevenção de poluição mais avançados são caracterizadas no nível de emissão Baixo, e assim o percentual de emissões em relação à rota de produção é menor.

Fica evidente a grande importância das etapas a montante nas emissões da rota integrada com fusão redutora COREX. No caso das plantas semi-integradas, a conjunção de insumos e tecnologias CP e PP que levem ao nível Baixo resulta em percentual de emissões nas plantas bastante reduzido em comparação à rota. Este percentual pode ser alterado caso a energia elétrica for gerada por plantas que não emitam particulados, como veremos nas simulações no caso de plantas hidroelétricas. Para os níveis Médio e Alto das integradas convencionais a relação entre emissões da planta e da rota está na faixa de 40-60%. O mesmo comentário feito acima sobre a geração elétrica, para o caso da rota semi-integrada, continua válido aqui.

Ainda na Tabela 47 a mesma comparação percentual é mostrada para outros poluentes. No caso do CO temos que as plantas siderúrgicas em geral apresentam maiores emissões da rota de produção por tonelada de aço líquido. Para NO_x e SO₂, com exceção da rota integrada convencional, o conjunto das etapas a montante são bem mais importantes que as plantas siderúrgicas.

Finalmente devemos destacar que a inclusão de etapas de Lingotamento, Laminação e Acabamento obviamente afeta esses percentuais, aumentando-os, ou seja, as emissões das plantas siderúrgicas são maiores que as mostradas. Por outro lado, como alertado anteriormente, etapas como transporte de insumos e a inclusão de outros materiais e ramificações na cadeia produtiva afetam em sentido oposto os percentuais, tornando-os menores (v. item das simulações). Temos assim que estes dois conjuntos de fatores influenciam em sentidos opostos os resultados comparativos entre as emissões das rotas de produção e das plantas siderúrgicas consideradas isoladamente.

Tabela 47 – Comparação percentual entre emissões das rotas de produção e das plantas siderúrgicas (planta / rota)

		Integrada			Semi-integrada			COREX-BOF			COREX-EAF		
		Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
Mat.Part.	g/t aço líq.	23%	44%	57%	4%	32%	57%	13%	16%	18%	9%	15%	18%
SO₂	g/t aço líq.	40%	69%	75%	3%	5%	10%	22%	20%	15%	19%	22%	28%
NOx	g/t aço líq.	38%	56%	65%	12%	19%	21%	23%	18%	14%	29%	28%	24%
CO	g/t aço líq.	98%	98%	99%	25%	75%	78%	36%	36%	86%	40%	66%	70%
VOC	g/t aço líq.	41%	61%	66%	52%	68%	85%	0%	0%	0%	15%	31%	59%

As discussões sobre a importância relativa das plantas e das rotas se revela mais claramente se indicarmos as emissões de cada etapa por tonelada de aço líquido como mostrado na Figura 16 para particulados, NOx e SO₂ para a rota integrada nível Médio. A Sinterização é a etapa que apresenta as maiores emissões de NOx e SO₂ e para a geração de energia elétrica estas são bastante significativas, conforme as condições já discutidas. As emissões por tonelada de aço líquido dependem dos insumos utilizados e oferecem uma informação diferenciada em relação às emissões por tonelada de material produzido de cada etapa, mostradas no capítulo II. A Pelotização apresenta emissões significativas por tonelada de pelota produzida mas no Caso Base sua utilização é menor que a de sinter na carga dos Altos-fornos.

Quanto à Coqueria, que reconhecidamente sempre foi uma das maiores fontes de emissões nas plantas siderúrgicas, o nível Médio apresenta emissões equivalentes a plantas que já adotaram tecnologias CP e PP de acordo com normas dos países europeus, Japão e Estados Unidos (EIPPCB, 1999), nas quais o consumo de coque nos Alto-fornos só não é mais baixo que nas plantas em que é feita a injeção de finos de carvão. Resulta então que a sua importância nas emissões por tonelada de aço líquido não é tão acentuada. Isso não quer dizer que as Coquerias não são mais uma fonte de preocupação permanente para a redução de emissões atmosféricas e efluentes, além do aproveitamento de resíduos. No nível Alto (Figura 17), as emissões por tonelada de aço líquido tornam-se maiores e já revelam as características de muitas das Coquerias, assim como dos Altos-fornos, em todo o mundo.

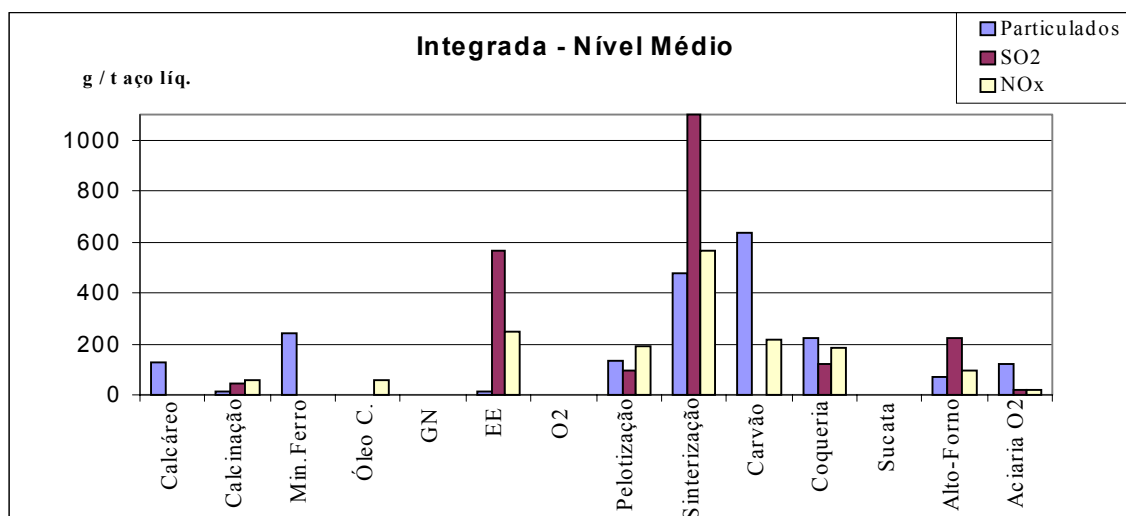


Figura 16 – Emissões de particulados, SO₂ e NO_x para a rota integrada por etapa de produção para o nível Médio

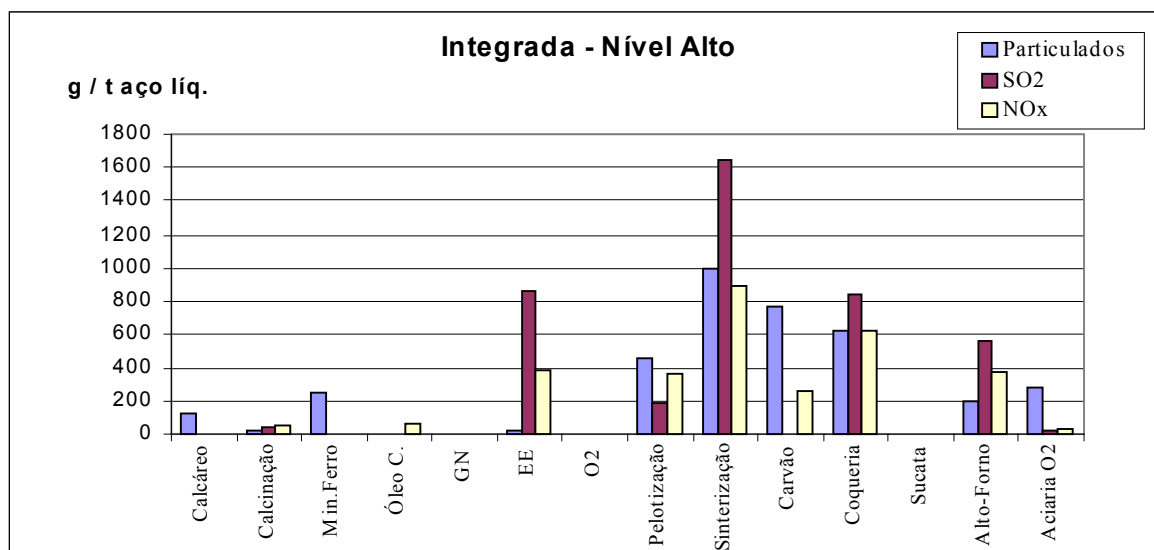


Figura 17 - Emissões de particulados, SO₂ e NO_x para a rota integrada por etapa de produção para o nível Alto

Para o caso da rota Semi-integrada, a importância do tipo de geração de energia elétrica, principalmente para SO_2 e NO_x , é bastante acentuada, como já destacamos anteriormente (Figura 18 e Figura 19)³⁸.

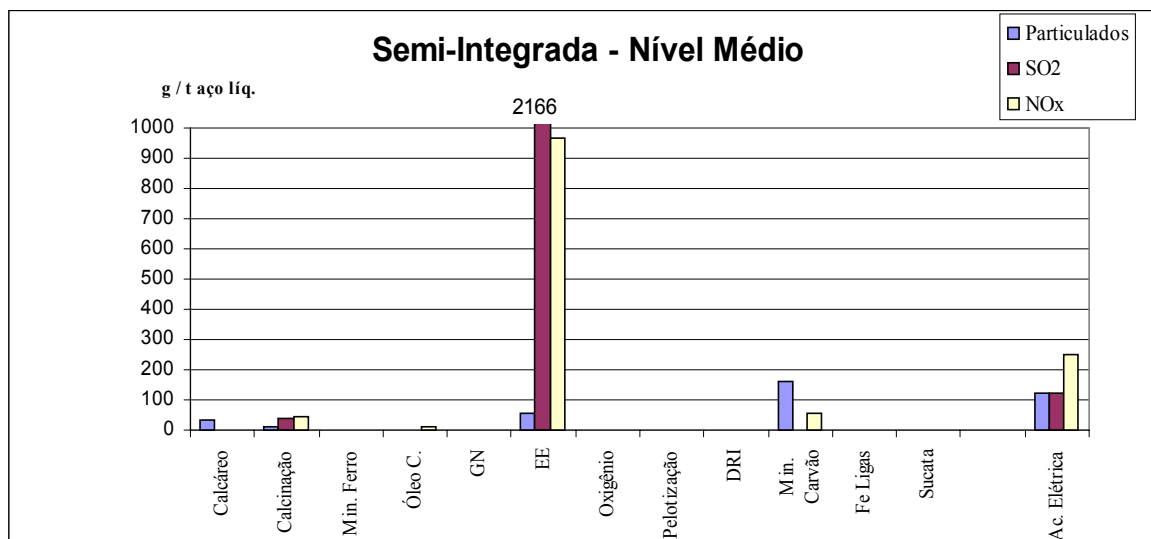


Figura 18 - Emissões de particulados, SO_2 e NO_x para a rota Semi-integrada por etapa de produção para o nível Médio

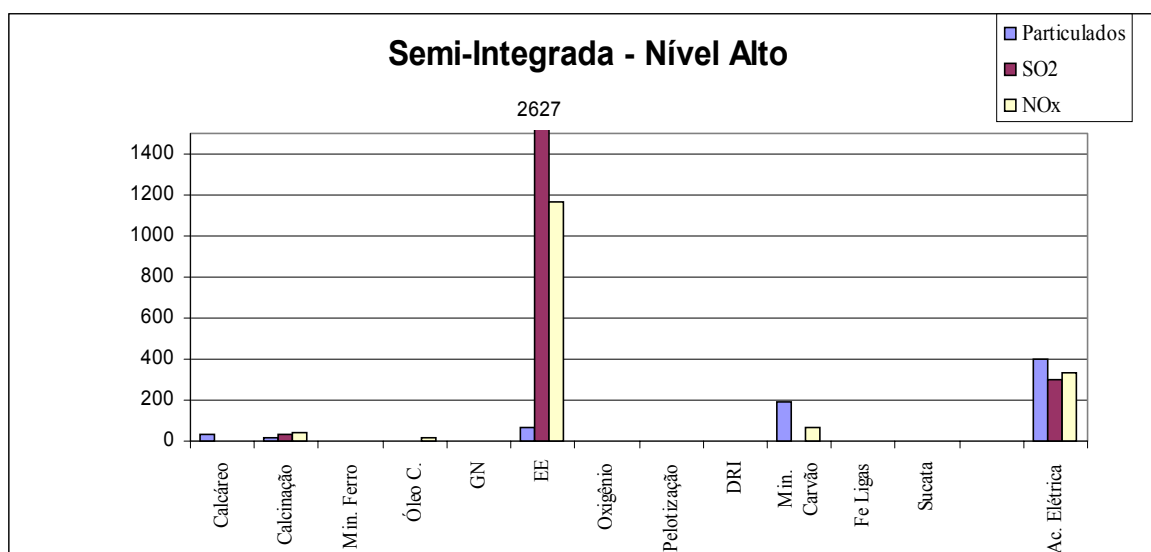


Figura 19 - Emissões de particulados, SO_2 e NO_x para a rota Semi-integrada por etapa de produção para o nível Alto

³⁸ A diferença entre os níveis remete para o consumo de energia elétrica e para as emissões na Aciaria elétrica. Nas simulações tais resultados são alterados de acordo com as emissões da geração de energia elétrica.

Para o caso da rota integrada com fusão redutora COREX (Figura 20 e Figura 21), o alto consumo de carvão faz com que as emissões de particulados e NOx por tonelada de aço líquido seja bastante elevado na etapa de mineração do carvão. Merecem destaque as emissões da etapa de Pelotização, dado que no Caso Base as pelotas são predominantes na carga metálica³⁹.

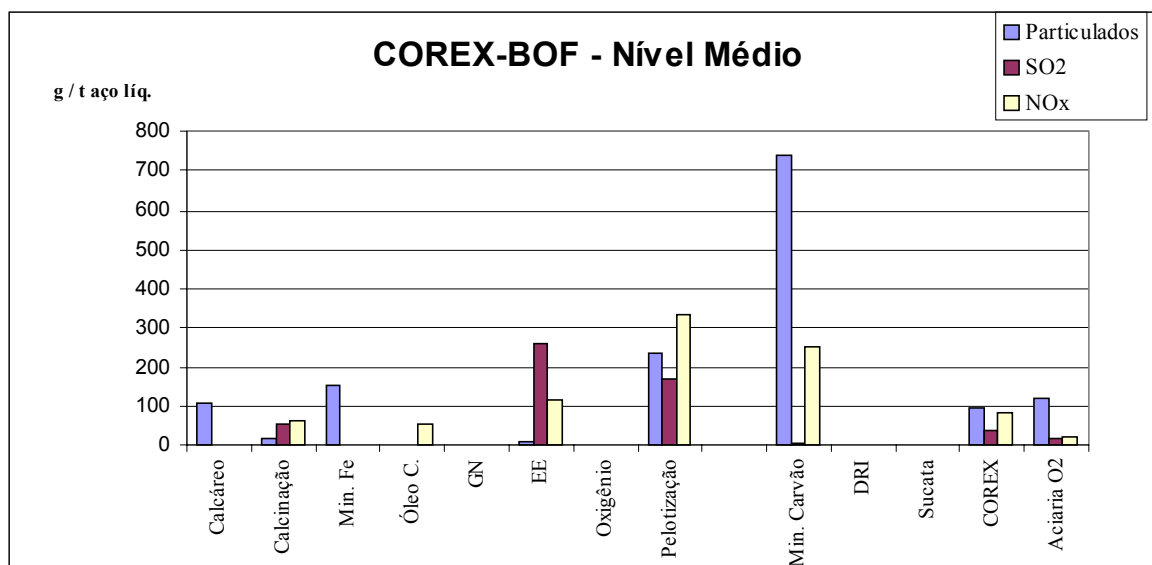


Figura 20 - Emissões de particulados, SO₂ e NOx para a rota integrada com fusão redutora COREX e Aciaria a Oxigênio por etapa de produção para o nível Médio

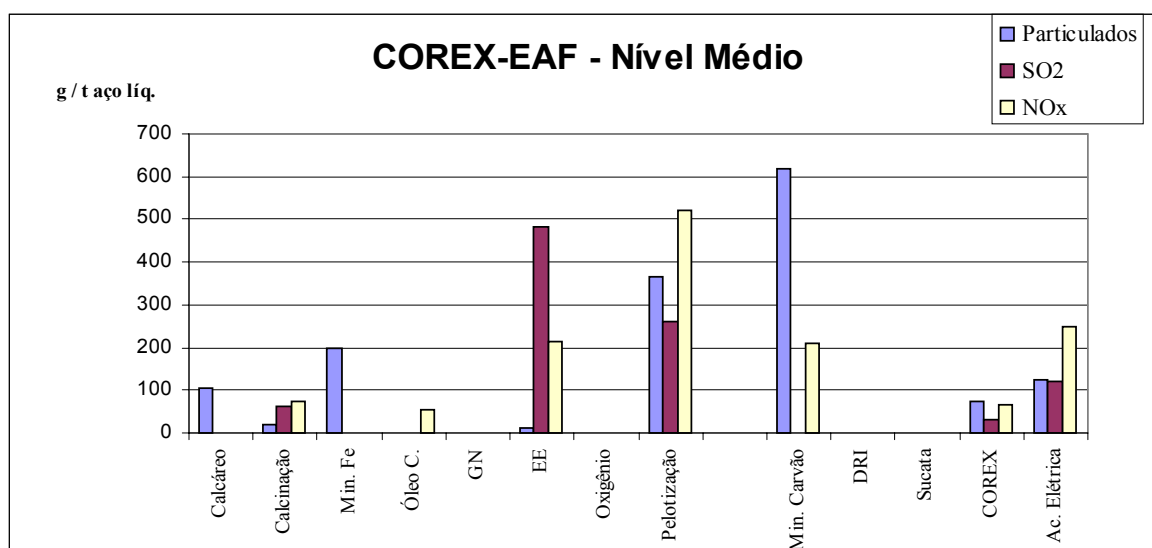


Figura 21 - Emissões de particulados, SO₂ e NOx para a rota integrada com fusão redutora COREX e Aciaria Elétrica por etapa de produção para o nível Médio

³⁹ Isto ressalta a importância da eficiência no uso de energia e do controle de poluentes na Pelotização. Na Índia, a Pelotização integra a planta siderúrgica de Jindal e utiliza gás de exportação COREX (Böhm e Eberle, 1997).

As emissões da geração de energia elétrica se referem ao consumo de eletricidade apenas das etapas a montante, pois considera-se 100% de auto-produção utilizando gás de exportação COREX. Os resultados para o nível Alto não são mostrados por não haver substancial diferença em termos relativos.

Comparando para cada tipo de poluente temos uma visão mais detalhada dos vários níveis de emissão para os processos. Na Figura 22 podemos verificar as emissões de material particulado das plantas siderúrgicas para cada um dos processos. Para o mesmo nível, os valores são maiores para as plantas integradas convencionais, embora tal diferença seja menor para o nível Baixo, como citado acima. Isto indica a existência de tecnologias comercialmente disponíveis para a redução do impacto destas plantas. Devemos ressaltar, no entanto, que a adoção destas tecnologias são dispendiosas para muitas plantas em razão de fatores de projeto ou de vida útil. Na Figura 23 as emissões de particulados dos processos são mostradas para as rotas de produção. Note-se que a diferença, para o nível Médio, entre as emissões das integradas convencionais e das integradas com fusão redutora é menor para o quadro das rotas de produção, atestando a importância da inclusão das etapas de mineração do carvão, mostradas na Figura 20 e na Figura 21.

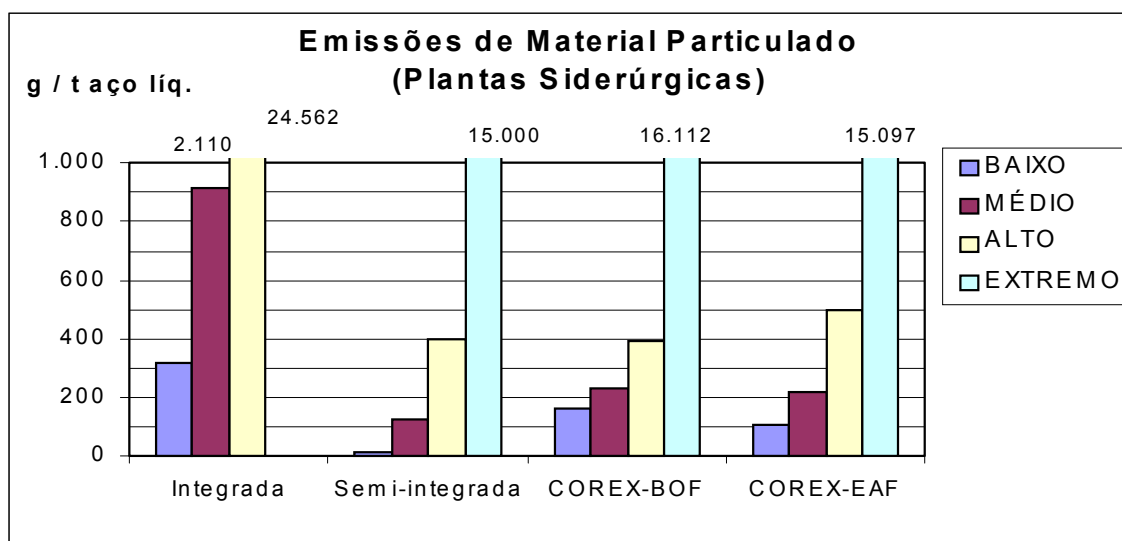


Figura 22 – Emissões de material particulado de plantas siderúrgicas por nível de emissões

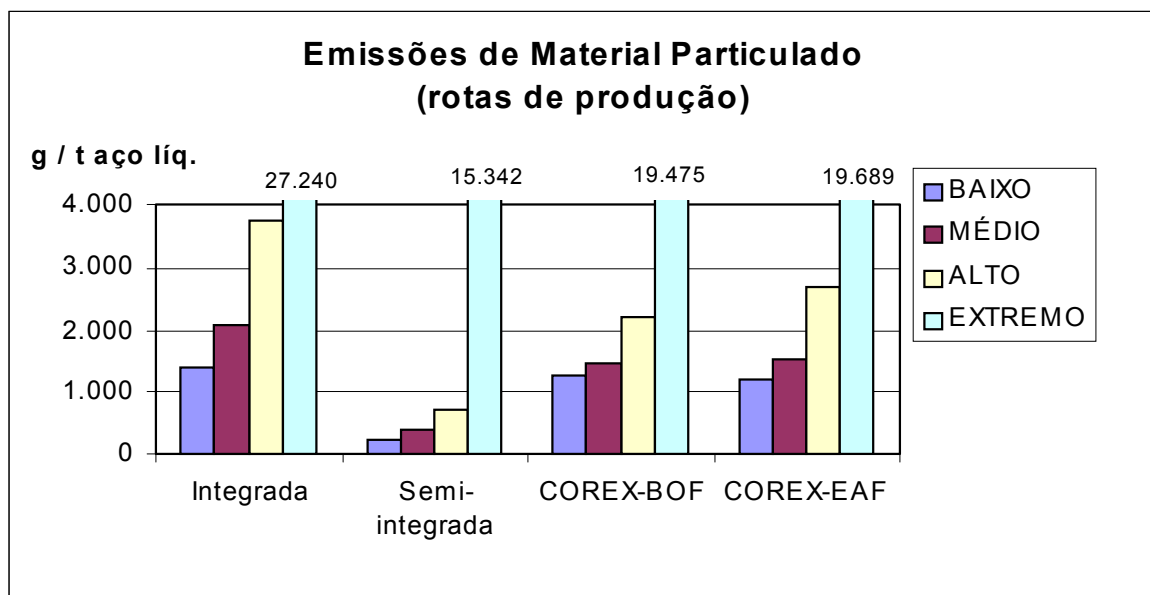


Figura 23 - Emissões de material particulado de rotas de produção por nível de emissões

No caso das emissões de SO_2 a rota de produção semi-integrada apresenta valores comparáveis aos da rota integrada e maiores que as rotas COREX devido às emissões da geração de energia elétrica (Figura 24 e Figura 25), de modo diverso às plantas consideradas isoladamente

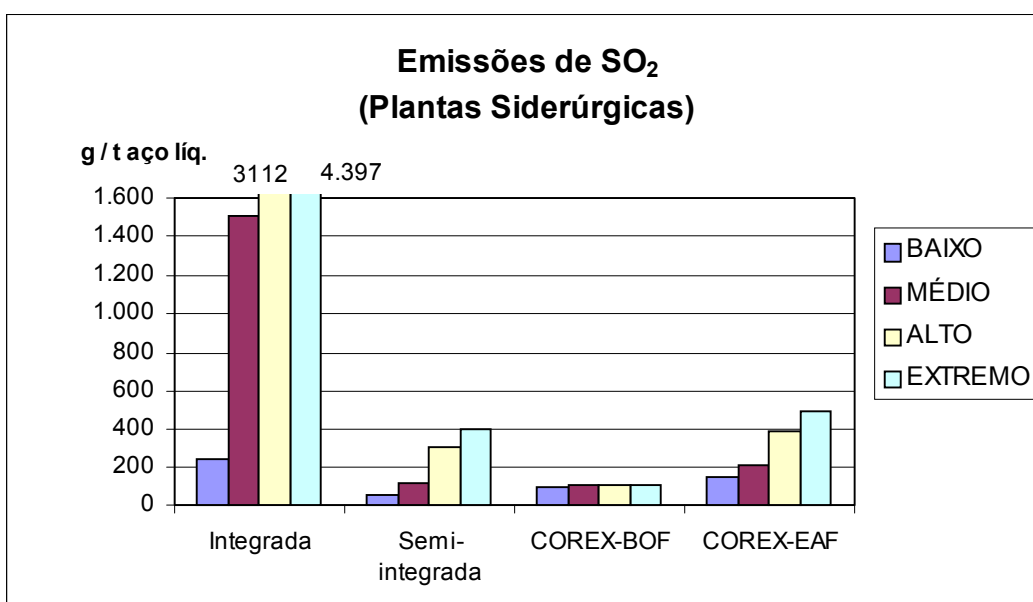


Figura 24 - Emissões de SO_2 de plantas siderúrgicas por nível de emissões

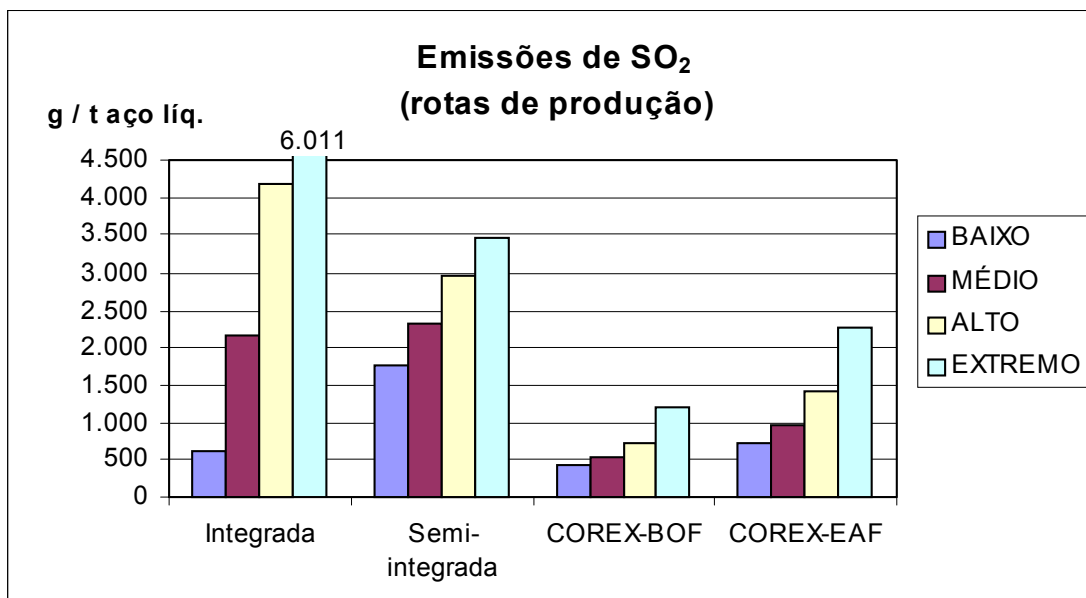


Figura 25 - Emissões de SO₂ de rotas de produção por nível de emissões

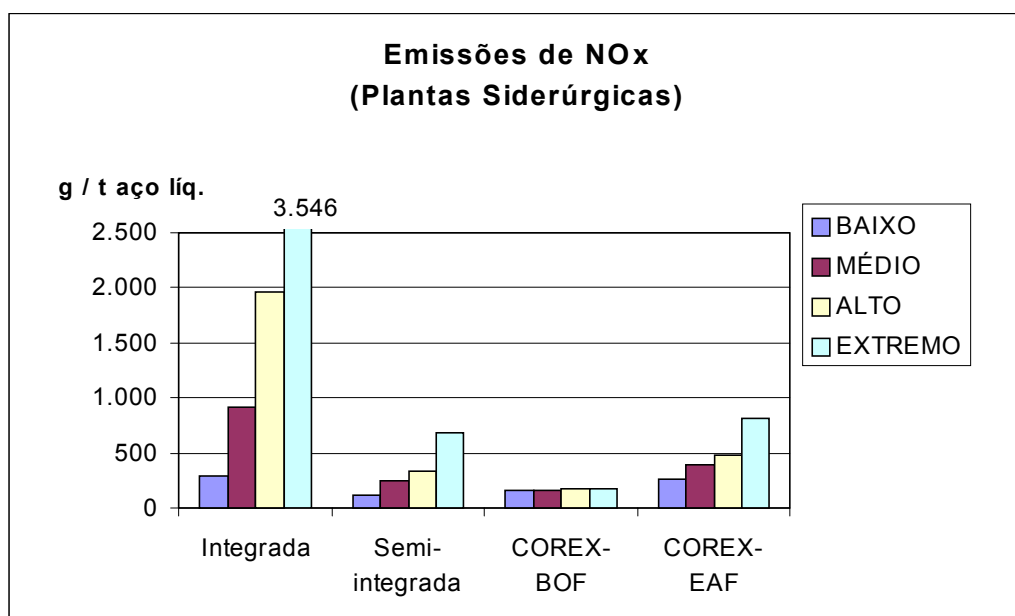


Figura 26 - Emissões de NO_x de plantas siderúrgicas por nível de emissões

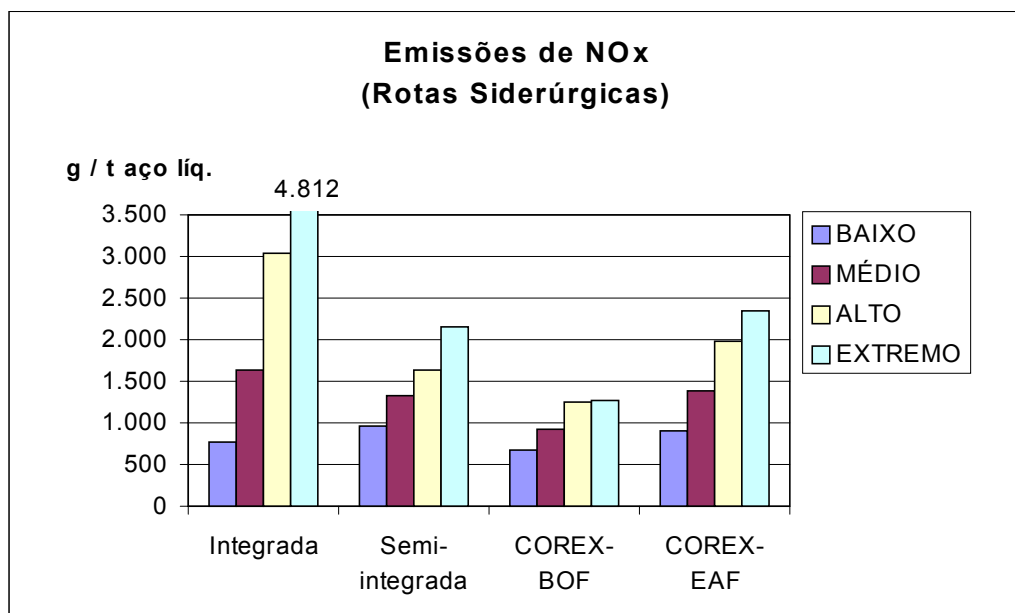


Figura 27 - Emissões de NO_x de rotas de produção por nível de emissões

Para as emissões de NO_x note-se que os valores totais de cada processo estão mais próximos, com exceção do nível Alto em que as integradas convencionais apresentam valores nitidamente mais altos (Figura 26 e Figura 27).

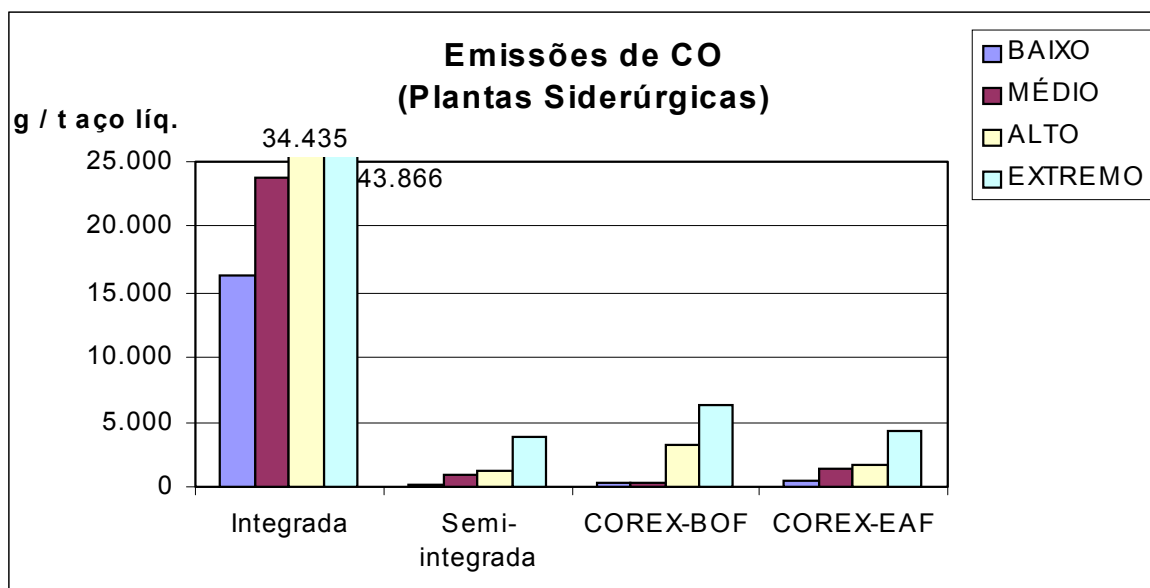


Figura 28 - Emissões de CO de plantas siderúrgicas por nível de emissões

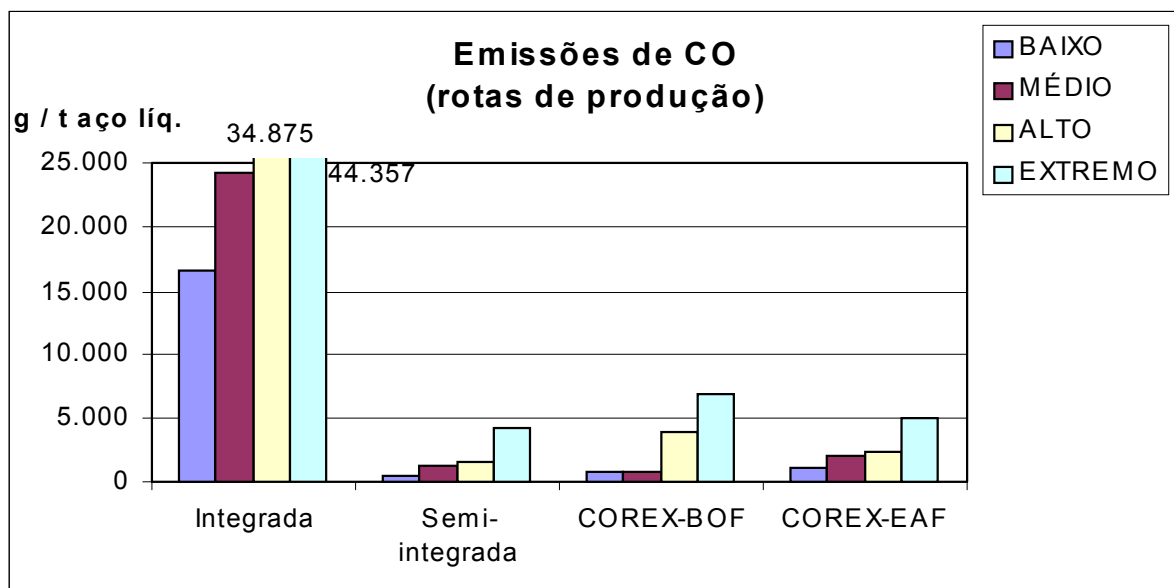


Figura 29 - Emissões de CO de rotas de produção por nível de emissões

As emissões de CO são bem maiores para as plantas integradas convencionais, como pode ser observado na Figura 28. E o quadro não é modificado se considerarmos as rotas de produção, dado que o maior percentual de emissões se concentra nas próprias plantas siderúrgicas (Figura 29).

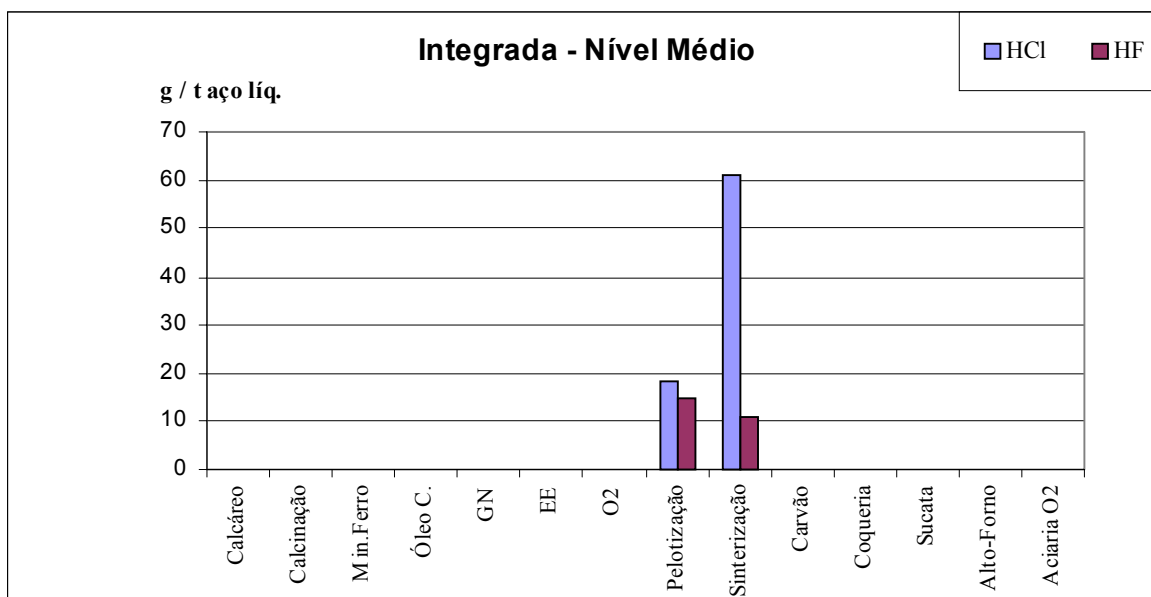


Figura 30 - Emissões de HCl e HF para a rota integrada por etapa de produção para o nível Médio

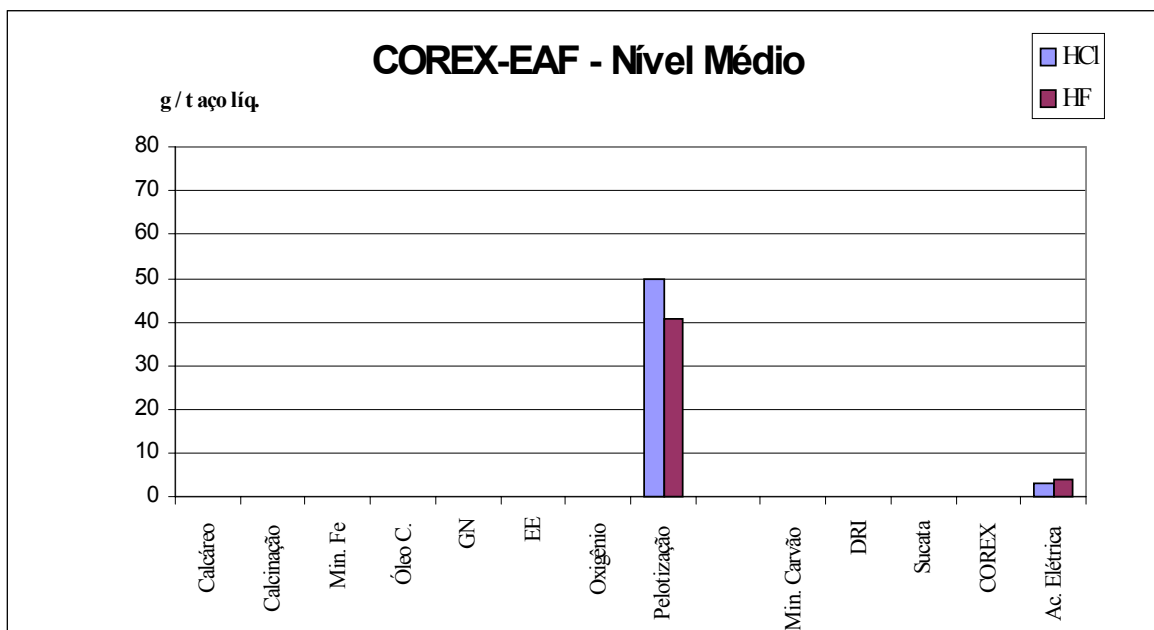


Figura 31 - Emissões de HCl e HF para a rota integrada com fusão redutora COREX por etapa de produção para o nível Médio

As emissões ácidas de HCl e HF tem como fontes principais as etapas de Pelotização e Sinterização, como pode ser observado para os processos integrados convencional e COREX (Figura 30 e Figura 31). Como a etapa de Pelotização não é considerada como parte das plantas siderúrgicas, os fatores de emissão por tonelada de aço líquido são tanto maiores para as rotas de produção em comparação com as plantas siderúrgicas quanto forem as emissões específicas da Pelotização e a quantidade de pelotas utilizada. Por esta razão as rotas do processo integrado com fusão redutora COREX apresentam valores totais de emissão elevados para o Caso Base, tal como mostram a Figura 32 e a Figura 33. É preciso salientar que as emissões de HF e HCl podem ser significativas para as etapas de Laminação a frio, Tatamento e Acabamento, não consideradas neste ponto.

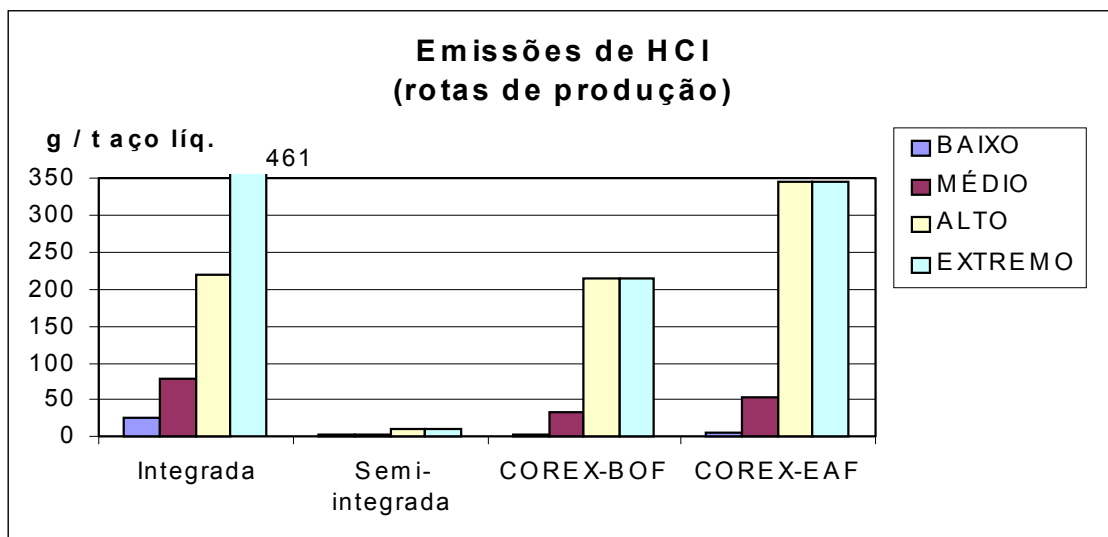


Figura 32 - Emissões de HCl para rotas de produção por nível de emissões

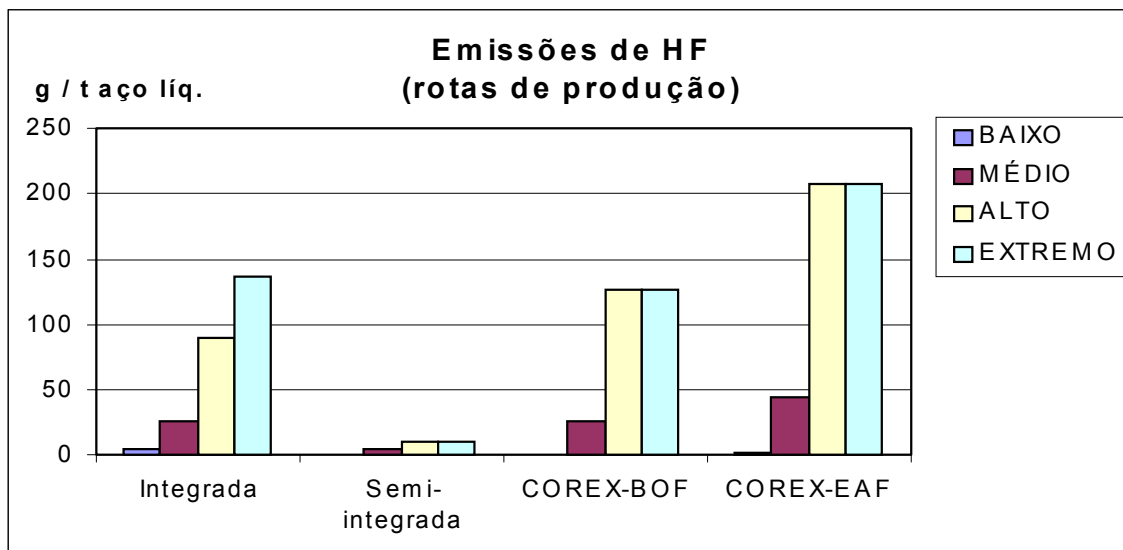


Figura 33 - Emissões de HF para rotas de produção por nível de emissões

III.4 Simulações

Nesta seção é realizada uma análise de sensibilidade aos parâmetros utilizados ao longo do capítulo. Uma série de simulações verifica em que medida os resultados são afetados pela modificação, em determinadas etapas, de parâmetros de carga, do tipo de processo ou das fronteiras do sistema analisado.

III.4.1 Geração de energia elétrica: *mix* de fontes e autoprodução

Como visto anteriormente, o tipo de geração elétrica tem uma influência marcante nos resultados de emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos. No caso das emissões atmosféricas, que estamos verificando com mais detalhes, tal influência depende do percentual de auto-produção das plantas siderúrgicas. No Caso Base, para as integradas a auto-produção foi de 10%, 50% e 90% para os níveis Alto, Médio e Baixo, respectivamente; para as semi-integradas foi de 0% e para as integradas com fusão redutora foi de 100%. A determinação destes índices de auto-produção levaram em conta o que se verifica com mais frequência nas plantas siderúrgicas.

Optou-se por privilegiar dois casos extremos para que os efeitos fossem melhor comparados ao Caso Base. O primeiro considera a geração em termoeletricas a carvão, tomando-se por base os insumos e emissões médios das plantas norte-americanas. O segundo faz uso de hidroelétricas⁴⁰.

Conforme exposto na Figura 34, mesmo o nível Baixo de emissões de SO₂ da rota semi-integrada é superior ao nível Médio das integradas e bem mais alto que todos os níveis das integradas COREX, refletindo as emissões mais elevadas se uma termoeletrica a carvão for a geradora de determinada planta siderúrgica. O mesmo acontece com o NO_x (Figura 35) com efeito um pouco menos acentuado que no caso do SO₂. Para poluentes, como os particulados, a diferença não é significativa, e para outros pode ser insignificante ou inexistente.

⁴⁰ As térmicas a carvão menos eficientes e mais poluidoras são consideradas à parte, e na verdade se constituiriam no caso extremo em questão. Para o caso das hidroelétricas, os resultados podem sinalizar aspectos da ACV para a indústria siderúrgica brasileira, posto que cerca de 93% da geração elétrica no país é proveniente de hidroelétricas.

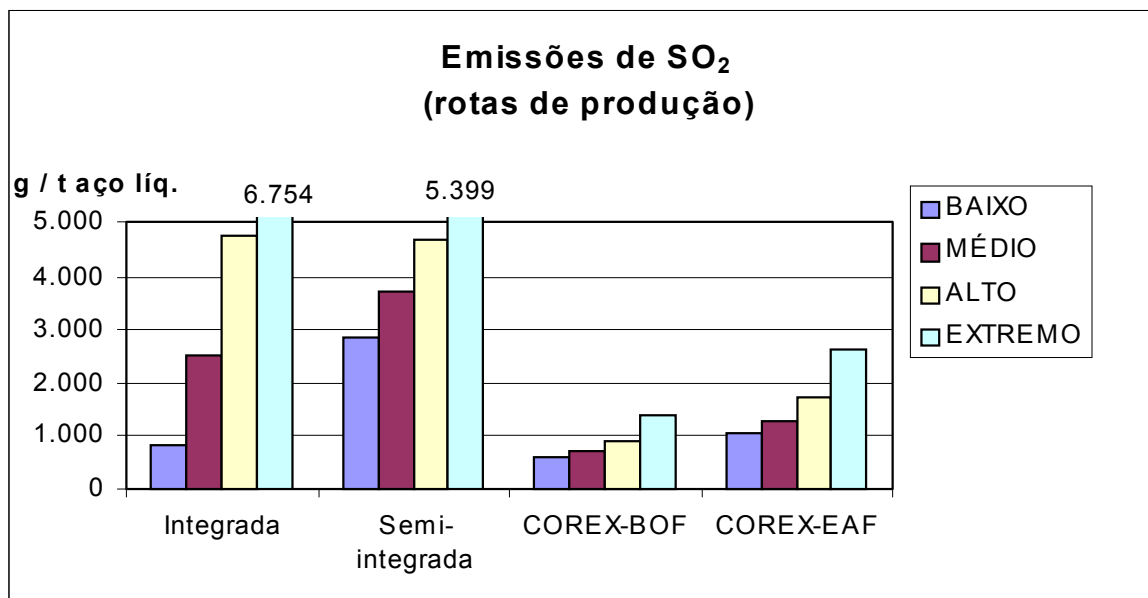


Figura 34 – Emissões de SO₂ para as rotas de produção no caso de geração elétrica com térmicas a carvão

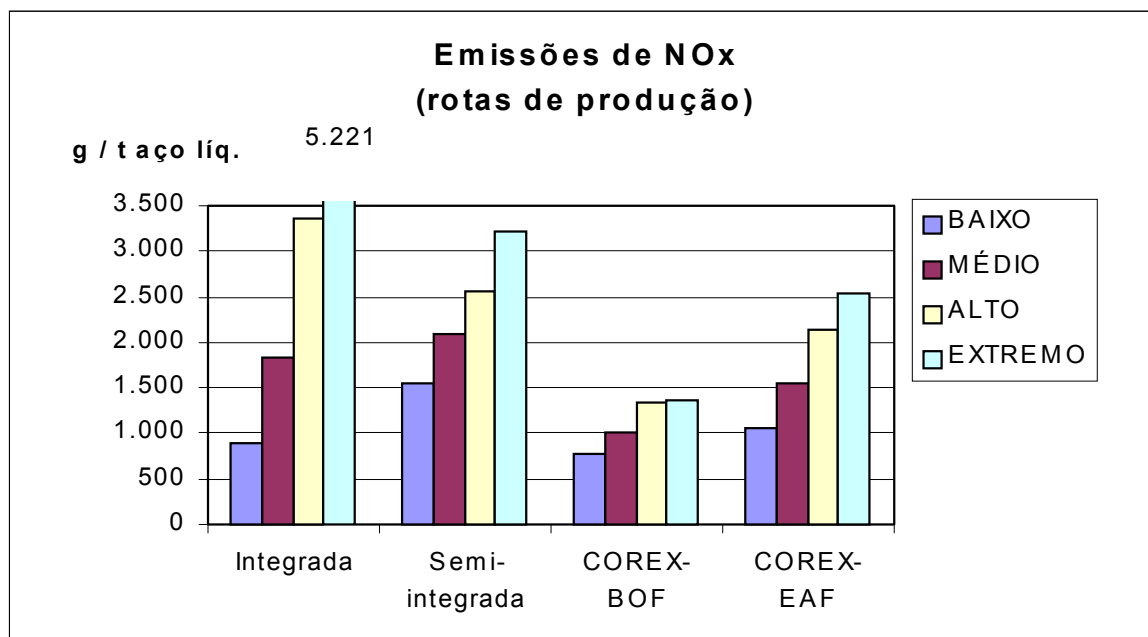


Figura 35 - Emissões de NO_x para as rotas de produção no caso de geração elétrica com térmicas a carvão

Tabela 48 – Variação percentual de emissões da geração elétrica a carvão e hidroelétrica em relação ao Caso Base por rota de produção para o nível Médio

		Integrada		Semi-integrada		COREX-BOF		COREX-EAF	
		CARVÃO	HIDRO	CARVÃO	HIDRO	CARVÃO	HIDRO	CARVÃO	HIDRO
Particulado	g/t aço líq.	2%	-3%	35%	-54%	1%	-2%	2%	-3%
SO₂	g/t aço líq.	17%	-26%	60%	-93%	31%	-48%	32%	-50%
NO_x	g/t aço líq.	12%	-16%	58%	-77%	10%	-13%	12%	-16%

Na Tabela 48 os efeitos para a geração a carvão e hidro são comparados em relação ao Caso Base. Confirma-se o que havíamos relatado acima sobre a geração a carvão e fica evidenciado a redução acentuada das emissões de NO_x e SO₂ para as semi-integradas, dado que as emissões são zeradas para a geração hidroelétrica. Para as integradas COREX os níveis de redução elevados de emissão de SO₂ em relação às integradas se deve à não incorporação de emissões derivadas da geração de energia elétrica consumida em outras etapas.

III.4.2 Ferro-esponja (DRI) na carga dos fornos elétricos da rota semi-integrada

Os processos de redução direta, principalmente para a produção de ferro-esponja, foram inicialmente considerados uma alternativa ao ferro-gusa que evitaria a produção de coque. No entanto, aspectos econômicos do processo, que depende de fonte abundante de gás natural, impediram um crescimento tal como esperado desde a introdução da redução direta em escala industrial no fim dos anos 1950 (IISI e UNEP, 1997). Hoje o ferro esponja é visto como um competidor ou suplementar às cargas de sucata nos fornos elétricos a arco nas plantas semi-integradas.

O maior percentual de DRI nos fornos elétricos tem como consequência o aumento do consumo de energia elétrica no próprio forno e o aumento das emissões da rota de produção semi-integrada, devido aos efeitos da produção de pelotas e de minério de ferro, tal como mostrado na Tabela 32 e na Tabela 49. São bastante significativas as diferenças para todos os níveis de emissão. Este resultado aponta para um aspecto desvantajoso da crescente participação de produtos de redução direta nos fornos elétricos. Obviamente o efeito torna-se

ainda maior caso a carga metálica de DRI seja mais alta que os 60% utilizados nesta simulação. De acordo com o tipo de geração de energia elétrica, diferentes do caso Base, como térmicas a carvão e hidroelétricas, os efeitos são mais e menos acentuados, respectivamente.

Tabela 49 - Efeito da carga de DRI em fornos elétricos sobre as emissões atmosféricas da rota de produção semi-integrada

CASO BASE (100% sucata) versus 60% DRI no EAF							
		Nível Baixo		Nível Médio		Nível Alto	
		0% DRI	60% DRI	0% DRI	60% DRI	0% DRI	60% DRI
Particulado	g/t aço líq.	222	631	384	976	704	2091
SO₂	g/t aço líq.	1764	2954	2324	3616	2965	4466
NO_x	g/t aço líq.	965	1637	1326	2307	1626	3036
CO	g/t aço líq.	416	921	1325	1828	1647	2149
HCl	g/t aço líq.	3	5	3	48	11	310
HF	g/t aço líq.	1	2	4	40	9	187
CH₄	g/t aço líq.	397	654	497	747	591	841

III.4.3 Carga de Pelotas/Sinter nos Altos-fornos

O percentual de pelotas e sinter na carga de altos-fornos afeta os resultados totais de emissões atmosféricas. Apesar do alto potencial poluidor das plantas de Pelotização, as plantas de Sinterização apresentam, como visto anteriormente, emissões bastante significativas – para alguns gases é a etapa mais poluente. Portanto a maior participação de pelotas tende a reduzir um pouco as emissões da rota de produção.

III.5 Discussão final dos resultados

Primeiro, é preciso reafirmar os alertas e cuidados discutidos anteriormente sobre as faixas de fatores de emissão, os quais podem ser influenciados por variáveis como a diversidade dos equipamentos, procedimentos operacionais, insumos materiais e energéticos, as condições locais de cada planta e os métodos de mensuração de emissões.

Como esperado os fatores de emissões atmosféricas da rota Integrada Convencional são maiores que para as outras rotas para todos os níveis considerados, embora plantas desta

rota operando no nível Baixo possam ter emissões inferiores que outras rotas operando no nível Alto.

A rota Semi-integrada apresenta as menores emissões de particulados, NO_x, SO₂, CO e VOC. Exceto para as emissões de CO, esta rota com plantas menos eficientes (nível Alto) apresentam emissões entre o nível Baixo e Alto da rota Integrada Convencional. No entanto, emissões de hidrocarbonetos como PAH e compostos organoclorados, como clorobenzeno, PCB e PCDD/F, são relevantes e merecem atenção crescente. A sucata utilizada nos fornos elétricos apresenta elementos contaminantes, e principalmente o metal zinco dos aços galvanizados impõe sérios problemas para a reciclagem. Portanto, a qualidade da sucata é uma condição para uma maior reciclagem.

Apesar da baixa disponibilidade de dados, fica claro que a rota de produção integrada com fusão redutora COREX apresenta uma série de vantagens ambientais quando comparadas com a rota integrada convencional. No entanto, é importante destacar que para o nível de emissões Alto, os fatores de emissão de outras etapas podem levar a resultados finais elevados para a rota de produção ampliada. A emissão de compostos orgânicos não é relevante, principalmente devido a ausência da etapa de coqueificação, mas o potencial da Redução Direta em gerar poluentes atmosféricos perigosos ainda precisa ser melhor avaliada.

Para o mesmo nível de emissões as plantas de Sinterização apresentam as emissões mais elevadas de particulados, NO_x, SO₂, CO. Com relação a estes poluentes, e também aos compostos orgânicos, a adoção das Melhores Tecnologias Disponíveis constitui um importante fator para a melhoria do desempenho ambiental da rota Integrada Convencional. Algumas plantas nos Estados Unidos, por exemplo, tiveram dificuldades em operar de acordo com as normas ambientais e várias foram fechadas (Energetics, 2000). Apesar dessa característica de grande potencial poluidor, já existem tecnologias que reduzem substancialmente as emissões, e além disso, as plantas de Sinterização permanecem como uma importante etapa para a reciclagem de cargas metálicas presentes em pós, lamas e rebarbas metálicas.

As plantas de Pelotização são, de modo geral, excluídas das análises de emissões em sistemas de produção de aço, provavelmente porque as plantas isoladas, não integradas às plantas siderúrgicas, são mais comuns. No entanto, os resultados mostram que as emissões da Pelotização estão longe de ser desprezíveis, mesmo no nível Baixo de emissão. Como o uso de

pelotas tem aumentado na rota Integrada Convencional, na produção de ferro-esponja (DRI) e nas plantas de redução direta COREX, os aspectos tecnológicos e ambientais de tais instalações de Pelotização devem ser levados em consideração com maior detalhamento.

As plantas de Coqueificação requerem um amplo leque de tecnologias CP e PP para a redução das emissões de particulados, NO_x, SO₂, H₂S e compostos orgânicos, afinal a Coqueria sempre representou um grande desafio em razão de seu elevado potencial poluidor. Muitas tecnologias PP, como operação regular, manutenção e melhorias da selagem das portas são relevantes para alcançar tais reduções, mas as tecnologias CP, algumas de custo bastante elevado, como desnitrificação catalítica, dessulfurização e Apagamento a Seco do Coque, são imprescindíveis para atingir os fatores de emissão do nível Baixo. Nota-se, portanto, que o potencial de redução de emissões é bastante elevado. No que se refere ao nível Médio, destaca-se a relativa boa situação das Coquerias de plantas européias, a partir das quais são obtidos os valores do nível Médio, há algum tempo preocupadas com as emissões desta etapa. Por outro lado, o nível de emissão Alto revela que são enormes as dificuldades para redução das emissões de particulados, SO₂, e compostos orgânicos, em particular para plantas mais antigas.

As medidas de eficiência energética mostraram-se uma das mais efetivas do conjunto de tecnologias PP para redução de emissões. A injeção de finos de carvão (PCI) no Alto-forno e o menor consumo de finos de coque na Sinterização têm um importante papel na redução da produção de coque necessária, o que resulta em menores emissões por tonelada de aço líquido. Simulações com produção e consumo mais elevados de coque, mesmo no nível de emissão Baixo na Coqueria, levam a um substancial aumento das emissões da rota Integrada Convencional. No que tange a rota Semi-integrada, várias alternativas, como os fornos UHP, queimadores oxi-combustível, pó-combustão com oxigênio, controle avançado de processo e pré-aquecimento de sucata, já são utilizados por muitas plantas para a redução do consumo de energia elétrica. Dependendo das emissões nas etapas de geração de energia elétrica e preparação de sucata, isto é, se as emissões forem muito elevadas, as vantagens da rota Semi-integrada são substancialmente reduzidas.

No capítulo seguinte, os processos de produção de aço são caracterizados com base na contabilidade exergetica, em que todos os fluxos de energia e materiais são considerados sob uma única variável. Como medida geral de potencial termodinâmico, a exergia permite esta

uniformização e se configura em importante conceito para a Ecologia Industrial. Neste sentido, o objetivo de um programa de sustentabilidade ambiental seria a minimização das perdas exergéticas nas atividades econômicas. Daí a importância da avaliação do balanço exergético de cada etapa e das rotas de produção para a identificação de oportunidades de aumento da eficiência exergética da transformação e uso dos materiais. No caso dos poluentes, a rejeição destes para o meio ambiente é um fator de redução da eficiência exergética, posto que os poluentes têm um potencial termodinâmico que poderia ser utilizado por intermédio da reciclagem.

CAPÍTULO IV

INVENTÁRIO EXERGÉTICO DOS FLUXOS DE ENERGIA E MATERIAIS EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE AÇO

A Ecologia Industrial apresenta a Análise do Ciclo de Vida como um dos métodos mais afinados com as premissas que norteiam as análises e propostas sobre os sistemas industriais. Se no capítulo II e III os fluxos de energia e materiais das diversas rotas de produção de aço foram considerados em unidades de massa, energia e volume, neste capítulo IV a atenção é voltada para uma unidade comum, uma medida de disponibilidade termodinâmica: a *exergia*.

Trata-se de um inventário exergético de ciclo de vida do aço com o objetivo de comparar eficiências e perdas exergéticas em todas as etapas de produção. A metodologia foi a mesma que a utilizada no capítulo III, e permitiu integrar insumos, produtos, subprodutos, poluentes e resíduos como fluxos de exergia. Uma análise de sensibilidade novamente foi realizada para testar como variações de certos parâmetros afetam os resultados finais.

Conceitos termodinâmicos nem sempre são de fácil entendimento, basta verificar as dificuldades que o conceito de entropia suscita, principalmente quando aplicado fora de seu terreno termodinâmico estrito. Apesar de não ser exatamente uma variável trivial, a exergia é mais intuitiva e pode ser medida em relação a um ambiente-referência e assim ser útil na caracterização do metabolismo dos processos industriais.

Para além do domínio da engenharia, a análise exergética tem sido aplicada na reconstrução dos pilares biofísicos da ciência econômica. Exergia pode ser usada como uma medida do trabalho potencial embutido nos recursos energéticos e materiais, produtos e resíduos. Como uma medida de energia e materiais, a exergia oferece informação agregada que pode ser utilizada de diversas maneiras, como medida de eficiência técnica e do impacto ambiental aproximado dos resíduos (Wall, 1977; Ayres et al., 1996).

Neste capítulo, a análise exergética é aplicada no inventário de ciclo de vida de rotas de produção de aço. Calculou-se a exergia de insumos, produtos e resíduos, além do valor das

perdas e eficiências exergéticas para cada etapa de produção. Através de uma análise de sensibilidade, o efeito da variação de alguns parâmetros foi calculado.

A análise exergética tem sido utilizada para calcular eficiências de segunda lei da conversão e uso da energia no âmbito de economias nacionais (Schaeffer e Wirtshafter, 1992; Wall, 1990; Wall et al., 1994) e para processos industriais específicos. A maior parte destes estudos tem demonstrado grandes oportunidades para o aumento de eficiência energética nos processos industriais, além de indicar algumas medidas e setores econômicos prioritários para a obtenção de tais ganhos de eficiência. Os estudos sobre processos de produção de aço revelaram as fontes de perdas exergéticas e avaliaram alternativas tecnológicas para o aumento das eficiências energética e exergética (Bisio, 1993; Beer et al., 1998)

A caracterização dos fluxos de energia e materiais, de indústrias a economias inteiras, assim como de processos específicos a conjuntos de sistemas industriais conectados, constitui um campo de estudos promissor para avaliar padrões de produção, distribuição social dos recursos naturais e fardos da poluição, aspectos da reorganização produtiva e efeitos colaterais das mudanças tecnológicas. A análise exergética é um método que pode ser usado para essas abordagens integradas.

IV.1 O Conceito de Exergia

A exergia é a forma mais geral de potencial termodinâmico de um sistema (Evans, 1969)⁴¹. O conceito de exergia incorpora outros potenciais termodinâmicos como Energia Livre de Gibbs, Energia Livre de Helmholtz, trabalho disponível e disponibilidade. A função exergia **B** de um sistema é definida como:

$$B = U + P_0V - T_0S - \sum \mu_{i0}n_i \quad (6)$$

onde energia interna U , pressão P , temperatura T , entropia S , potencial químico e número de moles de cada componente μ_i and n_i . O índice “0” denota quando o sistema está em equilíbrio com o ambiente. *A exergia é uma medida do grau de afastamento entre o sistema e seu*

⁴¹ Na verdade, Evans cunhou a expressão “essergy” (essergia, em inglês, e que significa essência da energia) para diferenciá-la da *exergia* nomeada por Rant (1956) e de outros potenciais termodinâmicos menos gerais que a função essergia. No entanto, o nome exergia que utilizamos adquiriu uso corrente na literatura e designa a mesma função essergia de Evans.

ambiente, este tomado como sistema de referência, medida esta que significa o trabalho máximo que pode ser obtido do sistema em sua interação com o ambiente até o equilíbrio.

A exergia incorpora em sua definição tanto a Primeira como a Segunda Lei da Termodinâmica, pois aponta não apenas para a quantidade de energia de um sistema mas também para sua qualidade, ou seja, sua capacidade de realizar trabalho. Uma mesma quantidade de energia pode ter qualidades termodinâmicas diferentes. A energia não é destruída, ela se conserva nos processos, conforme expresso na Primeira Lei, mas parte desta energia não pode ser convertida em trabalho, como afirma a Segunda Lei⁴². O conteúdo exergético de um determinado sistema é dividido em vários componentes, cinético, eletromagnético, físico e químico⁴³. Por definição, o sistema referência tem exergia zero. Portanto, qualquer sistema indistinto de seu ambiente com respeito a seus componentes exergéticos tem conteúdo exergético zero.

IV.1.1 A função exergia

Todas as medidas de potencial termodinâmico, citadas anteriormente lidam com a idéia de trabalho potencial e cada uma se refere a condições específicas pelas quais o sistema é levado ao equilíbrio com o ambiente, como veremos para a obtenção da expressão B da exergia (Tabela 50). Todas as outras expressões para a disponibilidade de sistemas químicos pode ser obtida a partir de derivações da função exergia B.

O primeiro caso se refere a um sistema fechado com respeito à transferência de matéria, mas não isolado termicamente. Se o processo é isobárico (pressões interna e externa iguais e constantes), o ‘caminho’ até o equilíbrio corresponde à mínima *entalpia*, ou seja, a entalpia pode ser definida como o trabalho máximo obtido de um sistema fechado quando levado ao equilíbrio à pressão constante. O termo foi introduzido por Josiah Willard Gibbs em

⁴² No presente texto as Leis da Termodinâmica serão apresentadas brevemente, já tomando seus conceitos principais como base.

⁴³ O inventário exergético dos processos de produção de aço aqui apresentado considera apenas os componentes físico e químico devido à contribuição desprezível dos componentes cinético e eletro-magnético nesses processos.

1878 como uma medida do conteúdo energético de um sistema⁴⁴. A entalpia absoluta **H** inclui tanto a energia interna **U** como o trabalho potencial associado à pressão **P** e ao volume **V**:

$$H = U + PV \quad (7)$$

Tabela 50 - Quadro comparativo de diversos potenciais termodinâmicos

Nome	Formulação	
Entalpia	$H = U + PV$	$\Delta n_i = 0; \Delta S = 0; P = P_0$
Energia Livre de Helmholtz	$F = U - TS$	$\Delta n_i = 0; \Delta V = 0; T = T_0$
Energia Livre de Gibbs	$G = U + PV - TS$	$\Delta n_i = 0; P = P_0; T = T_0$
Exergia (nome dado por Rant em 1956)	$\epsilon = U + PV - T_0S - (E_0 + P_0V_0 - T_0S_0)$	
Disponibilidade (formulada por Keenan em 1941)	$E = U + P_0V - T_0S - (E_0 + P_0V_0 - T_0S_0)$	
Exergia ou Essergia	$B = U + P_0V - T_0S - \sum \mu_{0i}n_i$	

No segundo caso, se o processo ocorrer sem mudança de temperatura e volume, permitindo as trocas de calor e variação de pressão, o equilíbrio final corresponde à mínima energia livre de Helmholtz **F**, que então pode ser definida como o máximo trabalho que pode ser extraído de um sistema fechado à temperatura e volume constantes.

$$F = U - TS \quad (8)$$

A Energia Livre de Gibbs corresponde ao máximo trabalho que pode ser extraído de um sistema fechado em seu caminho para o equilíbrio à temperatura e pressão constantes.

$$G = U + PV - TS \quad (9)$$

Na Figura 36 é mostrado um sistema **A** em meio a um ambiente homogêneo **A₀**, muito maior que **A**, cujas variáveis intensivas são **P**, **T**, μ_i e as extensivas são **U**, **V**, **S**, **n_i**, enquanto os índices “0” são válidos para o ambiente. Ambos estão em equilíbrio interno. Vamos

⁴⁴ Nem a entalpia nem a energia interna podem ser medidas diretamente. O que se mede são as variáveis pressão, volume e calor. A convenção é determinar a entalpia de formação de um elemento puro com sendo zero. A entalpia de um composto é assim definida como o calor absorvido ou emitido em sua formação a partir de elementos puros.

assumir que todas as variáveis extensivas do sistema A são muito menores que as do ambiente A_0 . É possível extrair trabalho W do sistema total $A \cup A_0$. Portanto:

$$\begin{array}{ll}
 U + U_0 + W = \text{constante} & dU + dU_0 + dW = 0 \\
 V + V_0 = \text{constante} & \Rightarrow dV + dV_0 = 0 \\
 n + n_{i0} = \text{constante} & dn + dn_i = 0
 \end{array} \tag{10}$$

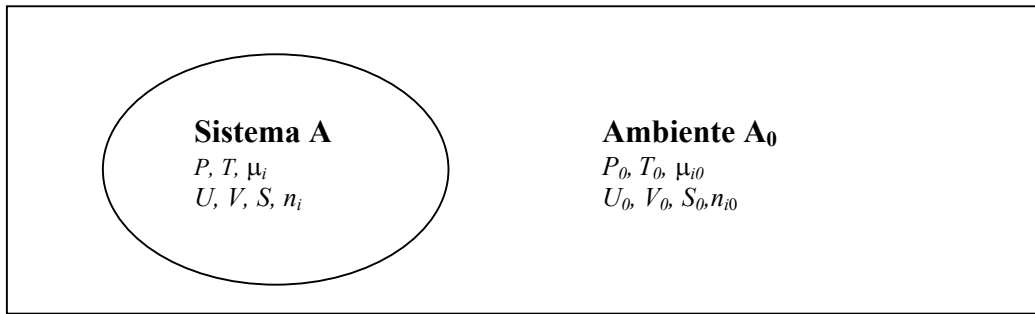


Figura 36 – O sistema A e o ambiente A_0 com variáveis intensivas e extensivas

A interação do sistema A com o ambiente A_0 pode ocorrer pela interface de A, e as variáveis intensivas de A_0 não são alteradas, $dT_0 = 0$, $dP_0 = 0$ e $d\mu_{i0} = 0$. O diferencial da entropia do sistema A_0 é:

$$dS_0 = (dU_0 + P_0 dV_0 - \sum \mu_{i0} dn_{i0}) / T_0 \tag{11}$$

Utilizando (10), temos que:

$$dS_0 = - [(dU + P_0 dV - \sum \mu_{i0} dn_i) / T_0] - dW/T_0 \tag{12}$$

O diferencial total de entropia do sistema e do ambiente é:

$$dS_{\text{tot}} = dS + dS_0 = - [(dU + P_0 dV - T_0 dS - \sum \mu_{i0} dn_i)/T_0] - dW/T_0 \tag{13}$$

que pode ser reescrita:

$$dS_{\text{tot}} = - [dB + dW] / T_0 \quad (14)$$

na qual reconhecemos a exergia B,

$$B = U + P_0 dV - T_0 S - \sum \mu_{i0} dn_i \quad (15)$$

Se o sistema A entra em equilíbrio com o ambiente A_0 e o trabalho W é obtido no processo, a exergia é levada de B a zero e a produção entrópica é ΔS_{tot} . Integrando (12) então:

$$\Delta S_{\text{tot}} * T_0 = B - \Delta W \quad (16)$$

O trabalho máximo é obtido para processos reversíveis nos quais a produção de entropia é nula, $dS_{\text{tot}} * T_0 = 0$, e assim:

$$\Delta W_{\text{max}} = B \quad (17)$$

IV.1.2 Trabalho máximo e exergia perdida

Vamos considerar um determinado sistema termodinâmico que recebe a quantidade de calor Q por um ambiente à temperatura T_0 e que o trabalho W é realizado pelo sistema que assim passa do estado 1 para o estado 2 (Figura 37).

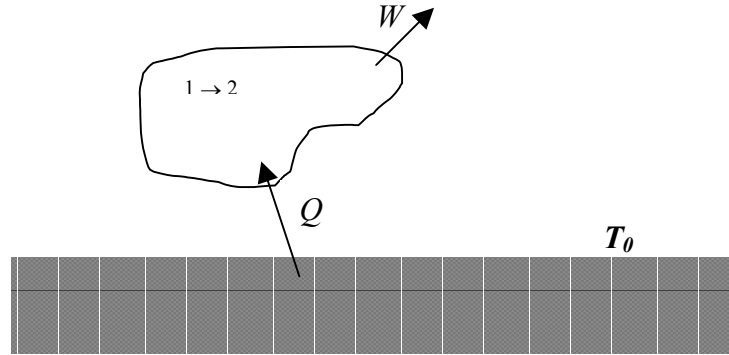


Figura 37 – Diagrama de um sistema termodinâmico que realiza trabalho a partir do absorção de calor proveniente de um ambiente na temperatura T_0

A partir da Primeira Lei da Termodinâmica temos:

$$Q = U_2 - U_1 + W \quad (18)$$

Onde U é a energia interna do sistema⁴⁵. A mudança de entropia do sistema é $\Delta S_{\text{sis}} = S_2 - S_1$, e a do ambiente é $\Delta S_{\text{amb}} = -Q/T_0$. A mudança total do sistema e do ambiente se torna então:

$$\Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_{\text{sis}} + \Delta S_{\text{amb}} = S_2 - S_1 - Q/T_0 \quad (19)$$

Substituindo Q , obtém-se:

$$W = U_1 - U_2 - T_0(S_1 - S_2) - T_0\Delta S_{\text{tot}} \quad (20)$$

A mudança total de entropia em sistemas isolados, de acordo com a Segunda Lei, é sempre positiva, portanto temos que $\Delta S_{\text{tot}} > 0$, que chamaremos de *produção entrópica*. O trabalho máximo que pode ser extraído do sistema, na passagem do estado 1 para o estado 2, é dado para um processo reversível, no qual a produção entrópica seja nula. Sendo assim, o máximo trabalho obtido, ou seja, a exergia **B** do sistema é expressa por:

$$B = U_1 - U_2 - T_0(S_1 - S_2) \quad (21)$$

⁴⁵ O termo *energia interna* é usado para designar a soma da *energia química potencial* associada às forças interatômicas e a *energia cinética* associada ao movimento molecular. A energia interna de um sistema é inteiramente determinada pelos estados inicial e final e não depende dos estágios intermediários (o caminho) do processo.

Combinando as duas equações anteriores, chega-se à seguinte equação:

$$W = B - T_0 \Delta S_{\text{tot}} \quad (22)$$

Para um processo irreversível ($\Delta S_{\text{tot}} > 0$), a produção de entropia $T_0 \Delta S_{\text{tot}}$ corresponde a uma perda de trabalho disponível, ou seja, a uma perda de exergia:

$$W_{\text{perdido}} = B_{\text{perdida}} = T_0 \Delta S_{\text{tot}} \quad (23)$$

Ou seja, a perda de exergia no processo é igual à temperatura do ambiente multiplicada pela produção entrópica⁴⁶.

IV.2 O Balanço de Exergia

Uma vez que o estado do sistema referência é dado, qualquer fluxo de energia ou material pode ter seu conteúdo exergético calculado. O uso de exergia como uma medida de recursos, produtos e resíduos demanda uma definição apropriada do sistema referência. A exergia física leva em consideração gradientes de pressão e temperatura entre o sistema e o ambiente. A exergia química considera os componentes de reação e de concentração. Szargut et al. (1988) propuseram um método e calcularam a exergia de centenas de compostos⁴⁷. As exergias químicas dos fluxos envolvidos na produção de aço foram calculadas usando tais tabelas e dados de composição, isto é, as frações em massa de cada componente dos recursos, produtos e resíduos (ver Anexo A).

Dadas as exergias químicas e físicas de energéticos e materiais de cada etapa de produção, podemos calcular as perdas exergéticas de acordo com o seguinte balanço de exergia, mostrado esquematicamente na Figura 38.

⁴⁶ Esta formulação é conhecida como a Lei de Gouy-Stodola (Szargut et al., 1988 e Gong e Wall, 1997).

⁴⁷ O ambiente é constituído pela atmosfera, os oceanos e a crosta terrestre tomados separadamente. Algumas questões conceituais e práticas surgem com qualquer definição do ambiente. Para uma discussão mais detalhada, ver (Ahrendts, 1980; Brodyansky et al., 1994; Ayres et al., 1996)

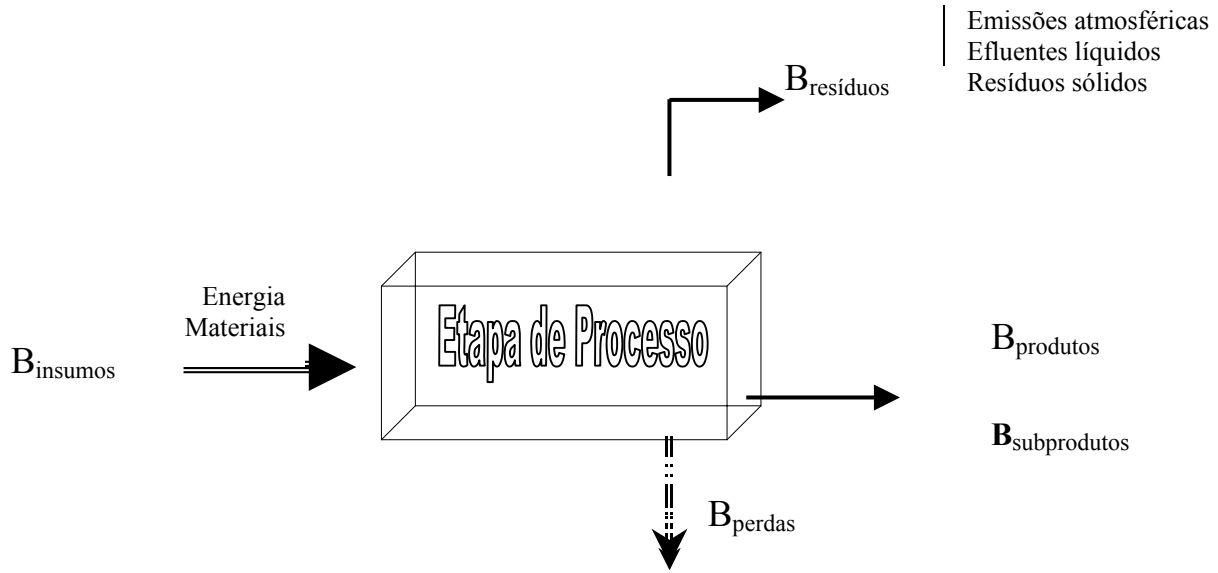


Figura 38 - Balanço exergético para uma etapa de processo, representando qualquer sistema industrial, como uma etapa de processo industrial, uma planta de produção ou uma cadeia de produção de um produto referência.

$$B_{\text{insumos}} = B_{\text{produtos}} + B_{\text{perdas}} + B_{\text{resíduos}} \quad (24)$$

O somatório das exergias dos recursos é designado por B_{insumos} . O produto principal e os sub-produtos estão incluídos em B_{produtos} . A exergia embutida nas emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos é denotada por $B_{\text{resíduos}}$. O termo B_{perdas} inclui irreversibilidades e parte da exergia de saída que não é utilizada⁴⁸. Notar que a diferença entre resíduos e sub-produtos é arbitrariamente escolhida, pois pode mudar à medida que os resíduos passam a ser utilizados como sub-produtos. No caso das perdas exergéticas, o balanço indica:

$$B_{\text{perdas}} = B_{\text{insumos}} - B_{\text{produtos}} - B_{\text{resíduos}} \quad (25)$$

Definimos três eficiências Ψ , que podem ser expressas em percentuais, discutidas em seguida:

⁴⁸ Ainda não há uma nomenclatura padrão para este balanço. Ao invés de perdas exergéticas, alguns autores preferem a expressões como destruição de exergia e consumo de exergia (Bisio, 1993; Michaelis et al., 1998). Os autores normalmente se referem à perdas exergéticas como exergia destruída mais os resíduos.

$$\Psi_1 = (B_{\text{produtos}} + B_{\text{resíduos}}) / B_{\text{insumos}} \quad (26)$$

$$\Psi_2 = B_{\text{produtos}} / B_{\text{insumos}} \quad (27)$$

$$\Psi_3 = B_{\text{produto principal}} / B_{\text{insumos}} \quad (28)$$

O complemento de Ψ_1 (isto é, $1 - \Psi_1$) indica a fração da exergia dos insumos que é perdida. Por exemplo, se Ψ_1 for igual a 0,65, significa que 35% da exergia dos insumos foi perdida, o que inclui a exergia dos resíduos. O símbolo Ψ_2 indica a fração da exergia dos insumos aproveitada na forma de produtos e subprodutos. E o índice Ψ_3 , por sua vez é relacionado apenas à fração da exergia dos insumos aproveitada como produto principal. A eficiência Ψ_1 é sempre maior que a eficiência Ψ_2 , a qual é igual ou maior que a eficiência Ψ_3 . A comparação entre Ψ_2 e Ψ_3 oferece uma indicação da contribuição de uma etapa de processo específica para a cadeia de produção.

No caso dos sistemas de produção de aço, o aproveitamento de subprodutos, como GAF e GCO, é essencial para obter níveis mais elevados de eficiência exergética nas plantas siderúrgicas, enquanto outros subprodutos como escórias, amônia e alcatrão podem ser usados em outros setores industriais. Na perspectiva do nosso estudo, Ψ_2 é o mais apropriado índice de eficiência para comparar processos de produção de aço porque considera os produtos e subprodutos como saídas de exergia utilizável e deduz a parcela da exergia perdida em resíduos não aproveitados. Foram considerados três processos os mesmos processos e os mesmos valores expressos nas matrizes de coeficientes técnicos A apresentados no capítulo anterior (ver Tabela 41, Tabela 42, Tabela 43 e Tabela 44).

IV.3 Resultados

Os fluxos de energia e materiais para cada etapa de produção foram utilizados no inventário exergético de cada etapa. As exergias foram calculadas com base no método descrito anteriormente (ver Anexo B). Como mostrado na Figura 38, as entradas foram desagregadas em energia e materiais, enquanto as saídas foram contabilizadas como produtos (produto principal e sub-produtos) e resíduos (emissões atmosféricas, efluentes líquidos e

resíduos sólidos). O balanço e a eficiência de exergia de algumas etapas de produção são mostradas na Figura 39. A Tabela 51, a Tabela 51, a Tabela 53 e a Tabela 54 mostram as perdas exergéticas para as rotas de produção analisadas. É importante observar mais uma vez que os resultados finais dependem dos parâmetros escolhidos para cada rota de produção.

A rota de produção semi-integrada apresenta as mais baixas perdas exergéticas entre as quatro rotas examinadas. A geração de eletricidade e o forno elétrico a arco são responsáveis pela maior parte das perdas exergéticas. Os resultados para a rota integrada convencional e a integrada com fusão redutora (COREX-Aciaria a oxigênio) são equivalentes, e dependem fundamentalmente das eficiências exergéticas do Alto-forno e da planta COREX, assim como da carga de materiais na aciaria. Apesar das grandes vantagens com relação aos custos iniciais e emissões para o meio ambiente das plantas integradas com fusão redutora, as perdas exergéticas são altas, com elevado consumo de carvão. O gás de exportação COREX é usado para produzir eletricidade em uma planta de ciclo combinado com eficiência de 48%. Parte da eletricidade produzida é utilizada em outras unidades de produção na planta siderúrgica, como a planta de oxigênio. O gás COREX pode servir também para consumo em plantas de redução direta (produção de ferro-esponja), para produção de gás de síntese e aquecimento em outras unidades (Eberle et al., 1997). Portanto, o crédito exergético do gás de exportação COREX é contabilizado como um subproduto para outra aplicação qualquer. Na rotas que incluem COREX, as perdas exergéticas são maiores para aquela com forno elétrico a arco do que com aciaria a oxigênio devido ao maior consumo de eletricidade e também pelas maiores perdas na geração de eletricidade.

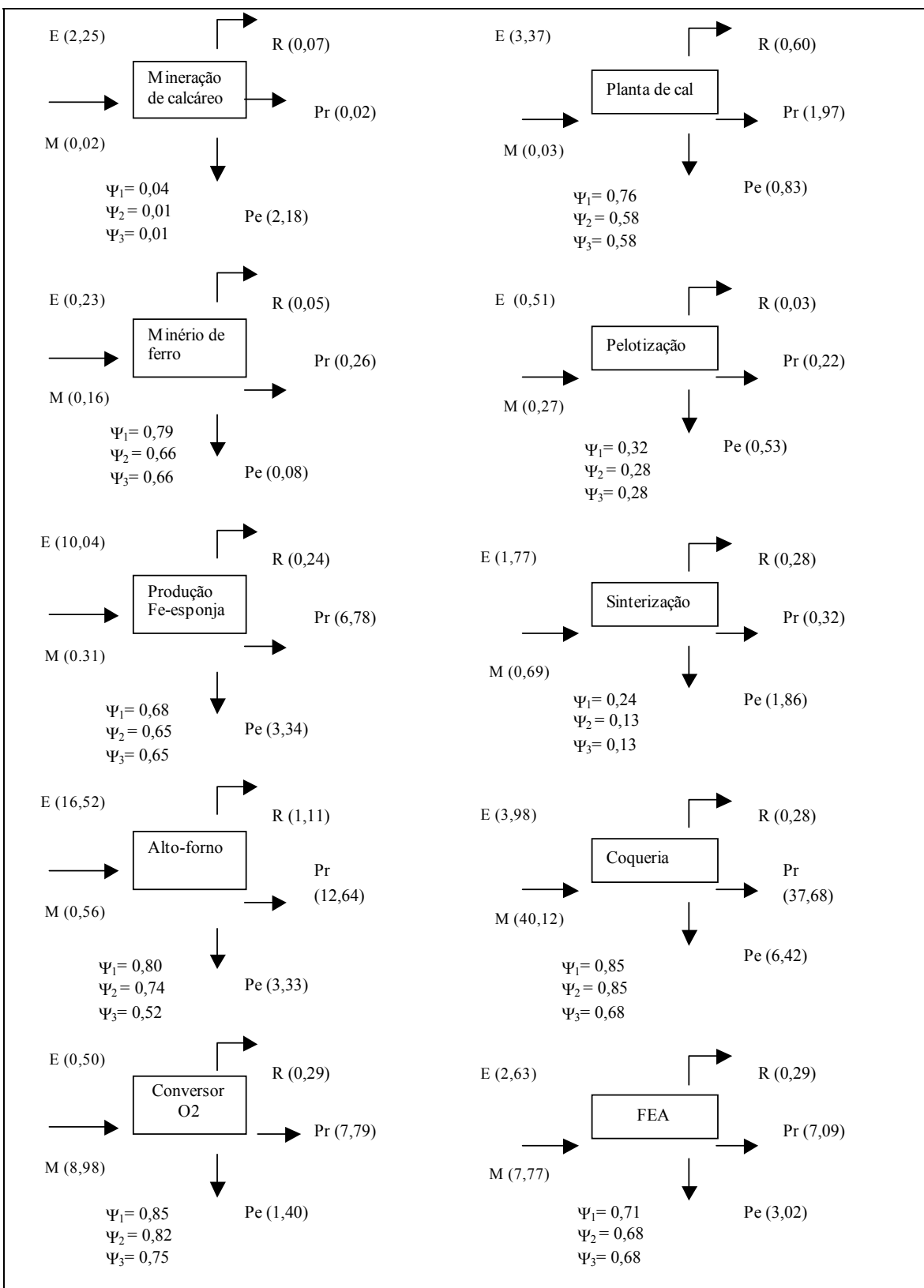


Figura 39 - Balanço exergetico para etapas de produção selecionadas (GJ/unidade de produto). E-energia; M-materiais; R-resíduos (emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos); Pr- produtos e sub-produtos; Pe-perdas.

Tabela 51 – Perdas de exergia para as etapas de produção da rota Integrada Convencional (Caso Base)

INTEGRADA CONVENCIONAL				
	unidade de produto	Perda de exergia MJ/ unidade de produto	Insumos unidade/ton aço líquido	Perda de exergia GJ/ton aço líquido
Calcáreo	toneladas	2179	0,432	0,94
Cal	toneladas	830	0,055	0,05
Min. Ferro	toneladas	83	1,633	0,14
Óleo Comb.	toneladas	0	0,034	0,00
Gás natural	m3	3	44	0,14
Elettricidade	kWh	6,7	223	1,49
Oxigênio	m3	2	85	0,19
Pelotas	toneladas	533	0,381	0,20
Sínter	toneladas	1858	1,132	2,10
Carvão	toneladas	199	0,657	0,13
Coque	toneladas	6423	0,408	2,62
Sucata	toneladas	0	0,124	0
Ferro-gusa	toneladas	3332	0,976	3,25
Aciaria O2	toneladas	1399	1,000	1,40
Perda total de exergia				12,66

Nota: Perdas exergéticas da produção de óleo combustível e da etapa de transporte de sucata não são consideradas.

Tabela 52 – Perdas de exergia para as etapas de produção da rota semi-integrada com forno elétrico a arco (Caso Base)

SEMI-INTEGRADA (FORNO ELÉTRICO A ARCO)				
	unidade de produto	Perda de exergia MJ/ unidade de produto	Insumos unidade/ton aço líquido	Perda de exergia GJ/ton aço líquido
Calcáreo	toneladas	2179	0,103	0,23
Cal	toneladas	830	0,045	0,04
Min. Ferro	toneladas	83	0,000	0,00
Óleo Comb.	toneladas	0	0,007	0,00
Gás natural	m3	3	27	0,09
Elettricidade	kWh	6,7	554	3,70
Oxigênio	m3	2	20	0,05
Pelotas	toneladas	533	0,000	0,00
Carvão	toneladas	199	0,160	0,03
Sucata	toneladas	0	1,050	0,00
Ferro-esponja (DRI)	toneladas	3338	0,000	0,00
Aciaria Elétrica	toneladas	3022	1,000	3,02
Perda total de exergia				7,15

Nota: Perdas exergéticas da produção de óleo comb. e da etapa de transporte de sucata não são consideradas.

Tabela 53 – Perdas de exergia para as etapas de produção da rota integrada com fusão redutora (COREX-aciaria a oxigênio) no Caso Base

INTEGRADA COM FUSÃO REDUTORA (COREX E ACIARIA A OXIGÊNIO)				
	unidade de produto	Perda de exergia MJ/ unidade de produto	Insumos unidade/ton aço líquido	Perda de exergia GJ/ton aço líquido
Calcáreo	toneladas	2179	0,381	0,83
Cal	toneladas	830	0,062	0,05
Min. Ferro	toneladas	83	1,028	0,09
Óleo Comb.	toneladas	0	0,032	0,00
Gás natural	m3	3	18	0,06
Eletricidade	kWh	4,4	368	1,62
Oxigênio	m3	2	453	1,03
Pelotas	toneladas	533	0,671	0,36
Carvão	toneladas	199	0,818	0,16
Sucata	toneladas	0	0,380	0,00
Ferro-esponja (DRI)	toneladas	3338	0,000	0,00
COREX	toneladas	12273	0,72	8,84
Aciaria a oxigênio	toneladas	1894	1,000	1,89
Perda total de exergia				14,93

Tabela 54 – Perdas de exergia para as etapas de produção da rota integrada com fusão redutora (COREX-aciaria elétrica FEA) no Caso Base

INTEGRADA COM FUSÃO REDUTORA (COREX E ACIARIA ELÉTRICA)				
	unidade de produto	Perda de exergia MJ/ unidade de produto	Insumos unidade/ton aço líquido	Perda de exergia GJ/ton aço líquido
Calcáreo	toneladas	2179	0,385	0,84
Cal	toneladas	830	0,073	0,06
Min. Ferro	toneladas	83	1,327	0,11
Óleo Comb.	toneladas	0	0,033	0,00
Gás natural	m3	3	137	0,44
Eletricidade	kWh	4,4	652	2,87
Oxigênio	m3	2	366	0,84
Pelotas	toneladas	533	1,042	0,56
Carvão	toneladas	199	0,755	0,15
Sucata	toneladas	0	0,165	0,00
Ferro-esponja (DRI)	toneladas	3338	0,352	1,17
COREX	toneladas	12273	0,583	7,16
Aciaria Elétrica	toneladas	2645	1,000	2,64
Perda total de exergia				16,83

As plantas semi-integradas são as que apresentam maior eficiência exergética, $\Psi_2 = 68\%$, enquanto as Integradas COREX com aciaria a oxigênio perfazem $\Psi_2 = 52\%$, e para as Integradas Convencionais $\Psi_2 = 49\%$. As integradas COREX com aciaria FEA são as de menor eficiência exergética, com $\Psi_2 = 44\%$ (Tabela 55).

Tabela 55 – Eficiências exergéticas e perdas de exergia para rotas e plantas de produção distintas

		Integrada convencional	Semi-integrada	Integrada COREX-Ac.O2	integrada COREX-FEA
Plantas siderúrgicas	Eficiência exergética Ψ_1	0,57	0,71	0,58	0,50
	Eficiência exergética Ψ_2	0,49	0,68	0,52	0,44
	Eficiência exergética Ψ_3	0,30	0,68	0,25	0,29
	Perdas de exergia (GJ/ton aço líquido)	10,6	3,0	13,1	13,0
Rota de produção	Perdas de exergia (GJ/ton aço líquido)	12,7	7,2	14,9	16,8

Nota: etapas de Lingotamento, Laminação e Acabamento do aço não foram consideradas (ver IV.4)

As diferenças entre Ψ_2 e Ψ_3 indicam a importância da utilização da exergia dos subprodutos para cadeias de produção de aço. Caso consideremos apenas os produtos principais de cada etapa, as eficiências exergéticas são menores, o que mostra como subprodutos sólidos, líquidos e gasosos aumenta a eficiência total das plantas industriais. A diferença entre a exergia perdida somente nas plantas siderúrgicas e aquela perdida na cadeia mais completa de produção demonstra a influência das etapas de produção a montante para os resultados finais de perda exergética.⁴⁹

IV.4 Análise de sensibilidade

Os parâmetros de processo foram modificados para avaliar a sensibilidade dos resultados finais de perdas e eficiências exergéticas, e assim faixas de perdas de exergia e eficiências exergéticas foram obtidas. Os valores relativos são mais importantes para a

⁴⁹ A contribuição de outras etapas como transporte de materiais e as que incluem outros insumos não é apresentada neste ponto.

comparação do que os valores absolutos, pois outras etapas de produção como transporte de materiais, lingotamento, laminação e acabamento não foram consideradas.

Para as rotas de produção integrada convencional e semi-integrada, os parâmetros foram modificados considerando plantas de maior e menor eficiências energéticas e com diferentes fatores de emissão de poluentes. Para as integradas COREX a maior mudança não está relacionada às plantas COREX, pois usamos os mesmos valores para o consumo de carvão e geração específica de gás de exportação, mas sim às cargas de sucata, metal COREX e ferro-esponja nas aciarias, que influenciam o consumo de energia elétrica e oxigênio e as perdas de exergia por tonelada de aço.

A variação na composição química dos insumos, produtos e resíduos representa apenas uma pequena fração das perdas de exergia, com exceção do carvão que apresenta grandes variações de exergia de acordo com a composição. Pequenas diferenças nos valores de consumo e exergia dos carvões ocasionam grandes variações nos resultados finais. Os carvões foram divididos em três tipos, o carvão coqueificável, o carvão-vapor para a geração de energia elétrica e o carvão não-coqueificável para a planta COREX, entre outras etapas de produção. A quantidade e composição do gás de exportação COREX depende do consumo e composição do carvão utilizado. Uma ampla faixa de carvões pode ser utilizada em processos COREX.

IV.4.1 Rota de produção Integrada Convencional

Plantas integradas convencionais com unidades de produção ineficientes podem apresentar perdas exergéticas tão altas quanto 17 GJ por tonelada de aço líquido. A larga faixa de perdas de exergia para as rotas de produção, que podem chegar aos 20 GJ por tonelada de aço líquido, reflete a grande variedade de idade e tipo de plantas, acarretando uma grande variação nas eficiências. As plantas mais eficientes revelam perdas exergéticas equivalentes às apresentadas pelas plantas COREX. A faixa poderia ser ainda maior se fossem consideradas plantas siderúrgicas muito ineficientes com equipamento antigo.

IV.4.2 Rota de produção semi-integrada

Plantas siderúrgicas com alto consumo específico de eletricidade, que por sua vez tenha sido gerada em termoelétricas a carvão ineficientes, podem elevar as perdas de exergia da rota de produção para cerca de 10 GJ por tonelada de aço líquido. Portanto, a eficiência das plantas geradoras de energia elétrica afeta sensivelmente os resultados para a rota semi-integrada. Para a planta siderúrgica somente, o consumo de eletricidade é o fator principal, mas para a rota de produção as cargas de sucata e ferro-esponja também são importantes. A tendência de maior participação do ferro-esponja no forno elétrico leva a um aumento das perdas exergéticas da rota semi-integrada, pois além do maior consumo de energia elétrica no forno, devem ser contabilizadas as perdas da produção de ferro-esponja, e as perdas da produção de seus insumos, como pelotas, minério de ferro. Na Tabela 56 são mostrados os resultados para as simulações das perdas exergéticas da rota de produção semi-integrada.

Tabela 56 - Perdas de exergia da rota de produção semi-integrada conforme a carga metálica no forno elétrico e o tipo de geração de energia elétrica

	Carga no Forno Elétrico	Geração de energia elétrica	Perdas de exergia (GJ/t aço líq.)
1	100% sucata	100% Hidroelétrica	3,67
2	18% DRI e 82% sucata	100% Hidroelétrica	4,82
3	100% sucata	Mix do Caso Base	7,15
4	60% DRI e 40% sucata	100% Hidroelétrica	8,22
5	18% DRI e 82% sucata	Mix do Caso Base	8,54
6	60% DRI e 40% sucata	Mix do Caso Base	13,19

A opção de menor perda exergética envolve 100% de sucata e geração hidroelétrica, seguida da segunda opção que inclui 18% de ferro-esponja, que se constitui em um percentual que representa a crescente participação deste metálico nos fornos elétricos em substituição à sucata. À medida que esta participação aumenta, as perdas exergéticas também aumentam. As opções 3, 4 e 5 formam um bloco intermediário em que a combinação dos dois fatores levam a perdas exergéticas similares. O caso extremo da opção 6 é relevante pois constitui uma tendência para as siderúrgicas semi-integradas. Neste caso, as perdas exergéticas podem ser bastante elevadas, até maiores que a rota integrada.

IV.4.3 Rota de produção integrada com fusão redutora COREX

A flexibilidade na carga de materiais é menor para a rota COREX-Aciaria a oxigênio do que para COREX-FEA. Usando diferentes cargas de sucata, metal-COREX e ferro-esponja resulta em maiores faixas de perdas de exergia. Como as perdas de exergia na etapa COREX são muito altas, menores cargas de metal COREX no forno elétrico a arco, resultam em menores perdas de exergia por tonelada de aço líquido, mesmo considerando fornos eficientes, de baixo consumo específico de energia elétrica. Os processos de fusão redutora COREX são recentes e as plantas operam com alto aproveitamento do gás de exportação COREX. Isso é um dos fatores que explica a pequena faixa para as eficiências exergéticas, como mostrado na Figura 40. Se outros parâmetros, como o consumo de carvão, fossem modificados, as faixas seriam maiores. Para as três figuras abaixo, os pontos assinalados entre os extremos de cada faixa representam valores para o Caso Base.

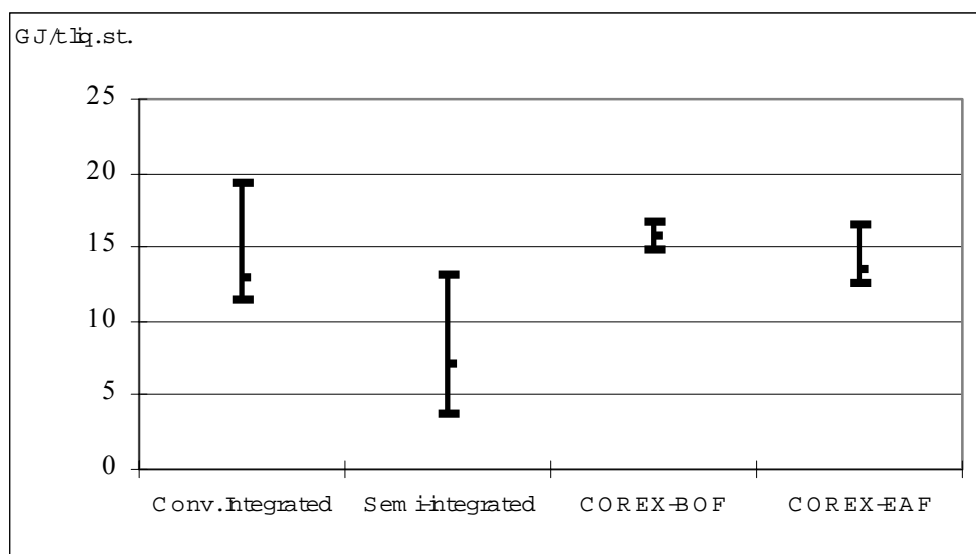


Figura 40 – Faixas de perdas de exergia para as rotas de produção selecionadas (GJ/ ton de aço líquido)

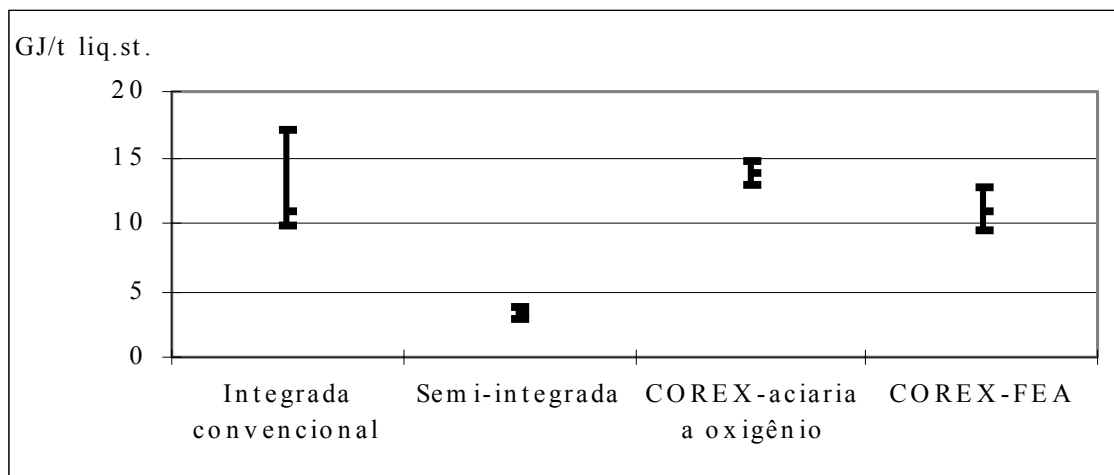


Figura 41 – Faixas de perdas de exergia para plantas siderúrgicas selecionadas (GJ/ ton de aço líquido)

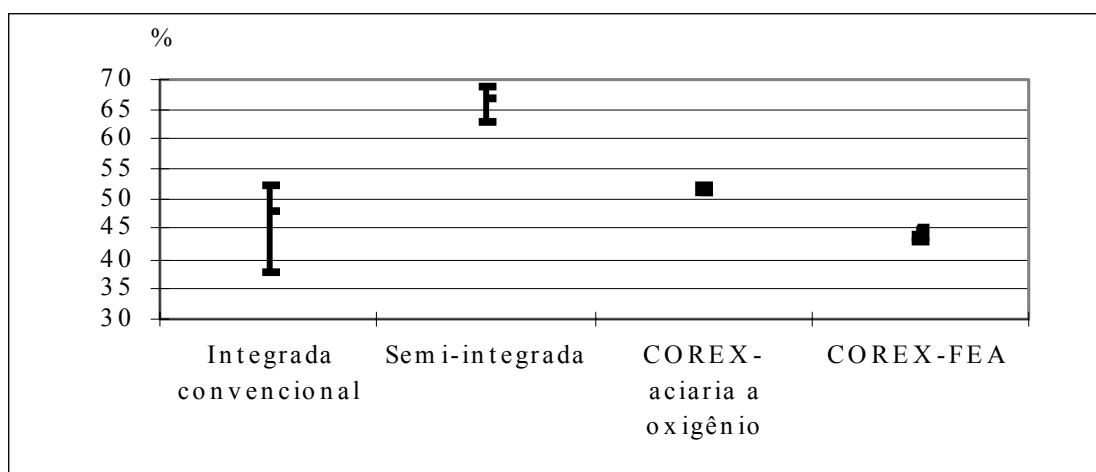


Figura 42 – Faixas de eficiências exergéticas Ψ_2 para plantas siderúrgicas somente (%)

IV.5 Discussão dos resultados

Vários autores realizaram análises exergéticas de processos de produção de aço. Algumas características e resultados destes estudos são mostrados na Tabela 57. Embora usem a mesma metodologia, os estudos variam em escopo. Portanto a comparação entre eles só pode ser feita respeitando tais diferenças. De qualquer modo, podemos notar resultados similares quanto às perdas de exergia para os que apresentam as mesmas fronteiras de sistema.

Masini e Ayres (1996) destacam a importância do inventário exergético como ferramenta para uma contabilidade comum para recursos e resíduos. Beer et al. (1998) calculam as perdas de exergia por tonelada de aço laminado da planta de referência do *International Iron and Steel Institute*. Se as perdas de exergia associadas às etapas de lingotamento e laminação são excluídas, os resultados se situam na base da faixa das plantas integradas de nosso trabalho, como mostrado na Figura 41, o que indica se tratar de uma planta eficiente.

O estudo de Michaelis et al. (1998) realiza um inventário exergético do ciclo de vida do aço produzido pelas siderúrgicas do Reino Unido. As perdas de exergia são mais altas do que as do presente trabalho, em razão da inclusão das etapas de lingotamento, laminação e transporte de materiais. As modalidades de Transporte de ferro e carvão respondem cada uma por uma perda de exergia em volta de 1 GJ/t aço laminado; para o Lingotamento Contínuo, 0,8 GJ, e para as outras etapas, incluindo Laminação, um montante de 3,8 GJ/ton aço.

Tabela 57 - Descrição de estudos selecionados de inventário exergético de sistemas de produção de aço

	Masini e Ayres (1996)	Beer et al. (1998)	Michaelis et al. (1998)	Presente estudo
Escopo	Indústria de aço EUA (1988)	Planta de referência IISI (1996)	Indústria de aço Reino Unido (1994)	Plantas dentro de faixas
Processos	Combinação BOF (53%), FEA (33%), fundição (9%), e OHF (5%)	Integrada convencional	Combinação de rota BOF (75%) e rota FEA (25%)	Rotas de produção BOF, FEA e COREX
Fronteiras do sistema	ICV incluindo plantas siderúrgicas (produto lingote de aço) e mineração de ferro	Planta siderúrgica (produto acabado e geração de eletricidade e vapor)	ICV incluindo plantas siderúrgicas (produto acabado), mineração de ferro e carvão, transporte de materiais, plantas de oxigênio e eletricidade	ICV incluindo plantas siderúrgicas (aço líquido), mineração de ferro, calcário e carvão, plantas de oxigênio e eletricidade
Desagregação da exergia	Insumos, emissões (ar e água), produtos, perdas, e resíduos sólidos	Insumos, produtos e perdas (externas e internas)	Insumos, produtos, consumo de exergia e resíduos	Insumos, emissões (ar e água), produtos, perdas, e resíduos sólidos
Perdas de exergia	12,4 GJ/ton lingote de aço	11,6 GJ/ton aço laminado a quente	19,0 GJ/ton aço acabado, sendo que 22,0 GJ/ton aço p/ integradas e 8,6 GJ/ton aço p/ semi-integradas	Ver Tabela 55 e Figuras 40-42

Portanto, podemos considerar um acréscimo de 4-5 GJ por tonelada de aço acabado (excluindo Transporte) aos valores de perdas exergéticas por tonelada de aço líquido obtidos para cada uma das rotas de produção. Se para 1 tonelada de aço laminado são necessários 1,08 tonelada de aço líquido, os valores finais para a rota integrada atingem 17-18 GJ por tonelada

de aço laminado, que se forem somados às perdas de transporte, atingem 19-20 GJ por tonelada de aço acabado.

Utilizando análise insumo-produto, Lenzen e Dey (2000) calcularam que o conteúdo energético para o setor siderúrgico da Austrália era de 40 GJ/t de aço, o que incluía os equipamentos e etapas de produção a montante da cadeia. De acordo com os autores, as fronteiras tipicamente usadas em ICV convencionais baseadas em análise de processo cobrem apenas 65% do total de energia necessária para a produção de aço.

O ICV exergético mostra que a exergia embutida nas emissões e resíduos representa apenas uma pequena parcela do total de exergia de saída para os sistemas de produção de aço considerados (ver Figura 39 e Tabela 58). Embora os valores de exergia não possam medir adequadamente a toxidez dos poluentes, em níveis mais agregados podem mostrar, do ponto de vista da eficiência exergética, a importância da prevenção da poluição e da coleta e controle para reciclagem, por exemplo, de pós e lamas. A quantidade em massa do total de resíduos sólidos advindos de plantas semi-integradas é menor do que dos outros processos. No entanto, os pós e lamas FEA são rejeitos perigosos que contêm zinco e chumbo, o que resulta em maiores problemas para a reciclagem.

O peso maior dos resultados finais não recai sobre os valores de exergia de poluentes específicos, mas sim sobre o volume de poluentes rejeitado para o ambiente, como pode ser observado na Tabela 59, nas quais os valores de exergia para as emissões atmosféricas e efluentes líquidos são mostrados para a rota de produção integrada convencional.

As perdas de exergia ajudam a indicar as oportunidades de melhoria de aproveitamento dos insumos, sub-produtos e resíduos não apenas nas plantas siderúrgicas mas também nas etapas de produção a montante, assim como apontar áreas prioritárias para ganhos de eficiência. A comparação das perdas de exergia e eficiências exergéticas entre etapas de produção de aço revela algumas características dos processos. É interessante observar as baixas eficiências exergéticas das etapas de pelotização e sinterização. A preparação do minério de ferro efetuada nestas etapas constitui um fator primordial para a alta eficiência operacional e exergética da etapa posterior nos Alto-fornos. Na Tabela 60 e na Tabela 61 são mostrados, respectivamente, o inventário exergético dos subprodutos da coqueria e de resíduos sólidos em Alto-forno e aciaria a oxigênio.

Os valores de exergia das saídas (produto, subprodutos, emissões e resíduos sólidos) são mostrados na Tabela 58. Para as plantas siderúrgicas integradas e semi-integradas, os maiores valores exergéticos das saídas se referem ao aço e às perdas. Para as primeiras, considera-se uma alta utilização dos gases GAF, GCO e GAC nas próprias unidades, sem crédito para exportação para outras plantas industriais. Quanto às siderúrgicas de fusão redutora, o gás COREX é utilizado na própria unidade, principalmente para geração de energia elétrica e vapor, e ainda sobra um crédito para exportação, que por sua vez é contabilizado como subproduto.

Atualmente, as tendências tecnológicas da siderurgia mundial apontam para plantas mais compactas e flexíveis. Novas tecnologias eficientes estão emergindo, como novos processos de fusão redutora, lingotamento de tiras finas, aciaria a baixas temperaturas, recuperação de calor a altas temperaturas e processos avançados de fusão de sucata (Beer et al., 1998).

Tabela 58 – Valores exergéticos de saída para plantas siderúrgicas selecionadas

	Integrada		semi-integrada		Integradas fusão redutora		Integradas fusão redutora	
	convencional				COREX-Aciaria O2		COREX-FEA	
EXERGIA	GJ/ton aço líq.	%	GJ/ton aço líq.	%	GJ/ton aço líq.	%	GJ/ton aço líq.	%
Aço líquido ^a	7,1	35,0	7,1	68,7	7,1	24,0	7,1	28,1
Subprodutos	0,8	3,8	0	0	7,9	26,7	3,7	14,6
Emissões (ar e água)	0,9	4,5	0,04	0,4	0,4	1,4	0,4	1,6
Resíduos sólidos ^b	0,9	4,5	0,2	1,9	1,2	4,1	1,1	4,3
Perdas de exergia	10,6	52,2	3,0	29,0	13,1	43,8	13,0	51,4
Total ^c	20,3	100,0	10,3	100,0	29,5	100,0	25,3	100,0

^a Somente exergia química

^b Total de resíduos sólidos, incluindo os reciclados na planta siderúrgica, reciclados em outros setores e materiais depositados

^c Total de entradas = Total de saídas + perdas

O processo de fusão redutora COREX é o único operando em escala comercial no mundo. Mesmo considerando as futuras melhorias do processo, pode-se verificar as altas perdas de exergia associadas às altas temperaturas. Processos de fusão redutora eliminam a

necessidade de etapas de coqueificação, assim como podem prescindir no futuro das etapas de aglomeração de minérios, pois já se pesquisa a utilização de minério de ferro diretamente na fusão redutora. Há inúmeras vantagens de custo e ambientais, mas a demanda por carvão e oxigênio é bastante elevada em comparação com as integradas convencionais (Beer et al., 1998; IISI, 1998).

IV.6 Conclusões

O inventário exergético de processos de produção oferece para a Ecologia Industrial uma visão integrada da organização dos ecossistemas industriais em termos físicos – o metabolismo industrial. Ao identificar as perdas e eficiências exergéticas dos sistemas de produção de aço, é possível caracterizar as etapas críticas de cada tipo de processo e avaliar em que sentido as tendências tecnológicas se coadunam com os princípios da Ecologia Industrial.

Mesmo considerando plantas siderúrgicas e de geração de energia elétrica ineficientes, as perdas de exergia são as menores para a rota de produção semi-integrada. Dependendo da eficiência energética de plantas específicas, as siderúrgicas integradas convencionais podem apresentar perdas de exergia menores que as integradas COREX. Mesmo assim, as eficiências exergéticas Ψ_1 and Ψ_2 para plantas COREX-Aciaria a oxigênio são maiores do que as plantas integradas convencionais eficientes. É importante notar a baixa eficiência exergética das integradas COREX-FEA comparada às outras, mesmo com taxas de recuperação elevadas do gás COREX.

As perdas de exergia das etapas de produção a montante são menores do que às das plantas siderúrgicas, no caso das integradas convencionais. Este não é o caso das plantas semi-integradas, para as quais a eletricidade é gerada fora da planta. Como foi visto na análise de sensibilidade, as perdas de exergia totais para a rota semi-integrada depende fortemente da eficiência exergética na geração de energia elétrica. Caso esta seja muito baixa, com perdas exergéticas mais elevadas, a eficiência da rota de produção semi-integrada é reduzida. Este é o caso mais evidente de como uma alta eficiência em determinada unidade do ecossistema industrial pode ser contrabalançada por uma baixa eficiência em outra unidade, proporcionando um desempenho do todo abaixo do que se fosse considerado apenas a unidade eficiente. Todavia, como vimos na Figura 40, mesmo nessas condições, a rota de produção

semi-integrada apresenta menores perdas exergéticas que as outras rotas, e se configura como o processo mais eficiente em termos exergéticos. Portanto, do ponto de vista da Ecologia Industrial, o processo semi-integrado com fornos elétricos operando com carga de sucata metálica – eficiente no controle e prevenção de poluentes atmosféricos e líquidos, com alto índice de reciclagem dos resíduos sólidos – e com geração de energia elétrica renovável e de alta eficiência exergética, como no caso das hidroelétricas⁵⁰, se constitui no processo mais próximo do modelo de ecossistema industrial com fechamento do ciclo de materiais e baixa produção entrópica.

Nosso trabalho confirmou as mais citadas limitações da análise exergética quando aplicada ao inventário de sistemas industriais em níveis mais agregados. A contabilidade exergética não oferece uma resposta para todos os aspectos dos fluxos de materiais, como a toxidez dos poluentes, por exemplo. No entanto, o inventário exergético oferece informação adicional em níveis agregados pois mede energia e materiais em uma mesma base. Em particular, o ICV de exergia pode identificar alguns prós e contras característicos das diversas opções tecnológicas dos sistemas de produção de ferro e aço.

A Tabela 59 apresenta os valores de exergia para emissões atmosféricas e efluentes líquidos para a rota de produção convencional. Os fatores de emissão em massa são valores médios para cada etapa de produção, como mostrado no capítulo II, e de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela 41. Os fatores de emissão variam conforme as tecnologias de controle e prevenção de poluição empregadas e o tipo e quantidade dos insumos materiais e energéticos, o que resulta em diferentes valores de exergia. No entanto, a questão aqui é comparar os resultados agregados de exergia para emissões com outros fluxos exergéticos, a saber, os insumos, produtos e perdas.

⁵⁰ As usinas hidroelétricas bem dimensionadas, com alto índice de quilowatt instalado por área inundada, são a referência neste caso. No entanto, como já foi alertado, a análise exergética não capta todos os fatores condicionantes da sustentabilidade sócio-ambiental. Na verdade, as hidroelétricas também apresentam impactos ambientais consideráveis, como o deslocamento de populações e as emissões de metano.

Tabela 59 – Valores específicos e totais de exergia para emissões atmosféricas e efluentes líquidos selecionados para uma planta integrada convencional.

Emissões atmosféricas	Exergia kJ/g de poluente	Emissões ^c g/ton aço líquido	Exergia total MJ/ton aço líquido
Material particulado ^a	7,878	932	7
SO ₂	4,892	1502	7
NO _x	1,209	1057	1
CO	9,821	25x10 ³	243
CO ₂	0,451	1430x10 ³	645
VOC	42,239	278	12
H ₂ S	23,826	101	2
HCl	2,318	79	0,2
HF	3,999	26	0,1
PAH ^b	41,000	0,7	0,03
PCDD/F ^b	13,000	11x10 ⁻⁶	15x10 ⁻⁸
Benzeno	42,292	8	0,3
NH ₃	19,841	30	0,6
CH ₄	51,842	15	0,8
Exergia total nas emissões atmosféricas			920
Efluentes líquidos	Exergia kJ / g de poluente	Emissões ^c g / ton aço líquido	Exergia total MJ / ton aço líquido
TSS ^a	7,878	80	0,6
Amônia	19,841	10	0,2
Cloretos	1,341	1000	1,3
Fluoretos	2,829	10	0,03
Cianetos	32,478	2	0,1
Sulfetos	23,999	5	0,1
Fenóis	33,242	1,2	0,04
Óleos e graxas	37,450	50	1,9
Sulfatos	1,139	1000	1,1
Exergia total nos efluentes líquidos			5,3

^a Valores de exergia de material particulado e Total de Sólidos em Suspensão foram calculados usando a massa e os valores de exergia de pós TSS para cada etapa de produção.

^b Os valores de exergia de PAH (sigla em inglês para Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos) e PCDD/F (sigla em inglês para Dibenzo-p-dioxinas e furanos policlorinados) foram estimados com base nos seus constituintes principais.

^c O total de emissões foi calculado com base em fatores de emissão médios para cada etapa de produção.

É importante observar os valores específicos de exergia por massa para cada poluente, e também como os fatores de emissão por tonelada de aço líquido constituem o principal fator com respeito ao valor total de exergia embutida nos poluentes. Mesmo poluentes com valores elevados de exergia por unidade de massa, como benzeno, PAH, CH₄ and VOC, apresentam valores totais de exergia reduzidos. Do outro lado, temos o CO₂, cuja exergia é de valor baixo, mas devido aos elevados fatores de emissão envolvidos, os valores totais de exergia resultam elevados.

Tabela 60 – Valores de exergia específicos e totais para os sub-produtos da coqueria

Coqueria	Exergia	Sub-produtos ^a	Sub-produtos ^b	Exergia total
Sub-produtos	kJ/kg sub-produto	kg/ton coque	kg/ton aço líq.	MJ/ton aço líq.
Alcatrão	35000	40	16,32	571
Óleo leve (BTX)	35000	15	6,12	214
Naftaleno	41000	0,03	0,01224	1
Ácido sulfúrico	1666	7	2,856	5
Sulfato de amônia	4999	3	1,224	6
Exergia total nos sub-produtos da coqueria				797

^a Fatores de emissão para plantas de limpeza de GCO eficientes. Outros valores podem ser usados dependendo dos parâmetros de processo

^b Usando um fator de conversão de 0,408 tonelada de coque por tonelada de aço líquido.

Tabela 61 – Valores específicos e totais de resíduos sólidos gerados no Alto-forno e Aciaria a oxigênio

Resíduos sólidos	Exergia ^a	RS ^b	RS ^c	Exergia	depositado ^d	reciclagem	reciclagem	Exergia depósito	Ex recic. interna	Ex recic. externa
(RS)	kJ/kg RS	kg/ton prod.	kg/ton aço líq.	MJ/ton aço líq.		interna ^d	externa ^d	MJ/ton aço líq.	MJ/ton aço líq.	MJ/ton aço líq.
Escória AF	1612	300	293	472	2%	0%	98%	9	0	463
Escória aciaria O2	1479	132	132	195	26%	37%	37%	51	72	72
Pós AF	11546	12	12	135	33%	65%	2%	45	88	3
Pós aciaria O2	2139	4	4	9	12%	55%	33%	1	5	3
Lamas AF ^c	7505	5	5	37	33%	65%	2%	12	24	1
Lamas aciaria O2 ^c	1390	17	17	24	42%	51%	7%	10	12	2
Exergia total nos resíduos sólidos				871				128	201	543

^a Os valores de exergia para escórias, pós e lamas foram calculados usando dados de composição para cada resíduo sólido considerado (EC, 1996; EIPPCB, 1999).

^b Fatores típicos de geração de resíduos sólidos por tonelada de produto de cada etapa, por exemplo ferro gusa e aço líquido (EC, 1996; EIPPCB, 1999).

^c Usando como fator de conversão 0,963 toneladas de ferro-gusa por tonelada de aço líquido.

^d Percentuais de depósito, reciclagem interna e externa de e resíduos sólidos obtidos de EC (1996).

^e Considerando lamas com 35% de água.

Até agora foi possível inventariar os fluxos de energia e materiais e comparar os diferentes processos de produção de aço. A fronteira de tais sistemas estabelece, em analogia aos ecossistemas naturais, um ecossistema industrial em que as várias etapas de produção intercambiam energia e materiais, que por sua vez podem ser mensuradas pelas suas exergias. Vimos como a Ecologia Industrial propõe que os sistemas de produção reduzam suas perdas exergéticas e aumentem as eficiências exergéticas com base na redução do consumo de

energia e materiais, na prevenção da geração de poluentes e resíduos e na utilização dos rejeitos e subprodutos como insumos nas próprias plantas siderúrgicas ou em outras atividades econômicas. No próximo capítulo a abordagem da Ecologia Industrial deixa de ser voltada para a quantificação do metabolismo industrial, tal como fizemos nos três últimos capítulos para os sistemas de produção de aço. Voltamos aos ecossistemas industriais para estabelecer um novo conceito que a partir de uma base filosófica possa colocar em pauta e problematizar as questões da sustentabilidade ambiental do ponto de vista da Ecologia Industrial.

Capítulo V

ECOSSISTEMAS INDUSTRIAIS: DA ANALOGIA BIOLÓGICA À ECOPOLÍTICA

Este capítulo é voltado para a proposição de um conceito de ecossistema industrial. Não são variáveis nem modelos quantitativos que importam aqui, mas sim a elaboração de noções que possam lidar com certos aspectos das relações entre economia e meio ambiente em bases filosóficas. Sem escapar das indagações primeiras: o que é, quais são os determinantes, o que constitui um ecossistema industrial. Nosso intento é abordar conceitualmente em termos ontológicos o que denominamos de ecossistema industrial, e verificar como empresas, conjunto de empresas e economias regionais/globais são vistas sob o prisma dos ecossistemas industriais. Além disso, investigamos como os debates teóricos e as práticas da sustentabilidade se situam nesta abordagem.

Para discutir os ecossistemas industriais, a analogia fundadora da Ecologia Industrial nos oferece um ponto de partida: a possibilidade de definição de um sistema industrial por produto, material, processo, região, ou mesmo seguindo as interações mostradas pelos métodos de contabilidade do fluxo de materiais e de análise de ciclo de vida. No entanto, ecossistema industrial não se refere somente aos fluxos de energia e materiais que caracterizam o metabolismo industrial das cadeias de produção e consumo interconectadas, mas também às instituições sociais, expectativas individuais e corporativas, valores e conexões simbólicas, ou seja, aos aspectos econômicos e culturais envolvidos. Enfim, que ser é este que surge ao nos depararmos com essa multiplicidade de sistemas sócio-econômico-naturais, e o que pode nos dizer no tocante às implicações ético-políticas da sustentabilidade e sobre as questões ambientais de hoje e de amanhã?

A Ecologia Industrial estabelece um *telos* para a sustentabilidade calcado na transformação dos sistemas industriais tendo como modelo os ecossistemas naturais, com suas taxas crescentes de reciclagem dos materiais, sua contínua redução da dissipação entrópica – este é o sentido da analogia fundadora. A partir daí importa então realizar um vasto conjunto de pesquisas, estudos, quantificações dos fluxos de energia e materiais que possam formar a

base de conhecimento sobre o qual as decisões na política e na economia sejam tomadas. O programa da Ecologia Industrial é, no entanto, desafiado desde o primeiro instante. Apesar de a exergia ser considerada uma possível variável unificadora (Seager e Theis, 2002), não há uma base definida na Ecologia Industrial para a seleção objetiva de processos, produtos ou estratégias de sustentabilidade.

As analogias, métodos e princípios da Ecologia Industrial – um campo de estudos ainda em fase de elaboração e consolidação – se deparam não apenas com o problema da definição das fronteiras espaciais do sistema em estudo. Outros fatores entram em jogo: os critérios de avaliação ambiental de determinada opção tecnológica muitas vezes são conflitantes; a dimensão do tempo se mostra crucial para o debate em torno da sustentabilidade; e ainda, a assimetria das benesses e prejuízos na distribuição dos recursos e poluentes segundo os grupos sociais.

A riqueza que a perspectiva biológica abre para a economia e a política mal começou a ser explorada. Com as interconexões produtivas e informacionais do atual estágio das coletividades humanas, há um reconhecimento crescente dos corpos socio-econômico-ambientais, dos horizontes biopolíticos⁵¹ da sociedade, da hibridização do natural com o artificial, dos homens e das máquinas, de uma organicidade não restrita aos seres vivos. Ao nosso ver abre-se com a Ecologia Industrial um caminho teórico e prático para o desvelamento desses corpos e uma passagem ecopolítica transversal aos campos da Biologia, da Termodinâmica e da Economia.

O conceito de ecossistema industrial aqui desenvolvido tenta lidar exatamente com a multiplicidade de constituintes da economia – a sua base material, o meio ambiente, os agentes econômicos (produtores e consumidores), as regras do jogo e os valores que as sustentam, os arranjos organizacionais entre os agentes econômicos etc. – assim como as relações entre

⁵¹ A perspectiva do biopoder e dos corpos biopolíticos coletivos é elaborada por Hardt e Negri (2001) em sua análise das novas ordens políticas da globalização. “Biopoder é a forma de poder que regula a vida social por dentro, acompanhando-a, interpretando-absorvendo-a e a rearticulando. (...) Um lugar onde deveríamos localizar a produção biopolítica de ordem é nos nexos imateriais de produção de linguagem, da comunicação e do simbólico que são desenvolvidos pelas indústrias de comunicação” (Império, pp. 43 e 47).

todos estes constituintes que estabelecem uma unidade que produz a si mesma, como veremos com o conceito de autopoiese⁵².

O movimento é o seguinte: tendo como norte a turva noção de sustentabilidade, partimos dos sistemas econômicos para captar, com as ferramentas derivadas da Termodinâmica, a sua base física e suas interações materiais (Metabolismo Industrial e Ecologia Industrial), para depois voltar às relações econômicas, com suas heterogeneidades e suas transformações, de forma a constituir um pensamento ético-político para uma nova prática transparente da sustentabilidade social e ambiental.

V.1 Ecossistema Industrial: uma abordagem conceitual

Ao invés de estabelecer condições iniciais e de contorno de um ecossistema industrial específico, é possível questionar, em termos gerais, e positivamente, o que constitui um ecossistema industrial. Neste ponto, podemos nos reportar às 4 causas aristotélicas e à filosofia escolástica – ver os trabalhos do jesuíta espanhol Francisco Suárez no final do século 16 (Suarez, 1994) – que têm sido utilizadas principalmente por biólogos na discussão sobre evolução dos seres vivos (Mayr, 1974; Rosen, 1985; Grady e Brooks, 1988; Campbell, 1988), e por outros autores ao lidar com as bases conceituais da economia ecológica (Faber, Manstetten e Proops, 1995).

V.1.1 As quatro causas aristotélicas

A investigação metafísica de Aristóteles pretende ser mais que uma descrição do ser metafísico, pretende ser uma episteme, uma filosofia científica. É preciso buscar as razões, as causas que justifiquem o ser da Metafísica⁵³. Princípios ou causas são as partes em que se divide o ser. Causa é "aquilo de onde a coisa é, ou se faz, ou se conhece" (*Metafísica.*, V,1.

⁵² Há neste ponto uma inspiração nitidamente spinozista em torno do conceito de substância. Para Spinoza, a substância é causa de si própria, é aquilo que é em si e por si concebido, aquilo cujo conceito não requer o conceito de uma outra coisa, do qual devesse ser formado. Aqui poderíamos explicitar a dialética de Hegel em posição de combate à substância spinozista. Para Hegel, o ser absoluto e único de Spinoza não pode fornecer uma base para a determinação ou para a diferença porque não envolve um outro ou uma limitação. Para acompanhar este instigante debate filosófico ver também Deleuze (1990), Hardt (1993) e Macherey (1979).

⁵³ Aristóteles fez a exposição sobre as causas em sua *Física* (L.II, 3,7), e voltou ao tema, na *Metafísica* (*Met.*, V, 2. 1013a 25-35).

1013a 20). Portanto, causa é aquilo de que algo efetivamente procede, entendidos a causa ou o princípio do ser como algo positivo, do que realmente procede e depende, e não como princípio negativo, como quando se diz que algo é definido como parte de uma outra coisa ou como aquilo que não é esta outra coisa.

Para Aristóteles, esta unidade substancial que é o indivíduo possui matéria e forma: a forma é a *essência* comum aos indivíduos da mesma espécie, pela qual todos eles são o que são (“todos os homens são animais racionais”). Portanto, o elemento formal tem a função característica de fazer com que algo seja concretamente um membro dentro de uma espécie determinada. Mas o que faz com que Cálías seja Cálías e Sócrates seja Sócrates, isto é, indivíduos diferentes dentro da mesma espécie? Qual o princípio da individuação? É a matéria, isto é, o conjunto de acidentes que faz com que este *ser* seja este *ser* e não outro. Em resumo, a forma situa o indivíduo dentro de uma espécie correspondente; mas é a matéria que confere ao indivíduo sua individualidade própria.

Assim, Aristóteles observa que todo indivíduo ou ser vivente é a síntese desses dois princípios: a matéria e a forma. A matéria é o substrato indeterminado onde vai ocorrer a mudança (por ex., o bloco de mármore de uma estátua ou a matéria orgânica no ser vivente); a matéria é a potência, e a forma, o ato. A matéria é a potência de se tornar uma forma ou ato.

Aristóteles distingue, assim, as quatro causas do *dever* (vir a ser): (1) Causa Material, elemento primitivo e constitutivo de todas as coisas; a matéria pode transformar-se sucessivamente em formas substanciais diversas mas é um substrato básico das modificações que os corpos sofrem, considerada como elemento real dos objetos materiais; (2) Causa Final, o fim pelo qual as coisas são feitas, pois toda a mudança requer um princípio diretor, que orienta o agente para o objetivo; (3) Causa Eficiente⁵⁴, a causa que produz as coisas, o princípio motor; (4) Causa Formal, que é a forma ou essência de cada coisa, o termo de chegada de toda a mudança, o princípio que representa uma nova perfeição.

A causa eficiente e a final seriam apenas aspectos da causa formal: a eficiente é a motriz dos vários graus do desenvolvimento e a causa final é a perfeição a que o *ser* tende. Assim, a Matéria e a Forma são os dois princípios do *dever*, sem que estejam submetidas a ele.

⁵⁴ Este nome ainda não é conhecido por Aristóteles, que usa apenas a expressão “princípio primeiro do movimento” (*Metafísica*. 5,2. 1013 a 30).

A matéria é o substrato imutável e as formas, cada uma delas eternas e indivisíveis, estão nos seres desde a eternidade⁵⁵.

O exemplo de um ferreiro pode ser útil no entendimento das quatro causas aristotélicas. O trabalho do ferreiro consiste em fabricar uma peça de metal, um capacete por exemplo, com forma e tamanho particulares. A causa material do capacete é o metal do qual é feito. A causa final é a idéia ou projeção do capacete a ser fabricado. A causa formal é a modelagem da peça de metal, o modo de fazê-la com a sequência de ações que utiliza instrumentos como o martelo. A causa eficiente é a própria ação do ferreiro.

Antes de apresentar o nosso conceito de ecossistema industrial, com seus pólos e causas aristotélicas, é interessante acompanhar uma outra abordagem que utiliza um raciocínio semelhante Valero e Serrano (1994). Autor proeminente do campo da Termoeconomia – ver Valero et al. (1986) –, Valero aplica os princípios de causalidade para sistemas energéticos da forma mostrada na Tabela 62. A *causa material*, aquilo do qual algo surge, em um sistema energético organizado, são os insumos que o alimentam. As idéias de custo e recursos, derivadas da Economia, forneceriam as variáveis deste tipo de causa. A *causa final*, aquilo para o que tende, é seu produto, ou seja, o objetivo para o qual o sistema foi criado. A *causa eficiente* é o princípio de funcionamento do sistema, ou seja, as leis naturais de transferência de massa e calor. Da Termodinâmica obtém-se o conceito generalizador de irreversibilidade, que pode ser medido nos moldes do método exergético. A *causa formal* pode designar a estrutura material, a sua forma sensível, mas é mais comum considerá-la como a estrutura inteligível, a idéia ou fórmula que descreve o plano de sua estrutura (por exemplo, matrizes dos fluxos do sistema). A Teoria Geral dos Sistemas seria a grande fonte para o estudo das relações estruturais dos componentes do sistema energético.

Valero concebe na Termoeconomia uma síntese da Teoria Geral dos Sistemas (estrutura matemática como causa formal), da Termodinâmica (irreversibilidade como causa eficiente) e da Economia (custos e recursos como causa material) através do conceito de propósito produtivo, a causa final. Para ele, o reducionismo científico, em sua fragmentação

⁵⁵ No Livro I da *Ética a Nicômacos*, Aristóteles, na busca pela determinação do bem supremo para os humanos, discorre sobre o bem de cada atividade: “Será ele (o bem) a causa de tudo que se faz? Na medicina ele é a saúde, na estratégia é a vitória, na arquitetura é a casa, (...) ou seja, o fim visado em cada ação e propósito, pois é por causa dele que os homens fazem tudo o mais”.

do objeto de estudo, perdeu esta idéia de propósito e assim não teve mais sentido a investigação sobre as causas.

Tabela 62 - Elementos de Termoeconomia e as causas aristotélicas (Valero e Serrano, 1994)

Causa	Idéia	Variável (em unidades de exergia)
Material	Insumos/recursos	Custo exergético
Final	Propósito produtivo	Produtos do sistema
Formal	Estrutura matemática Forma sensível	Matrizes de custos exergéticos
Eficiente	Dissipação (leis naturais)	Irreversibilidades (exergia destruída)

Adiantamos que existem diferenças de escala e de natureza entre as abordagens das causas aristotélicas apresentadas. Se, em primeiro lugar, nos referimos a um objeto, estátua de mármore ou capacete de metal, assim como Valero nos fala de um sistema energético, vamos em seguida considerar as causas aristotélicas em outro contexto, o dos ecossistemas industriais.

V.1.2 Pólos, eixos e causas – o diagrama do ecossistema industrial

Nosso intento é tentar utilizar elementos da filosofia escolástica para abordar as atividades econômicas sob o manto do ecossistema industrial. Portanto, movemos o nosso foco do capacete, que representa um produto qualquer, para o ecossistema industrial no qual o capacete é fabricado⁵⁶. Neste sentido, as causas são aplicadas não ao produto, mas sim ao ecossistema industrial. Qualquer produto pode ser associado à cadeia de atividades produtivas que permitem sua fabricação, à maneira das análises de ciclo de vida, ou mesmo ao conjunto de fatores de produção utilizados, tal como realizado pela análise econômica. Em nosso caso,

⁵⁶ O ecossistema industrial serve para abordar não apenas as atividades de produção do capacete mas também de forma geral, bem ao gosto da Ecologia Industrial, as atividades de uso e disposição final ao término de sua vida útil. Para o melhor entendimento deste ponto, salientamos somente as atividades de fabricação.

qualquer unidade econômica (planta, firma, indústria, economia) pode ser identificada como ecossistema industrial, ou poderíamos dizer, sistema natural-econômico⁵⁷.

No caso do ferreiro e do capacete, um ecossistema industrial pode ser definido a partir de tais conjuntos, de cadeias produtivas e fatores de produção. Sendo assim, podemos citar o conjunto de energéticos e materiais (metal, carvão), o conjunto de instrumentos materiais (martelo, mesa, pinça), o trabalho aplicado (a ação do ferreiro, seu conhecimento). Também poderiam ser incluídos, primeiro, as relações de todos estes elementos em um tipo particular de organização; segundo, as atividades que demandam a fabricação de um capacete para serviços específicos, seja um ornamento pessoal ou vestimenta-instrumento de batalha; e terceiro, os valores, expectativas, objetivos, sistemas simbólicos, regras sociais e jurídicas que guiam ou limitam as ações do ferreiro.

Neste ponto é importante notar que o foco não está direcionado aos aspectos econômicos, físicos, sociais e informacionais de um ecossistema industrial bem definido e localizado, mas sim à permanente constituição de qualquer ecossistema industrial a partir de elementos econômicos, físicos, sociais e informacionais. E ainda, retornando às quatro causas, deve ser ressaltado que nossa abordagem se refere às causas da constituição e transformação permanente do ecossistema industrial e não de um de seus produtos, como o capacete neste caso.

Neste sentido, um diagrama matricial é mostrado na Figura 43, com quatro pólos, quatro eixos e quatro causas. O esquema básico foi retirado de Guattari (1992), cujo tratamento conceitual é voltado para uma ontologia da subjetividade. Algumas expressões foram modificadas a fim de ressaltar a abordagem voltada aos ecossistema industriais.

⁵⁷ A expressão 'ecossistema industrial' foi escolhida por vários motivos: deriva do conjunto de noções e princípios da Ecologia Industrial, salienta a imagem da cadeia de produção/consumo/descarte, explicita a rede de conexões materiais. A expressão 'sistema natural-econômico' (Weston and Ruth, 1997) é interessante pois registra os componentes econômicos e ambientais em relação. As leis físicas que impõem restrições aos processos naturais constituem apenas um dos conjuntos de influência nas interações ocorridas no sistema econômico natural; um outro conjunto de fatores são as 'regras do jogo' que estabelecem as relações entre os componentes do sistema. É uma análise hierárquica na qual o Indivíduo (entidades, unidades) é definido por um conjunto de atributos físico-químicos, biológicos, intelectuais e emotivos. A escolha das fronteiras do sistema para a definição dos indivíduos depende dos propósitos do estudo.

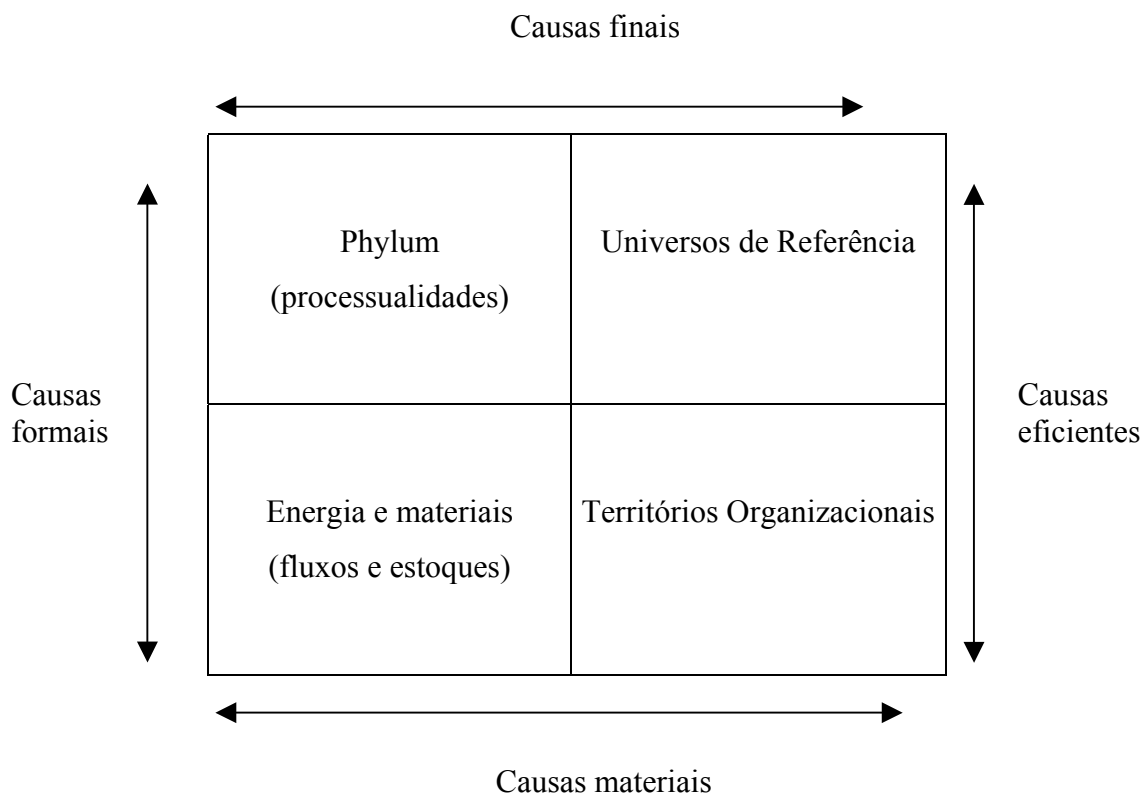


Figura 43 – Diagrama esquemático das causas e componentes do ecossistema industrial

O pólo “energia e materiais” engloba o conjunto dos elementos físicos dos ecossistemas industriais, como definido anteriormente no exemplo do ferreiro. O pólo dos “territórios organizacionais” engloba as relações entre os elementos dos ecossistemas industriais em níveis diversos – firma, regiões, economias inteiras. A palavra “Territórios” aqui se refere não apenas às conexões e fronteiras espaciais mas também as jurídicas (empresa legal), econômicas (distribuição de mercado e de renda), tecnológicas (processos de produção), ambientais (recursos e poluentes, midiática (imagem pública). A palavra ‘território’ é usada em um sentido similar ao da Etologia ao descrever o comportamento dos animais. O pólo dos “universos de referência” engloba valores derivados de entidades gerais como o mercado, o meio ambiente, a ordem social, as ciências, os sistemas simbólicos, o poder. O pólo dos “phylum”, isto é, das processualidades, é relacionado ao tempo e aponta

para as mudanças, as seqüências dos acontecimentos, os processos, a evolução e a contínua transformação dos ecossistemas industriais.

O eixo que liga os pólos “energia e materiais” e “territórios organizacionais” é associado às causas materiais. Vamos considerar, por exemplo, uma planta de produção de aço. O fluxo de materiais e energia utilizados na manufatura do aço e os arranjos organizacionais da própria planta, assim como arranjos de logística de suprimento e distribuição, são mutuamente dependentes. Uma categoria de necessidade dá suporte à esta conexão, dado que a constituição material está intrinsicamente ligada a esses arranjos organizacionais de seus constituintes, sejam eles quais forem. O uso de um tipo particular de minério de ferro (quantidade, estado físico, composição) está relacionado às características organizacionais dos processos de produção, que por sua vez estão baseadas os fluxos materiais do minério. Portanto, o estabelecimento de um território organizacional no âmbito de um ecossistema industrial – a planta siderúrgica, por exemplo – está calcada em fluxos e estoques de energia e materiais.

Causas formais estão associadas ao eixo entre os pólos “*phylum*” e “energia e materiais”. Neste caso, uma categoria de irreversibilidade dá suporte a esta conexão, que é a responsável pela identificação dos estados sucessivos no tempo das coordenadas energético-materiais dos ecossistemas industriais. O real estado dos elementos físicos é confrontado com os estados possíveis destes elementos a cada instante. Podemos nos referir a estes processos e às causas formais de duas maneiras. Primeiro, para uma planta industrial em particular, é possível destacar as diversas etapas de produção em sua seqüência tal como em uma receita ou conjunto de procedimentos necessários para se chegar ao produto desejado. Segundo, o olhar pode se voltar para o desenvolvimento tecnológico que proporciona mudanças mais radicais de tais procedimentos para obter o mesmo produto.

O eixo entre os “*phylum*” e os “universos de referência” é associado às causas finais. Tendo em mente a realidade econômica de uma firma específica cujo principal universo de referência é a maximização de lucros, mas que também apresenta outros como a busca de vantagens competitivas, de uma imagem corporativa de eficiência ou imagem “verde”, é possível traçar as correspondências neste eixo de causas finais. De um lado, os “*phylum*” permitem que os universos de referência sejam buscados, de outro estes universos demandam e direcionam as mudanças expressa por estes “*phylum*”.

Os pólos dos “universos de referência” e dos “territórios organizacionais” constituem o eixo em que causas eficientes estão associadas. O complexo conjunto de universos de referência formam o substrato sobre o qual os territórios organizacionais são definidos; eles põem em jogo sistemas de valorização. A relação inversa mostra que as organizações podem criar, destruir ou reforçar valores, idéias e símbolos entendidos como universos de referência. Estes se hierarquizam e se sustentam a partir da delimitação e da atualidade dos territórios organizacionais. A predominância de certos valores permite constituir os múltiplos territórios organizacionais de um ecossistema industrial.

Os universos de referência trabalham nas interfaces das tecnologias de comunicação com os estoques de informação presentes no conhecimento científico, nos saberes diversos, na cultura. São o substrato dos territórios organizacionais. Os territórios organizacionais não são dados como objeto, mas como repetição, constituição permanente. No que chamamos de empresa se formam, mudam e desaparecem territórios organizacionais. Podem ser ligados à firma e seus aparatos jurídicos com o setor público, com os consumidores e com as outras empresas. Podem aderir à imagem da instituição, seja de alta tecnologia, poluidora, rústica ou sustentável. Podem ser a planta industrial com seus dispositivos e concatenação dos equipamentos e a rede de trabalhadores. Estes territórios organizacionais de uma empresa estão calcados em conhecimentos dos mais diversos incorporados na concretude do espaço da empresa, na utilização de rotinas de produção, nas expectativas econômicas e pessoais que a mantêm. Uma outra forma seria vê-los como a ponte entre os universos de referência e os fluxos de energia e materiais.

Na Tabela 63 são apresentados os pólos do conceito de ecossistema industrial para níveis selecionados de descrição da atividade econômica – firmas, conjunto de firmas, países e economias em geral. A lista não tem a pretensão de ser completa pois há um sem número de níveis de descrição e fatores direcionadores dos ecossistemas industriais. É simplesmente um guia com exemplos para melhor esclarecimento da multiplicidade das unidades econômicas que queremos abordar com este conceito de ecossistema industrial.

Tabela 63 - Elementos dos pólos dos ecossistemas industriais de acordo com níveis selecionados de descrição econômica

	Firma	Conjunto de firmas	País	Economia
Territórios organizacionais	Firma legal, etapas de produção, estrutura corporativa e organizacional, hierarquias, imagem corporativa	Cadeia de produção, parcerias econômicas, participação de mercado	Cadeias de produção e consumo, relações entre setores econômicos, relações culturais e de poder	Cadeias de produção e consumo, relações entre setores econômicos, relações culturais e de poder
Fluxos e estoques de energia e materiais	Insumos, produtos, resíduos, poluentes, equipamentos, construções, força de trabalho	Insumos, produtos, resíduos, poluentes, equipamentos, construções, força de trabalho	Insumos, produtos, resíduos, poluentes, equipamentos, construções, força de trabalho, reservas naturais, exportações e importações	Insumos, produtos, resíduos, poluentes, equipamentos, construções, força de trabalho, reservas naturais, trocas comerciais
Phylum (processualidades)	Mudanças nos estados dos materiais, mudança tecnológica, rotinas de produção, tomada de decisão	Mudanças nos estados dos materiais, mudança tecnológica, rotinas de produção, tomada de decisão	Crescimento e desenvolvimento econômicos, mudanças na estrutura dos setores econômicos, tomada de decisão	Crescimento e desenvolvimento econômicos, mudanças na estrutura dos setores econômicos, tomada de decisão
Universos de Referência	Lucratividade, regras de mercado, imagem, interesse dos acionistas, conjuntos de conhecimento	Regras de mercado, competição, conjuntos de conhecimentos	Poder militar, influência cultural, sistema ideológico e político, regras internacionais, conjuntos de saber	Riqueza, otimismo tecnológico, princípio de precaução, sustentabilidade, utilidade, regras de mercado

Em resumo, tal conceito foi desenvolvido para integrar aspectos físicos, organizacionais, temporais e de valores para os sistemas econômicos, o que se observa do diagrama da Figura 43. Não são consideradas variáveis na medida em que o sistema econômico e ambiental está inserido na mesma abordagem metodológica, o que oferece uma mesma base ontológica para as atividades econômicas e suas relações com o meio ambiente. A analogia biológica, com a idéia dos fluxos e trocas de energia e materiais entre diversos componentes, serve como um ponto de partida, mas o ecossistema industrial se refere às dimensões sociais, institucionais e culturais expressas pelo eixo dos territórios organizacionais e dos universos de referência. Por outro lado a dimensão temporal está ligada ao pólo dos “*phylum*”. Respeitando os múltiplos e relevantes fatores de cada um dos pólos, o diagrama foca exatamente a constituição e mudança das atividades econômicas e seus componentes fundamentais.

Neste registro dos ecossistemas industriais há um circuito de passagem do domínio físico ao biológico, e deste ao domínio antro-po-social. Não separa domínio econômico e domínio natural, mas os funde na elaboração conceitual dos ecossistemas industriais como constituição permanente. É possível desde aqui avistar as paragens da ecopolítica e das implicações para as bases teóricas neoclássica e termodinâmica. Mas antes vamos prosseguir

na elaboração conceitual do ecossistema industrial com noções derivadas da teleologia, que na história da ciência apresentou capítulos de intensa discussão.

V.1.3 Teleomático, teleonômico e teleológico

Segundo a teleologia aristotélica, função e adaptação nos organismos estão associadas a propósitos, a causas finais. Desde o estabelecimento definitivo do moderno método científico, toda explanação teleológica ficou recoberta por um pano metafísico e foi assim desqualificada. Para Bertrand Russel a causalidade é um conceito metafísico, mais próximo das interpretações antropomórficas ou vitalistas que da objetividade das leis físicas. Afirmava que a Física tinha deixado de buscar as causas porque simplesmente elas não existiriam (Russel, 1918). Em contraposição, o biólogo Ernst Mayr (1974) mostrou novas perspectivas *tele* para além da abordagem teleológica. Ele descreve três tipos gerais de atividades que alcancem um fim – teleomáticas, teleonômicas e teleológicas.

Teleomático se refere a atividades que resultam em um fim, como os processos físico-químicos, a gravidade, as leis termodinâmicas. Teleonômico se refere a atividades especificadas por programas direcionados a um fim. Por exemplo, a homeostase, a ontogenia e a reprodução, que são operados por fatores genéticos. Teleológico está associado a um propósito, em atividades guiadas para um objetivo, como realizado por sistemas biológicos cognitivos (O’Grady e Brooks, 1988; Campbell, 1988). A Tabela 64 mostra as três atividades descritas e respectivas causas aristotélicas.

Tabela 64 – Atividades tele em sistemas biológicos

Atividade	Tipos	Causas ^a	Exemplos
Teleomático	Resultando em um fim	Mat.; Ef.	Leis físicas
Teleonômico	Direcionado a um fim	Mat.; Ef.; Fo.	Programa genético
Teleológico	Buscando um objetivo	Mat.; Ef.; Fo.; Fi.	Sistemas cognitivos

^a Mat. – material; Ef. – eficiente; Fo. – formal; Fi. - final

Os processos teleomáticos são caracterizados, em relação aos outros processos *tele*, por não terem causas formais nem finais. Processos teleonômicos estabelecem sua diferença por

terem causas formais além das causas materiais e eficientes. E, finalmente, os processos teleológicos apresentam todas as quatro causas, ou seja, se diferenciam por também incluir causas finais. De acordo com O’Grady e Brooks (1988), “(...) Todas as entidades físicas apresentam algum tipo de atividade teleomática; um subconjunto (os sistemas biológicos) apresenta atividades teleonômicas; e um subconjunto (sistemas biológicos cognitivos) deste último subconjunto apresenta atividades teleológicas. (...) um pára-quedista teleologicamente puxa a corda para abrir o pára-quedas enquanto seu corpo mantido teleonomicamente cai em direção ao solo teleomaticamente.”

As atividades *tele*, com suas características e causas apresentadas na Tabela 64 para sistemas biológicos, também podem ser utilizadas para descrever os processos que ocorrem no âmbito dos ecossistemas industriais. Portanto, teleológico ainda se refere às atividades que buscam um objetivo, mas agora se aplicam à realidade econômica. Em termos neoclássicos, utilidade e maximização dos lucros se referem a objetivos ao nível individual e da firma.

No caso dos processos teleonômicos e suas atividades “direcionadas a um fim”, as rotinas de produção constituem programas de manufatura em máquinas, firmas ou cadeias de produção, todos relacionados a fatores de controle. Haveria uma correspondência, ainda que incompleta, entre estes programas e o genoma dos sistemas vivos.

Finalmente, processos teleomáticos em sistemas industriais são associados a atividades que “resultam em um fim”. Não há um propósito geral guiando as ações para um fim determinado, não há um programa de controle direcionado a um fim. Mesmo considerando que os processos naturais atuam nos fluxos de energia e materiais, o conceito de ecossistema industrial aqui proposto sugere que as atividades teleomáticas não estão apenas associadas às leis físico-químicas. Voltando ao diagrama do ecossistema industrial, as atividades teleomáticas ocorrem ao longo dos eixos das causas materiais e eficientes: fluxos de energia e materiais – territórios organizacionais; e universos de referência – territórios organizacionais.

Por exemplo, ainda em termos neoclássicos, o equilíbrio de mercado envolve objetivos dos agentes econômicos, assim como regras de mercado; mas estes resultados são baseados nas interações dos agentes, resultando em um fim específico. Isso não significa imprevisibilidade. O ponto a ser destacado é que não estão envolvidas causas formais e finais para estes resultados, o foco está na interação dos agentes. Analogamente ao exemplo anterior do pára-quedista, uma firma *teleologicamente* reduz seus custos de produção para adquirir

uma vantagem competitiva, enquanto seus processos *teleonomicamente* mantidos por rotinas de produção dependem das propriedades dos materiais e dos energéticos utilizados, submetidos *teleomaticamente* às leis físico-químicas.

No entanto, vantagens competitivas de uma firma dependem das complexas interações entre empresas, consumidores, regras de mercado, influências da regulação governo, opções tecnológicas, entre outros fatores. Portanto, a firma reduz teleologicamente seus custos de produção por intermédio da transformação dos processos de produção teleonomicamente mantidos, mas o resultado efetivo de sua estratégia depende dos fatores citados acima, ou seja, o resultado-fim (divisão do mercado) para um ecossistema industrial composto pelas firmas em competição é teleomaticamente atingido.

A abordagem conceitual adotada para os sistemas econômico-naturais como ecossistemas industriais tenta capturar os diversos fatores que tomam parte na constituição e nas mudanças permanentes destes sistemas. Trata-se de uma evidente opção em focar a multiplicidade dos sistemas e não em reduzi-los como objeto definido de estudo. No entanto, com o movimento na direção da multiplicidade, não fica claro como tais sistemas podem constituir unidades no espaço definido por seus próprios componentes. Como determinadas unidades formam outras unidades em outros níveis hierárquicos e formam ecossistemas industriais? Para traçar o movimento da multiplicidade para a unidade, a noção de autopoiese nos parece fundamental.

V.1.4 Ecossistemas Industriais como sistemas autopoieticos

A noção de *autopoiese*, palavra derivada do grego (αυτοσ = auto; ποιειν = produzir), significa autoprodução. No campo da Biologia a noção foi refinada por Maturana e Varela (1973), que estabeleceram a organização autopoietica como característica definidora dos sistemas vivos como unidade. Apesar de confinadas por estes autores ao universo dos seres vivos, propriedades autopoieticas podem ser identificadas nas sociedades humanas (Zeleny, 1980). Nosso intento é investigar os aspectos autopoieticos dos ecossistemas industriais e mostrar que a constituição dos ecossistemas industriais como unidade somente é possível se estes forem autopoieticos. Este é o segundo passo da “estratégia ontológica” para que se possa ir além da analogia biológica estabelecida pela Ecologia Industrial.

Um *sistema autopoietico* é um sistema dinâmico, definido como uma unidade compósita⁵⁸ constituída como uma rede de produções de seus componentes que, primeiro, através de interações regeneram a rede de produções que os produzem, e segundo, realizam esta rede como uma unidade através da constituição e especificação de suas fronteiras no espaço em que existem.

Enquanto sistemas autopoieticos produzem a si mesmos e mantêm sua própria unidade por intermédio de uma contínua renovação de seus componentes, *sistemas alopoiéticos* produzem algo diferente de si próprios, isto é, componentes que não tomam parte em sua constituição como uma unidade autônoma. Neste sentido, uma fábrica de carros pode ser considerada alopoiética na medida em que os carros são unidades autônomas, diversas da fábrica. Máquinas deste tipo são sistemas dinâmicos mas não autopoieticos, como o cristal, cuja organização está em um domínio diferente da organização autopoietica, um domínio de relações entre componentes, e não de relações de produção de componentes.

Um sistema autopoietico continuamente especifica e renova sua organização através da produção de seus próprios componentes. Trata-se, nas palavras de Maturana e Varela, de um sistema homeostático que tem sua própria organização como variável a ser mantida constante, ou seja, as relações de produção que definem o sistema autopoietico são continuamente regeneradas pelos componentes que produzem. Estes componentes: (i) geram os processos de produção que os produzem através de contínuas interações e transformações; e (ii) constituem o sistema como unidade em seu espaço físico. Para os biólogos chilenos, os sistemas vivos são máquinas autopoieticas⁵⁹. As células vivas são consideradas sistemas autopoieticos de primeira ordem, enquanto os animais, como organismos multicelulares, são considerados sistema autopoieticos de segunda ordem (Maturana, 1980).

Uma máquina autopoietica pode incorporar-se a um sistema mais amplo na qualidade de componente alopoiético, sem que sua organização autopoietica varie. Assim ela pode ser tratada como alopoiética, sendo que as perturbações que afetam a autopoiese são as entradas

⁵⁸ Unidades compósitas são formadas por mais de um elemento identificável. Em contraponto, unidades simples apresentam apenas um elemento.

⁵⁹ As máquinas autopoieticas são autônomas, ou seja, subordinam todas as mudanças à conservação de sua própria organização, assim como têm individualidade, pois sua organização estabelece uma identidade que não depende das interações com um observador. As operações das máquinas autopoieticas estabelecem seus próprios limites. Ainda que possam ser tratadas como alopoiéticas, com entradas e saídas, isto não revela sua organização enquanto máquinas autopoieticas.

do sistema, e as saídas são as mudanças empreendidas para neutralizar as perturbações e manter a autopoiese. Podemos de outro modo tratar como máquinas alopoiéticas seus mecanismos parciais, submáquinas que não são necessariamente os componentes da autopoiese.

Como apresentado anteriormente, o conceito de ecossistema industrial envolve não apenas os pólos de energia e materiais, mas também aqueles relacionados às organizações, processos e valores. Uma máquina considerada isoladamente, por exemplo, um forno elétrico a arco, não é um sistema autopoietico, mas sim um sistema alopoiético que produz algo diferente do forno propriamente dito, o aço líquido. No entanto, *i)* os fluxos/estoques de energia e materiais e os territórios organizacionais constituem a base, sob o eixo das causas materiais, sobre a qual o forno opera; *ii)* o aço é produzido de acordo com programas de produção ao longo do eixo das causas formais. Estas também pavimentam as linhas de evolução das tecnologias siderúrgicas, dos processos e escalas de produção ao longo do tempo, da história dos ecossistemas industriais; *iii)* valores, conhecimentos, objetivos, expectativas, condições de mercado, especialização técnica e empresarial, condições ambientais – todos estes estratos de universos de referência – se conjugam com os múltiplos territórios organizacionais, e assim atuam no eixo das causas eficientes; *iv)* a necessidade, o objetivo, a busca do produto de aço se associam às múltiplas processualidades, planos e programas (os *phylum*) envolvidos em sua manufatura ao longo do eixo das causas finais.

Deste novo ponto de vista, o forno assume um outro *status*, tomado conjuntamente com suas relações com o domínio humano. Neste caso, o forno, e em geral o conjunto de máquinas conectadas sobre a biosfera, depende deste domínio, que se constitui em um tipo especial de ambiente, responsável pela manutenção de seus componentes materiais, pela continuidade de seu funcionamento e regeneração das relações que o mantém. O seu espaço de existência, e isso é de fundamental importância aqui neste ponto, não é limitado pelos seus constituintes materiais, como visto anteriormente na explanação do conceito de ecossistema industrial.

Ao manter uma contínua especificação de sua organização e de suas fronteiras, o ecossistema industrial estabelece um outro tipo de unidade, não limitado ao espaço físico de um sistema individualizado e autônomo. Depreende-se que as máquinas, normalmente entendidas como sistemas alopoiéticos, sob esta nova abordagem constituem sistemas

autopoiéticos. A dimensão da autopoiese seria assim expandida para além dos sistemas vivos, e os sistemas socio-econômicos poderiam ser identificados como autopoiéticos.

Do mesmo modo que Maturana e Varela (1973) afirmam sobre os sistemas vivos, dizemos que a organização autopoiética é a característica definidora dos ecossistemas industriais, e assim é necessariamente invariante. Definir um ecossistema industrial como uma unidade requer a identificação de sua organização autopoiética, cujos componentes são tomados a partir dos quatro pólos do diagrama da Figura 43. Diversas classes de unidades podem ser identificadas, pois firmas, setores industriais e economias têm cada qual sua própria organização autopoiética. Um arranjo espaço-temporal específico define a estrutura, enquanto a relação entre seus componentes define a organização autopoiética⁶⁰.

Para os ecossistemas industriais, a mesma organização autopoiética assume diferentes arranjos estruturais de seus componentes e é mantida como uma unidade sob a contínua renovação de suas relações (Maturana, 1980). Para Maturana e Varela (1973), a organização autopoiética é a característica definidora dos sistemas vivos, portanto é necessariamente invariante. Suas configurações estruturais são estados em autopoiese, e as transições de estado também se dão em autopoiese, caso contrário se desintegram, mudando assim sua identidade de classe, isto é, mudando sua organização autopoiética.

A transformação da organização autopoiética significa a passagem do ecossistema industrial de um tipo a outro. No entanto, a organização autopoiética é essencialmente dinâmica e se define como uma rede de autoprodução de seus componentes. Assim, para qualquer unidade autopoiética, a organização autopoiética pode permanecer a mesma, enquanto o que está em contínua mudança são os territórios organizacionais e os componentes energéticos e materiais⁶¹.

⁶⁰ Zeleny (1980) distingue organização e estrutura ao apresentar um exemplo em que um automóvel tem uma organização própria caracterizada por relações específicas entre motor, rodas, transmissão, sistema de frenagem etc, que definem o arranjo de seus componentes como uma unidade identificável: um automóvel. A estrutura é o arranjo específico dos componentes (motor na frente, chassi de alumínio, direção hidráulica, formato da carroceria etc). Ao transformar minimamente a organização, a relação entre seus componentes, podemos chegar a um outro tipo de unidade, uma motocicleta, por exemplo. Ao mudar sua estrutura, mantendo intacta sua organização, chegamos a diferentes tipos de marcas de automóveis.

⁶¹ Podemos fazer um paralelo com a noção de resiliência aplicada à Ecologia, em que um determinado ecossistema natural sofre um impacto ambiental, um vazamento de óleo em um rio, por exemplo. Quanto maior a resiliência do ecossistema maior seria a capacidade em retornar à sua organização autopoiética.

Sistemas autopoieticos de ordens mais elevadas podem ser formados por conexões de sistemas de menor ordem se forem verificadas às condições impostas anteriormente. Primeiro, o sistema autopoietico deve ser constituído como unidade em um espaço⁶² determinado por seus componentes. Nota-se que tais componentes não coincidem necessariamente com as unidades autopoieticas de menor ordem, pois estas na verdade se reúnem para fazer surgir uma nova unidade. Unidades autopoieticas não necessariamente formam conjuntos que constituem uma unidade autopoietica. Em segundo lugar, os componentes devem ser produzidos pelos processos que eles mantêm em geração permanente. As organizações autopoieticas de cada unidade de menor ordem atuam como alopoeiticas e definem o requerido espaço para a organização autopoietica de maior ordem.

Os ecossistemas industriais neste sentido constituem-se como unidades por sua organização autopoietica. O que não varia em um ecossistema industrial é sua organização autopoietica. A formação dos ecossistemas industriais de maior ordem por intermédio da relação entre outros ecossistemas industriais de menor ordem pode ser contextualizada no âmbito da autopoiese. A título de exemplo, a cadeia de produção de aço inclui etapas como a planta siderúrgica, as minas de onde os materiais são extraídos, as plantas de geração de energia elétrica e gás natural, os meios de transporte, as etapas de manufatura dos produtos que utilizam aço e os consumidores finais. Cada estágio é um ecossistema industrial formado pelos componentes derivados dos 4 pólos, que assim constitui uma unidade sob determinada organização autopoietica, como apresentado para o forno elétrico anteriormente.

Portanto, em que sentido um conjunto de etapas de produção/consumo de aço pode constituir um sistema autopoietico? De fato, os estágios de produção interconectados perfazem papéis alopoeiticos. Mesmo sendo considerados como sistemas autopoieticos de menor ordem, tais estágios atuam como unidades alopoeiticas que participam, com seus múltiplos insumos e produtos, na contínua geração da rede de processos de produção da organização autopoietica de maior ordem⁶³. Uma implicação importante para a Ecologia é que sistemas autopoieticos

⁶² Maturana e Varela (1973) afirmam que não sabem se existe um espaço social em que a sociedade constitua uma unidade autopoietica e nem mesmo os componentes deste espaço social. O conceito de ecossistema industrial é uma tentativa de ultrapassar esta limitação.

⁶³ Maturana e Varela (1973) também destacam que as noções de finalidade, objetivo ou função não estão no domínio da organização autopoietica e sim no do observador que trata da organização mais ampla que a envolve.

que atuam como alopoiéticos podem ficar subordinados à manutenção de uma organização autopoiética de maior ordem.

A miríade de conceitos apresentados até este ponto nos obriga a uma recapitulação antes de avançarmos em busca da confrontação da abordagem dos ecossistemas industriais com as teorias e práticas da sustentabilidade.

O ponto de partida foi a analogia biológica empregada pela Ecologia Industrial em que os ecossistemas naturais são tomados como modelo para a reestruturação dos sistemas naturais-econômicos (sistemas industriais). Os limites e dificuldades teóricas da analogia nos levaram a tentar formular em termos filosóficos o que seria ou o que constituiria o ser que denominamos de ecossistema industrial. Em sentido oposto ao conhecer reducionista, apontamos para a multiplicidade dos ecossistemas industriais por intermédio de seus quatro pólos de elementos, os fluxos de energia e materiais, os territórios organizacionais, os phylum-processualidades e os universos de referência. Vimos a relação destes elementos com as causas aristotélicas e as atividades *tele* em um arcabouço conceitual similar ao desenvolvido por teóricos da Biologia. Defendemos, então, a expansão do alcance da autopoiese para além daquele determinado por Maturana e Varela. Os sistemas sócio-econômico-naturais não apenas apresentam aspectos de autopoiese⁶⁴, mas também podem ser definidos como sistemas autopoiéticos, na perspectiva dos ecossistemas industriais.

A partir daí, discutimos como a abordagem autopoiética pode nos guiar na tempestade de questões ambientais que perpassam a biosfera tal qual um desafio às ‘humanidades’ que habitam o planeta. Vimos que podem mudar os territórios organizacionais ainda que se mantendo a unidade autopoiética. Que territórios organizacionais estão sendo criados, que unidades autopoiéticas?

V.2 Sustentabilidade e distribuição ecológica

A partir dos conceitos de ecossistema industrial e autopoiese chegamos ao tema da distribuição ecológica. Alguns autores do campo da Economia Ecológica têm destacado a importância dos conflitos distributivos na arena ecológica. A noção de ‘distribuição ecológica’

⁶⁴ Zeleny (1980) apresenta uma série de autores em campos diversos do conhecimento que segundo ele são precursores na identificação de aspectos autopoiéticos em sistemas sociais.

(Martinez-Alier e O'Connor, 1996) se refere às formas/padrões sociais, espaciais e temporais de acesso aos benefícios obtidos com o uso e transformação dos recursos naturais e humanos, assim como às assimetrias na distribuição de prejuízos derivados da degradação ambiental. Efeitos não desejados podem atingir aqueles que não obtêm tais benefícios. Por exemplo, existem assimetrias temporais e espaciais entre o uso de energia nuclear e de combustíveis fósseis e as consequências adversas dos resíduos radioativos e do aquecimento global, respectivamente.

A distribuição ecológica, tal como definida acima, pode ser enquadrada no âmbito das atividades econômicas. A mudança tecnológica, por exemplo, implica em redistribuições na exploração de recursos naturais, transformação material, uso de bens, disponibilidade de serviços e a deposição de resíduos. Um outro exemplo está no sistema de trocas desiguais, condição fundamental para a acumulação de capital. Os pilares das economias industriais estão calcados nas taxas específicas de trocas de energia e materiais, o que garante a distribuição heterogênea dos recursos (Hornborg, 1998). As trocas assimétricas se baseiam em avaliações humanas, expressas nos preços de mercado, resultantes de transferências de energia e materiais de um grupo específico para outro, seja um setor social, região ou país.

Nosso enfoque, portanto, recai sobre a relação entre as mudanças tecnológicas e as reorganizações e heterogeneidades dos ecossistemas industriais.

V.2.1 Organização e dissipação entrópica em sistemas econômicos

A teoria das estruturas dissipativas (Prigogine, 1967; Nicolis e Prigogine, 1977) descreve a evolução de sistemas abertos longe do equilíbrio em direção a estados de maior complexidade. Os sistemas abertos longe do equilíbrio só conseguem manter o estado de baixa entropia graças à constante dissipação, para o ambiente, de energia e matéria num estado de mais alta entropia; por isso são chamados de estruturas dissipativas. O decréscimo de entropia no interior do sistema se faz à custa de um aumento de entropia do ambiente externo, de maneira que o sistema isolado maior, “sistema + ambiente externo”, tem sua entropia sempre aumentada.

Segundo Proops (1983), de um ponto de vista físico, as economias podem ser consideradas como estruturas dissipativas auto-organizadas. Há o que ele chama de dissipação

específica e dissipação total, como dois processos das estruturas dissipativas auto-organizadas. A dissipação específica apresenta uma dimensão intensiva da organização. Nos ecossistemas naturais há uma redução da taxa de produção de entropia por unidade de massa de certos subsistemas à medida que os recursos se tornam escassos. As atividades dissipativas se reorganizam com o aumento deste tipo de eficiência ecológica. Mais propriamente, a dissipação específica decresce com a elaboração de redes de troca e a especialização (Margalef, 1968; Odum, 1969). Por outro lado, a dissipação total corresponde à dimensão extensiva da organização. O Princípio de Máxima Potência de Lotka (1922) ilustra esse aumento da dissipação à medida que o sistema evolui para estruturas mais complexas, que leva ao estabelecimento de novas fronteiras. Mesmo com melhoras relativas na eficiência e produtividade dos recursos, a quantidade total de recursos utilizados é relevante, dados os limites ambientais (Binswanger, 1993).

O caráter qualitativo e funcional da organização não permite uma correlação geral entre organização e dissipação (Wicken, 1986). Em condições “longe do equilíbrio termodinâmico”, a dissipação entrópica não significa uma tendência geral para a desordem. A dissipação depende de tipos específicos de interação com o meio ambiente, de escalas espaciais e temporais consideradas, assim como das visões subjetivas adotadas. A dissipação, assim, é entendida como uma faceta da reestruturação organizacional. A relação entre dissipação e organização, além de ser multifacetada e caso-específica, indica uma complementaridade entre ambas, onde uma situação de heterogeneidade é transformada em outra situação de heterogeneidade (O'Connor, 1991).

Haveria algum tipo de princípio organizacional para a distribuição ecológica dos sistemas econômicos e seus componentes? Poderíamos identificar o balanço de vantagens e compensações entre eficiência, equidade e sustentabilidade? De acordo com Allen (1994), o princípio organizacional dos ecossistemas naturais, o que também poderia incluir os sistemas econômicos, é derivado da presença, manutenção e produção de microdiversidade. Opções ainda não exercidas são permanentemente criadas durante as fases de estabilidade macro, que mais tarde são seguidas por abruptas reorganizações em períodos de instabilidade. A estabilidade e produtividade de um determinado grupo pode ser incrementada como

consequência ou às custas da estabilidade e produtividade do sistema como um todo⁶⁵ (Sagar e Frosch, 1997).

A redução da dissipação específica por intermédio de mudanças tecnológicas está baseada na reorganização dos sistemas econômicos – na linguagem dos ecossistemas industriais aqui desenvolvida, trata-se da criação de novos territórios organizacionais, derivados das redistribuições ecológicas. Neste exato ponto e momento não há uma plataforma moral que assegure “bons” ou “maus” resultados dessas redistribuições. As estruturas e fronteiras de grupos específicos e do sistema como um todo são permanentemente sujeitas à mudança devido a fatores físicos e culturais. As instituições não param de elaborar e rearranjar símbolos e valores que definem as regras do jogo. A mudança dos territórios organizacionais, mantendo-se a mesma organização autopoietica, é sempre acompanhada por uma reorientação dos universos de referência que explicam, justificam, impõem e incorporam novos valores e leis que regulam a distribuição ecológica.

Em termos práticos isso significa que uma economia pode manter a integridade de seus pilares mesmo que, ou em razão de, reorganizações de sua distribuição ecológica. Quando um ecossistema industrial perde sua organização autopoietica, isto pode significar que foi destruído ou transformado, assumindo uma nova organização autopoietica. A fim de verificar qual é o caso para um ecossistema industrial concreto, é necessário deixar a abordagem conceitual e trabalhar com as fronteiras e variáveis do sistema. O debate em torno da sustentabilidade lida exatamente com as dinâmicas global, regional e local das organizações autopoieticas, em torno da manutenção, mudança e destruição destas organizações.

As implicações ético-políticas desta abordagem incluem esforços conceituais e práticos. É concebível que padrões insustentáveis de produção e consumo levem à, primeiro, destruição de estruturas econômico-ambientais determinadas e, segundo, a reorganizações com novos padrões, nos quais alguns componentes da organização anterior simplesmente desaparecem, do mercado ou mesmo da vida. Por exemplo, nas próximas décadas, mesmo no caso dos piores cenários imaginados para o aquecimento global, o mundo se verá diante da diversidade e imprevisibilidade de muitos de seus efeitos para os países, para as regiões frias e

⁶⁵ “Uma vez que uma nova opção é tomada, o sistema é levado para sua própria amplificação, não importa o objetivo ou valores externos do sistema como um todo. Em outras palavras, algo que acontece não tem de ser ‘bom’ para o sistema global ou para o ambiente, apenas precisa encontrar mecanismos de auto-amplificação em cercanias próximas o bastante” (Allen, 1994).

quentes, para as ilhas e montanhas (IPCC, 2001). Respeitados os limites naturais, algumas regiões poderão, de fato, se beneficiar e outras sofrer com o aumento de temperatura por razões complexas, que permanecem difíceis de escrutinar.

Mas como seria possível ir além das assertivas negativas acerca de perdas e compensações, perdedores e vencedores das mudanças nos ecossistemas industriais? Para qualquer ecossistema industrial, de firmas a economias inteiras diante de opções alternativas de mudança, podemos perguntar: que novos territórios organizacionais estão sendo gerados?; ou quais as novas organizações autopoieticas formadas?; ou mesmo, queremos que determinada organização autopoietica seja modificada ou destruída? No contexto atual de reestruturação da indústria, ameaças e tragédias ambientais, crescimento da importância dos serviços na economia, expansão dos mercados globais, aumento da desigualdade entre abastados e despossuídos mesmo com crescimento econômico, discussões sobre acordos internacionais, combate à pobreza etc, é importante ter em mente as questões acima. Isto tem implicações sobre o processo de decisão das corporações, governos e pessoas.

Como lidam as economias neoclássica e termodinâmica com a questão da distribuição ecológica no espaço e no tempo? Como os conceitos de ecossistema industrial e de autopoiese podem ajudar a entender as mudanças e reorganizações dos sistemas econômico-naturais em face dos desafios ambientais? Vamos tentar demonstrar que as formulações teóricas das economias neoclássica e termodinâmica estão fundamentadas no primado das causas formais e finais. O ponto aqui é encarar a realidade das mudanças nos sistemas naturais-econômicos, como ecossistemas industriais, vistos como fundamentalmente abertos ao possível e ao virtual, sem destino definido, que não estão marcados pelo primado das causas finais e formais, e para os quais um papel fundamental é atribuído às causas materiais e eficientes.

V.2.2 Economia Ambiental Neoclássica e o imperativo tecnológico

A primeira das vertentes principais da Economia Ambiental Neoclássica afirma que as mudanças tecnológicas podem superar os limites impostos pela escassez de recursos e pela deterioração ambiental por força das crescentes eficiência e produtividade. Na outra vertente, a precificação das externalidades ambientais é considerada como um instrumento fundamental para correção dos custos, com efeitos positivos sobre a sustentabilidade de longo prazo.

Diversas versões de debates similares que confrontam as capacidades tecnológicas com a degradação ambiental e de recursos ilustram a discussão em torno da sustentabilidade. A perspectiva dos “limites do crescimento” (Meadows et al., 1973) diante da “superação tecnológica dos limites” (Barnett e Morse, 1963); em seguida, a substituição entre capital humano e capital natural; os benefícios ou prejuízos que o crescimento econômico acarreta para o meio ambiente, debate expresso nas Curvas de Kuznets (Grossman e Krueger, 1995; Arrow et al., 1995); a desmaterialização dos sistemas econômicos devido à maior importância de serviços e atividades de informação *versus* as tendências de rematerialização e aumento da dissipação total dos sistemas. Os debates revelam, ainda que de modo implícito, a importância da definição das fronteiras do sistema, do período de tempo considerado e dos valores envolvidos. Como veremos, as heterogeneidades da distribuição ecológica são relegadas a um segundo plano ou completamente desprezadas pelos partidários do imperativo tecnológico. Na verdade, os argumentos destes constituem reações aos alertas ambientais daqueles preocupados com o tipo de crescimento das economias industrializadas, os limites da base de recursos e a capacidade de suporte dos ecossistemas naturais.

Para economias nacionais industrializadas, tem-se mostrado que a relação entre renda per capita e intensidade de poluição segue uma relação de U invertido (curvas de Kuznets); ou seja, a poluição aumenta com a renda até um determinado nível de renda, em que indicadores como emissão de particulados e SO₂ caem à medida que as pessoas enriquecem (Grossman e Krueger, 1995). As curvas têm sido utilizadas para mostrar que o crescimento econômico seria benéfico para o meio ambiente, ao contrário do que dizem os alertas ecológicos. Muitos críticos têm apontado para as limitações desse argumento. A relação em U invertido poderia ser válida apenas para alguns poluentes e negligenciaria as consequências para o sistema como um todo, a exemplo das emissões crescentes em valor absoluto e a transferência de emissões, efluentes e resíduos para outras áreas e/ou grupos (Arrow et al., 1995).

A desmaterialização tem sido indicada como tarefa fundamental na reestruturação industrial das economias (Ayres, 1994; Richard et al., 1994). É mais um exemplo interessante da relação entre distribuição ecológica e tecnologia. A desmaterialização implicada na redução da intensidade no uso de materiais nos setores industriais é obtida por maior eficiência, reciclagem e maior participação dos serviços na economia, baseada nas tecnologias de informação e comunicação como característica marcante da sociedade da informação. De

Bruyn (1998) argumenta que há uma tendência recorrente para a rematerialização nas economias mais industrializadas. A desmaterialização não seria uma tendência permanente mas sim ocorreria em períodos de mudanças tecnológicas radicais. Frequentemente associados ao aumento de produtividade e eficiência no uso de recursos, os setores de informação poderiam levar: *i*) à redução da dissipação específica através de controles mais eficazes de retroalimentação; *ii*) redução dos custos de transação; *iii*) exploração dos ganhos e importância dos serviços na economia. No entanto, ainda são pouco conhecidos os efeitos colaterais para o meio ambiente dessa difusão de tecnologias de informação e comunicação (Vellinga e Herb, 1999), que em valores absolutos poderiam levar a um aumento no nível de dissipação total.

Embora o debate em torno da substituição do capital natural por capital humano enfatize a dependência dos sistemas econômicos em relação ao meio ambiente, não revela a questão fundamental sobre o tipo de substituição que se realiza, ou seja, na nossa linguagem dos ecossistemas industriais, quais os territórios organizacionais criados para um determinado nível de substituição, quais as organizações autopoieticas que são destruídas ou modificadas nessa substituição.

Ainda que brevemente apresentados, estes debates nos dão uma indicação de que o imperativo tecnológico pode ser válido para algumas partes do sistema considerado mas não para outras. A termodinâmica ensina que um sub-sistema pode ter sua entropia reduzida enquanto no sistema como um todo a entropia é crescente, como assegurado pela Segunda Lei. A redução da dissipação específica por intermédio da mudança tecnológica é baseada na reorganização dos sistemas econômicos, que assumem outros territórios organizacionais, que por sua vez indicam redistribuições ecológicas, mesmo que um determinado ecossistema industrial mantenha a sua organização autopoietica. Ganhos em algumas partes do sistema podem implicar perdas em outras partes ou perdas no que se refere a sustentabilidade de longo prazo. Desse ponto de vista as redistribuições ecológicas deveriam ser tomadas tanto sob a ótica da dissipação específica quanto da dissipação total.

As chamadas falhas de mercado resultam em alguns grupos se beneficiando da não internalização de certos efeitos. Os preços relativos dos recursos e serviços ambientais são influenciados pela renda e pelos direitos de propriedade (Martinez-Alier e O'Connor, 1996). Considerar o valor presente de escolhas futuras dos consumidores enfrenta problemas teóricos se não se considera a equidade intrageração (Leff, 1996). Em sistemas econômicos, as trocas

desiguais, dentro e entre as gerações, devem ser consideradas sob o prisma da redistribuição ecológica, sem que se fique preso à busca dos preços corretos.

A economia ambiental neoclássica não lida com relações de poder, nem com o contexto social da apropriação de recursos e os valores implícitos que justificam os termos de troca e que operam os territórios organizacionais, isto é, eles são dados externamente, expressos apenas como um resultado final no mercado de um conjunto de forças (escolhas) individuais. Estes fatores são subsumidos no equivalente monetário, que opera no eixo das causas eficientes. Outros arranjos e múltiplos equivalentes de valor atuam nos ecossistemas industriais, mas no campo neoclássico estão inteiramente submetidos ao equivalente monetário.

No sistema de causalidade aristotélico, as causas finais e formais assumem o mais alto posto⁶⁶. Por sua vez, a mecânica newtoniana omite inteiramente a causa final. Não são finalidades que explicam o movimento e a mudança das coisas no mundo, mas sim as leis naturais, as leis físico-químicas. Com o advento do moderno método científico, a causa final é destituída para dar lugar ao predomínio das causas materiais e eficientes.

Que avaliação podemos fazer da economia neoclássica na perspectiva das causas? Qual o princípio diretor da mudança dos ecossistemas industriais para o *mainstream* na Economia? Sabemos que a linha neoclássica é fortemente inspirada no sistema mecânico Newtoniano, onde não há irreversibilidades (Mirowski, 1989). As conseqüências dessa origem mecânica revelam-se em uma natureza determinista, reversível e atemporal para a alocação eficiente dos mercados ideais, em que estão presentes a racionalidade dos agentes e a substituição de fatores (Söllner, 1997).

Os aspectos autopoieticos do funcionamento do mercado poderiam nos fazer acreditar que as causas eficientes seriam o princípio diretor da mudança no arcabouço ambiental neoclássico. O equilíbrio atingido na demanda e oferta de bens transacionados no sistema econômico se apoiaria em causas materiais e eficientes; não haveria teleologia, um fim determinado que orientasse o estado de equilíbrio do mercado⁶⁷.

⁶⁶ Trata-se de uma finalidade que se realiza dentro do próprio ser, que se destina ao pleno desenvolvimento e perfeição do ser. A causa final se constitui como a atração que o ser sofre para alcançar sua auto-realização.

⁶⁷ A noção de equilíbrio na Termodinâmica se refere a anulação das diferenças de potencial. Em especial na Termodinâmica Estatística, o estado de equilíbrio é aquele de maior probabilidade, o estado de entropia máxima, no qual há um maior número de microestados para um mesmo macroestado. Na Economia Neoclássica, o equilíbrio é dos preços para produtores e consumidores.

Neste sentido, seriam primordiais os processos teleomáticos e não os teleológicos. Como Hayek (1967) expressava, embora a ordenação em dado momento seja dada pelo conjunto das ações de muitos indivíduos, os quais são governados por certas regras, a produção de tal ordenação não é o objetivo consciente da ação individual. Em outras palavras, as atividades dos agentes econômicos constituem os papéis alopoiéticos de cada um deles, mas o resultado do conjunto de interações destes atores é obtido no âmbito da organização autopoietica de maior ordem, a economia em questão, tomada como um ecossistema industrial. Os territórios organizacionais estabelecidos pelo equilíbrio do mercado estariam calcados nos universos de referências (nos valores e regras do jogo), isto é, no eixo das causas eficientes, como verificamos acima. Os agentes econômicos, com base na utilidade, ajustariam entre si as quantidades e preços nas transações. Devemos dizer, ainda que de forma especulativa, que a grande força e predomínio da economia neoclássica tem como um dos suportes mais importantes exatamente os aspectos autopoieticos que acabamos de descrever.

No entanto, o princípio diretor da mudança na economia neoclássica não está no modo como o equilíbrio é atingido, como vimos na perspectiva autopoietica, mas sim na própria noção de tendência ao equilíbrio. Aqui identificamos o finalismo como o verdadeiro princípio diretor da mudança, o que se realiza no interior do ecossistema industrial em direção a sua plenitude.

Vejamos, por exemplo, como a questão ambiental da sustentabilidade é enquadrada. Por intermédio da internalização das presentes externalidades ambientais, o mercado encontraria o seu ponto de equilíbrio em que os preços ajustariam as quantidades transacionadas em benefício de tecnologias que garantiriam a superação dos limites dos recursos naturais e da assimilação de poluentes. Assim, não existiria um problema de sustentabilidade como alardeado pelos ambientalistas e os adeptos de uma Economia Ecológica. Estamos, portanto, diante do primado das causas finais, que levam as atividades econômicas em seu conjunto à perenização no âmbito de um mundo reversível em que o equilíbrio seria sempre atingido. As causas eficientes estariam atuantes na mecânica dos agentes em direção a uma nova solução indeterminada de equilíbrio, mas a economia como um todo, ou o mercado específico analisado, e é isso que importa aqui, estaria seguindo o seu princípio de uma causa final se realizando em direção ao equilíbrio. Nas palavras incisivas de Ayres (1994b):

“O equilíbrio estático walrasiano não é a condição em que vivemos. O mundo real é caracterizado por contínuas mas assíncronas (e imprevisíveis) mudanças estruturais. Diferentes setores são criados; eles crescem, maturam e entram em declínio. E ainda, as clássicas condições para o equilíbrio estático (perfeitas a competição, a racionalidade e a informação) não existem.”

V.2.3 Economia termodinâmica e o imperativo ambiental

Contra-argumentos ao otimismo tecnológico são apresentados pela economia ambiental de base termodinâmica. As noções de limite, finitude e irreversibilidade estão na raiz das visões entrópicas dos processos econômicos⁶⁸. Para enfrentar as verdades inelutáveis da Segunda Lei da Termodinâmica e suas conseqüências na degradação dos recursos do planeta, mudanças radicais na economia deveriam ocorrer (Rifkin, 1980).

Mesmo que ainda seja uma abordagem marginal nas teorias econômicas, a termodinâmica tem um papel fundamental ao apontar as limitações da economia neoclássica, ao justificar a importância do conceito de sustentabilidade e ao estabelecer cenários realistas sobre o progresso tecnológico (Söllner, 1997). Em outras palavras, a termodinâmica serviria para guiar e operar políticas ambientais micro e macro econômicas.

A economia ambiental em suas versões termodinâmicas assinala muito claramente que a sustentabilidade está ligada à busca de uma justiça intergeracional no que se refere ao acesso aos recursos. Neste ponto assumimos um desvio em relação à tradicional escola termodinâmica. Divisamos que o desenvolvimento sustentável, justificado como garantia de acesso aos recursos para as gerações futuras, é incompleto. Apesar de reconhecer que esta é uma tarefa sócio-econômica e ambiental fundamental, a virada para o século 21 aponta para uma premente preocupação com a desigualdade social no acesso aos recursos e benesses na economia, o sistema de trocas comerciais entre países, as grandes massas de excluídos. As condições ecológicas para a sustentabilidade não podem ser descoladas das questões de distribuição ecológica e desigualdades sociais (Leff, 1996). O debate da sustentabilidade corre o risco de se tornar a luta pelos direitos das futuras gerações tomando como impassíveis as relações que determinam uma distribuição ecológica em que parte da população está simplesmente alijada ou então sofre os prejuízos que tal organização autopoiética acarreta.

⁶⁸ Para o romeno Georgescu-Roegen (1971), a atividade econômica é considerada como transformadora dos recursos (matéria e energia) de baixa entropia em rejeitos de alta entropia (calor dissipado e poluição). Georgescu se propõe a fornecer uma outra dimensão da Economia, ao criticar os modelos mecânicos que lhe dão suporte.

Note-se que a referência à igualdade aqui não indica um estado final de justiça social, expresso em uma sociedade homogênea, mas sim ao contínuo processo de criação de novas instituições e valores enraizados no respeito à equidade nas transformações tecnológicas, econômicas e sociais.

É preciso admitir que o ambientalismo ainda está por demais calcado em bases teleológicas. Isto pode ser verificado tanto em concepções teóricas quanto nos discursos e práticas ecológicas. A idéia mesma da degradação permanente e de um estado de equilíbrio final, asseverada em termos dramáticos pelas derivações da segunda lei da termodinâmica⁶⁹, serve como princípio para posturas políticas que não vêem outra saída para as sociedades humanas que não seja uma radical reconversão da economia para uma fase pré-industrial ou a adoção do modelo de crescimento zero para retardar a catástrofe inevitável. As referências platônicas são evidentes aqui: a natureza terrena como a cópia da idéia de natureza-essência, bela e indevassável do mundo das idéias, uma cópia que desvanece continuamente.

Mesmo admitindo que a taxa de crescimento da entropia não é determinada, Georgescu-Roegen (1971) assinala que as atividades econômicas contribuem para acelerar o processo natural de degradação entrópica, do qual não é possível escapar. O importante aqui é destacar como a economia de base termodinâmica concebe a constituição e a mudança dos sistemas econômico-naturais e qual a plataforma ecológica ensejada por seus adeptos.

Antes, para o melhor entendimento das posições da economia termodinâmica neste debate, devemos destacar em um pequeno parêntesis que os sistemas auto-organizados são caracterizados por fluxos espacialmente estáveis de materiais e seqüências cíclicas de reações químicas, dirigidas por um fluxo contínuo de baixa entropia externa. Como exemplos de sistemas auto-organizados, os sistemas vivos e a biosfera como um todo só podem ser mantidos em estados afastados do equilíbrio termodinâmico. A chave da auto-organização não é a minimização da produção entrópica mas sim a dissipação da energia disponível a partir de uma fonte externa (Nicolis e Prigogine, 1977). Esta visão, de que a redução da entropia local está baseada em trocas entrópicas com o exterior, estabelece um novo paradigma, o das estruturas dissipativas, que pode ser explorado de maneira diversa no campo da Ecológica.

⁶⁹ As contínuas conversões de calor em trabalho só podem ser feitas ao custo de uma dissipação de parte desse calor. Como consequência, as diferenças da natureza se anulariam, levando o Universo ao estado final de equilíbrio térmico, denominado no século 19 como a morte térmica.

Em um livro emblemático da visão termodinâmica, Rifkin (1980), seguidor de Georgescu-Roegen, afirma que este novo paradigma das estruturas dissipativas na verdade esconde alternativas espúrias para não encarar a questão entrópica, que vem a ser a principal verdade ecológica dos sistemas econômicos. Rifkin afirma que não entende como a simplicidade extrema desta verdade, a de que os sistemas econômicos se baseiam na produção entrópica crescente, não seja suficiente para estabelecer uma nova estratégia para o bem-estar humano no longo prazo, qual seja, a estratégia de minimização da produção entrópica em todos os campos das sociedades.

Na verdade, a visão de Georgescu, Rifkin e seguidores é calcada em uma interpretação termodinâmica que privilegia a idéia da degradação contínua da Natureza original, o caráter inelutável do destino que levará à “morte térmica” do universo, uma negatividade intrínseca aos processos econômicos da qual não se escapa a não ser ‘desacelerando’ o crescimento de entropia de modo a manter por mais tempo aquilo que tende inexoravelmente ao fim. Não haveria outra solução senão a redução dos fluxos em valor absoluto, ou seja, o sistema econômico deveria encolher como um todo para que a degradação entrópica declinasse. Este aspecto determinista e, de acordo com a nossa visão de ecossistemas industriais, eminentemente finalista desta visão termodinâmica não consegue explorar a permanente criatividade dos sistemas auto-organizados na busca de regimes favoráveis à sua manutenção e crescimento. E assim, ao nosso ver, perde a chave do entendimento de como os sistemas econômicos evoluíram e de como podemos vislumbrar uma saída para os impasses ambientais do nosso modelo de desenvolvimento.

É claro que não se pode negar à Segunda Lei da Termodinâmica um estatuto universal, mas é preciso identificar as nuances do balanço entrópico dos sistemas longe do equilíbrio. A rejeição de Rifkin às visões ecológicas baseadas na teoria das estruturas dissipativas até se justifica quando fica patente a utilização do meio ambiente, ou de outras partes do sistema maior, como fonte inesgotável de recursos de baixa entropia e sorvedouro de rejeitos de alta entropia, tanto na dimensão espacial como temporal.

O crescimento e sustentação dos sistemas econômicos se dão às custas da dissipação entrópica, da degradação de outros sistemas econômico-naturais. Exatamente como foi forjado o modelo industrial expansionista dominante no século 20 com base na extração intensiva de

minerais e consumo de fontes energéticas não-renováveis⁷⁰. Para Rifkin, o novo paradigma científico da teoria das estruturas dissipativas não seria o modelo adequado, pois se concentraria apenas no aspecto de criação de ordem, esquecendo a contínua degradação entrópica do ambiente como um todo.

No entanto, repetimos que a questão fundamental é a mudança das organizações autopoieticas, as quais podem ocorrer tanto no sentido de um produtivismo desenfreado que acredita na reversibilidade e coloca em plano secundário o tema dos problemas ambientais, ou então no sentido da busca de uma sustentabilidade que incorpore as tensões sociais resultantes da distribuição ecológica de recursos. Para o primeiro caso, o crescimento econômico não deve estar submetido a restrições de ordem ambiental, pois isso é resolvido, como vimos, no equilíbrio do mercado. Para o segundo caso, as organizações autopoieticas podem estar alinhadas com a utilização de energias renováveis de base solar e o fechamento do ciclo de materiais, para os quais a Ecologia Industrial oferece um conjunto de conceitos e princípios.

A proposta deve ser clara neste ponto. Uma transição para sistemas econômicos ditos sustentáveis ambientalmente será ilusória e perversa se não for capaz de incorporar o desafio imposto por uma distribuição ecológica extremamente desigual, como a que se verifica no mundo, entre países e no interior de países e regiões. Uma agenda desta natureza não significa um desprezo das questões intertemporais. Ao contrário, só haverá sustentabilidade futura se as disparidades ecológicas forem colocadas no centro das questões ambientais locais e globais.

Trata-se de um grande equívoco basear o desafio ambiental na expectativa de catástrofes futuras, seja para evitá-las ou para melhor enfrentá-las. Os problemas ambientais, na sua maior parte, ocorrem por “implosão” e não por “explosão”. São lentos, seus efeitos se disseminam com a força da irreversibilidade. É evidente que os problemas ambientais mais notados são os explosivos, tais como acidentes nucleares, derramamento de óleo ou o vazamento de um produto químico.

⁷⁰ Houve sensível redução do consumo de energia por produto de alguns setores capital e energia intensivos como Ferro e Aço, Cimento, Químico, como fica evidenciado nos estudos energéticos de WEC (1995), e nas análises sobre o decréscimo da intensidade de materiais (\$/kg) das economias mais industrializadas (WRI, 1997). No entanto, a base insustentável já se torna mais evidente desde o fim do século. Há grande distância entre as evidências científicas ligadas, por exemplo, ao efeito estufa (IPCC, 2001) e as forças no meio científico e político que não aceitam as evidências e rejeitam acordos internacionais de redução das emissões de gases causadores do efeito estufa.

No entanto, os problemas mais agudos se revelam na perda da biodiversidade, no desflorestamento, na redução dos mananciais de água potável, na desertificação, no aumento do efeito estufa, na poluição atmosférica e hídrica com todos os efeitos adversos sobre os ecossistemas naturais e para a saúde humana etc. Os problemas ambientais não estão somente no futuro, mas sim no presente. As grandes tragédias ambientais já ocorrem hoje, não precisam de uma data para ocorrer.

A economia ambiental de base termodinâmica não é um bloco monolítico nas suas concepções teóricas, quanto mais nas suas derivações ecológicas. No entanto, sua principal substância é o conflito intertemporal; apesar das iniciativas recentes de um grupo de pesquisadores da linha da Economia Ecológica (O'Connor, 1997) reforçarem uma visão mais distributiva intratemporal, ainda não se formou uma escola mais ativa neste setor.

V.3 Sistemas de produção de aço como ecossistemas industriais

Depois de elaborar os temas da constituição e mudança dos ecossistemas industriais, e de avaliar as economias ambientais neoclássica e termodinâmica sob o enfoque ecológico, passamos à consideração dos sistemas de produção de aço como ecossistemas industriais específicos.

Em primeiro lugar, o processo de produção de aço é uma sequência de unidades operacionais conectadas para a transformação de materiais através do uso de energia. O fluxo de energia e materiais sempre existe em relação a territórios organizacionais, que por sua vez consistem no conjunto de inter-relações entre os diversos componentes da sequência de unidades operacionais. Os fluxos de energia e materiais e os arranjos organizacionais são mutuamente dependentes, tal como descrito anteriormente. A contabilidade exérgica “lê” os fluxos de energia e materiais como informação termodinâmica (desvio do equilíbrio). A contabilidade informacional da organização já é mais complicada porque se defronta com aspectos funcionais. Wicken (1987) afirma que a correlação entre organização de um sistema e sua dissipação entrópica é difícil, muito pelo caráter qualitativo e funcional da organização.

Os territórios organizacionais são mantidos e se conectam entre si por fluxos informacionais. Ao invés de medir a organização, verificamos em unidades exérgicas as diferenças (variações) desses territórios, por exemplo, quando se introduz um equipamento de

controle de poluição, um motor mais eficiente, uma mudança operacional. Podemos ler tal mudança como informação tecnológica e contabilizá-la por seu custo em unidades monetárias e conectá-la a uma mudança na informação termodinâmica em outro território organizacional. Outro exemplo, uma redução da perda exergética na forma de reciclagem de pós recolhidos em filtros ou dessulfuração para obtenção de enxofre. Coletar material particulado e descartá-lo como lama em depósitos não altera a perda exergética associada mas sim o território organizacional associado. Um despejo de substância tóxica em um rio significa um ganho exergético para o sistema rio, pois resulta em um afastamento ainda maior do equilíbrio termodinâmico. No entanto, o poluente pode afetar os aspectos funcionais do rio, ou seja, pode romper as relações que os seres aquáticos e a comunidade humana mantinham com os fluxos característicos do rio (Ayres, 1996).

A mudança tecnológica deve ser apreciada também sobre o eixo *Phylum*-Fluxos. O fluxo de energia e materiais que define a transformação de insumos para a produção de aço caracteriza o processo como um programa, como uma seqüência de regras que devem ser obedecidas. A informação como programa é responsável pela condução e homeostase do processo. É um conjunto de causas formais que liga os dois pólos. A produção de aço tem assim suas causas formais e materiais nesses dois eixos ‘Fluxos-*Phylum*’ e ‘Territórios Organizacionais-Fluxos’. A informação tecnológica, por exemplo o filtro com reciclagem, muda o fluxo de energia e materiais, os territórios organizacionais e o programa de produção, e portanto trabalha nos eixos das causas formais e materiais. A informação tecnológica nos interessa confrontar as variações do fluxo de energia e materiais. A variável exergia, medida com referência a um sistema-ambiente, é usada para contabilizar tais fluxos.

Este é o sentido da hierarquia dos princípios da Ecologia Industrial, quando propugna privilegiar a prevenção da poluição em detrimento do controle de poluição. Seria recomendável, deste ponto-de-vista, eliminar a geração do rejeito, cuja exergia está associada ao impacto ambiental direto ou indireto para uma determinada organização autopoietica. Vamos tomar o exemplo da contaminação da principal fonte de água potável de uma cidade. O efluente contaminante apresenta valores exergéticos elevados em relação ao ambiente referência, neste caso a própria água do rio. Fisicamente falando, podemos considerar que a entropia do ambiente foi reduzida na medida em que o efluente causou um arranjo pouco provável, mais distante do equilíbrio do sistema. No entanto, ao contaminar a água, o efluente

causou impactos negativos na organização autopoietica ‘cidade’, por afetar seus habitantes e promover a ruptura de uma série de relações que mantinham a cidade e garantiam sua ascendência como organização.

A passagem da concepção filosófica do ecossistema industrial para os sistemas de produção de aço se faz pela Ecologia Industrial. Quando são especificadas as fronteiras espaço-temporais – como fizemos com os sistemas de produção de aço – os fluxos de energia e materiais, os territórios organizacionais e os processos de produção são definidos e quantificados. E assim foi possível traçar as linhas de um programa de Ecologia Industrial para o aço, com avaliações comparativas sobre as rotas e plantas siderúrgicas. Em particular, as empresas aparentemente apresentam objetivos bem definidos em um *telos* econômico, para o qual predominam as causas finais e sua unidade organizacional autopoietica está voltada para a obtenção de lucros, assim como a planta industrial foca na produção de produtos de aço.

É interessante, nesta altura, voltar ao trabalho de Valero (1994) sobre as quatro causas. A causa material está nos insumos de produção (convertidos aqui em termos exergéticos); a causa formal se revela nas matrizes que definem o programa de produção (metodologia de insumo-produto, aplicada para emissões atmosféricas e perdas de exergia); a causa eficiente está nas leis físico-químicas que estabelecem os limites termodinâmicos para a transformação da energia e dos materiais (implícitas nos dados reunidos); e a causa final está ligada ao produto (a referência do aço líquido).

Verifica-se com nitidez as diferenças em relação aos pólos e componentes do ecossistema industrial abordado ontologicamente neste capítulo. E neste ponto se abre o leque das formulações ecopolíticas de um programa de Ecologia Industrial do aço. É verdade que ao longo da segunda metade do século 20 houve grandes reduções no consumo de energia e materiais por tonelada de aço produzida, à medida que novos processos de produção e novas tecnologias incrementais de cada processo foram sendo adotados (ver capítulo II). A redução significativa das emissões de poluentes é mais recente, pois só a partir de pressões dos ambientalistas, em um primeiro momento, e mais tarde da opinião pública em geral as empresas passaram a investir em controle e prevenção de poluição. A tendência de compactação dos processos, com maior eficiência energética global e menores impactos ambientais, permanece e é projetada para as futuras tecnologias, muitas delas já em fase de planta-piloto (Beer et al., 1998).

No entanto, algumas observações são necessárias. Quando se aplicam metodologias de ciclo de vida, verifica-se que existem compensações negativas para certas escolhas tecnológicas. Os poluentes podem migrar de um meio a outro com a adoção de determinada tecnologia de controle de poluição, quando, por exemplo, o despoeiramento é realizado com *scrubbers*, resultando na formação de lama que, dependendo de sua composição e das tecnologias disponíveis, pode ser levada para a disposição final em aterros. O outro caso que merece destaque é a busca de substitutos, como o ferro-esponja, para a sucata de alta qualidade (com baixo teor de impurezas e de maior custo). O aumento da produção de ferro-esponja significa um aumento no consumo de minério de ferro, de eletricidade e de pelotas, na maior parte dos casos, com todas as implicações ambientais que pudemos verificar nos capítulos III e IV. O fechamento do ciclo de materiais, um dos princípios mais importantes da Ecologia Industrial encontra nessa tendência um grande obstáculo para sua efetivação.

Neste sentido é importante notar que o ecossistema industrial caracterizado pela produção mundial de aço evolui para arranjos mais eficientes e de menores impactos ambientais, mas não necessariamente seguirá uma trajetória que aumente a reciclagem dos materiais. As opções tecnológicas neste caso apontam para um outro requisito dos ecossistemas industriais: a flexibilidade do uso de insumos, que permita a melhor “adaptação” e “sobrevivência” dos ecossistemas siderúrgicos nos meios físico, econômico e social a que estão submetidos.

E não se trata apenas de ajustes como um novo sistema de taxas para promover o fechamento do ciclo de materiais e a redução da poluição de toda a cadeia de produção. As próprias demandas por aços de maior qualidade (com menor teor de impurezas, necessários para os produtos planos) e de aços de maior nobreza nas aplicações (com ligas e superfícies metálicas ou combinado com materiais plásticos na montagem de bens) estabelece limites para a utilização de sucata, ou então, exige maiores custos na separação e limpeza da sucata.

Não há finalismo de nenhuma ordem na evolução dos ecossistemas industriais siderúrgicos, nem no sentido de soluções tecnológicas que tornem irrelevantes os aspectos ambientais da produção de aço (imperativo tecnológico dos ambientalistas neoclássicos), tampouco no sentido da escatologia termodinâmica que indique a degradação irrefreável do ambiente associado. Há uma abertura irreduzível para tais ecossistemas industriais em que as causas eficientes e materiais são as de fato ativas e predominantes. O programa de

sustentabilidade da Ecologia Industrial tem a termodinâmica como seu pilar mais importante. Mas esta deve ser usada como guia dos novos arranjos dos fluxos de energia e materiais e da avaliação das tendências tecnológicas.

Finalmente, destacamos também a importância da resiliência das organizações autopoieticas para o caso dos sistemas de produção de aço como ecossistemas industriais. Para seguir no exemplo anterior, a capacidade de controlar os efeitos maléficos da contaminação de um rio por um efluente tóxico em qualquer etapa de produção de aço, ou de recuperar as suas funções originais pela assimilação de tais efeitos devem ser colocadas em evidência, pois algumas partes do ecossistema industrial mais abrangente que cumpriam papéis alopoiéticos na organização autopoietica maior, podem ser destruídas e mesmo assim a organização autopoietica pode se manter, ser recuperada do impacto e voltar às relações anteriores. Isto pode ter conseqüências positivas ou negativas. No primeiro caso podemos considerar a recuperação ambiental de determinada região ou grupo de pessoas nas partes atingidas da cidade. No lado negativo, pode indicar um custo elevado na forma de sérios prejuízos à saúde da população e às atividades econômicas que fazem uso do rio. Ou seja, como indicamos neste capítulo V, *organizações autopoieticas que perfazem papéis alopoiéticos podem ser destruídas sem que a organização autopoietica maior seja ameaçada*. Estamos assim no campo político propriamente dito.

Capítulo VI

ECOLOGIA INDUSTRIAL: OS PRIMEIROS E O ENÉSIMO PASSO

Este capítulo é voltado para as conclusões e para um apanhado dos pontos mais relevantes da dissertação. A Ecologia Industrial foi tratada neste trabalho em três dimensões:

1. Apresentação de conceitos (revisão bibliográfica e análise crítica);
2. Aplicação de princípios de Ecologia Industrial a sistemas de produção de aço (inventário de ciclo de vida com foco em emissões atmosféricas e contabilidade exergética); e
3. Proposição de um conceito de ecossistema industrial (implicações para uma Ecopolítica).

A amplitude do trabalho revela a própria concepção de uma Ecologia Industrial abrangente, em que a analogia biológica constitui tão somente um primeiro passo. A partir daí se colocam hercúleas tarefas para colocar em prática os preceitos de um novo paradigma econômico-ambiental. Este é o sentido do enésimo passo: fazer da Ecologia Industrial uma fonte permanente de princípios que possam auxiliar no entendimento da evolução dos sistemas industriais específicos e também na reorganização em geral das atividades econômicas em torno da idéia de sustentabilidade.

A Ecologia Industrial se faz abrangente ao incorporar, em um só programa, métodos de contabilidade, análise e modificação dos fluxos de energia e materiais. A partir de analogias biológicas com ecossistemas naturais, identifica e propõe novos arranjos para tais fluxos, e busca a integração das atividades econômicas e a redução da degradação ambiental. À primeira vista, o que mais se destaca é a idéia da reciclagem de materiais, de utilização de rejeitos de uma atividade econômica como insumo de outra. No entanto, como tentamos mostrar, a Ecologia Industrial incorpora outras noções como Metabolismo Industrial, Produção Mais Limpa, Prevenção da Poluição e Projeto para o Ambiente. Estabelecemos três categorias de princípios da Ecologia Industrial: modificação dos fluxos de energia e materiais, fechamento dos ciclos de materiais e desmaterialização. A aplicação (micro e macro) destes princípios pode estar vinculada a uma etapa de produção em uma planta industrial, a toda a

rota de produção, ao ciclo de vida dos materiais, às atividades econômicas de uma região específica, ou mesmo a uma economia inteira.

Não nos parece fundamental o conflito entre Prevenção da Poluição e Ecologia Industrial, na medida em que a primeira faz parte, como um princípio colocado no alto da hierarquia de ações prioritárias, do programa da Ecologia Industrial. A convergência depende das fronteiras do sistema. Se, no caso de um eco-pólo industrial, uma empresa deixa de produzir um subproduto que vinha sendo consumido por outra, devido a uma inovação tecnológica, o princípio de reciclagem externa, mais abaixo na hierarquia, dá lugar ao princípio da prevenção da poluição, e a empresa consumidora deve adotar outra alternativa.

Na Figura 44 é mostrado um diagrama em que os tópicos da Ecologia Industrial são apresentados de acordo com a caracterização quantitativa/qualitativa e conceitual/prática. É uma maneira de demonstrar a amplitude da base teórica e dos desafios práticos com que se depara a Ecologia Industrial na implementação de seus princípios. No presente trabalho, a maior parte dos aspectos conceituais foram apresentados, e nos aspectos práticos nos concentramos na formação de uma base de dados utilizada para a realização de um Inventário do Ciclo de Vida para o aço.

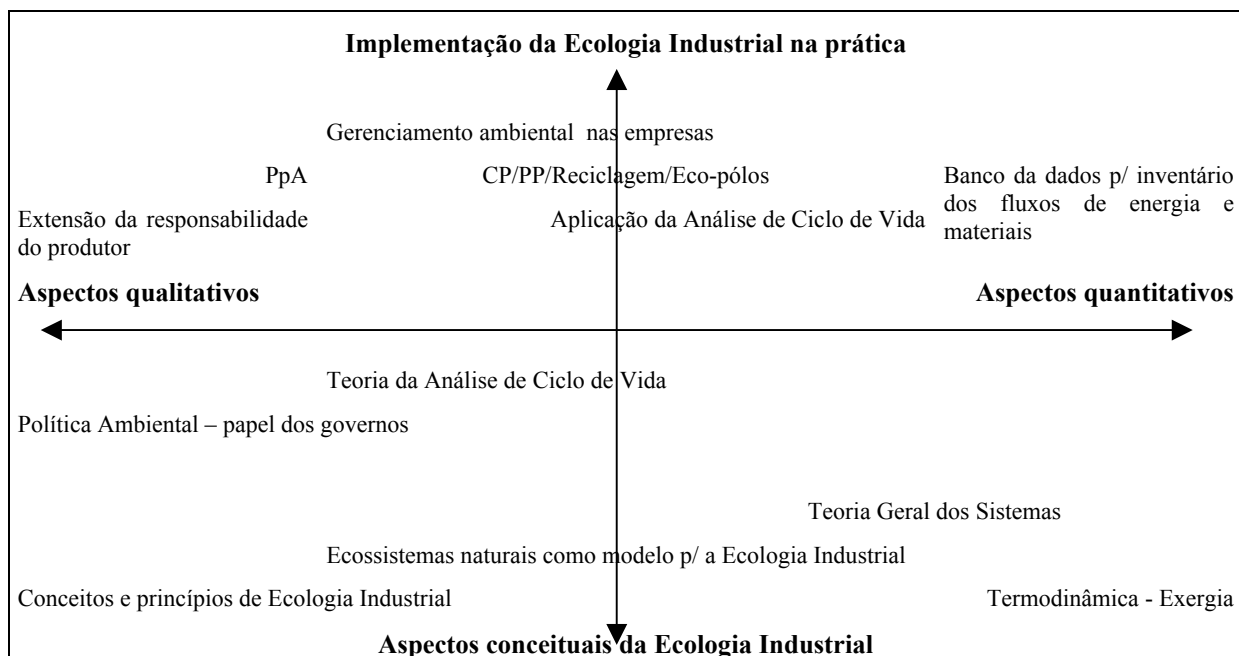


Figura 44 - Representação esquemática qualitativa/quantitativa e conceitual/prática dos vários temas da Ecologia Industrial. Elaboração própria a partir de Marstrander et al. (1999)

Como foi ressaltado, a Ecologia Industrial, como um conjunto integrado de conceitos e práticas, só foi desenvolvida a partir dos anos 90, e ainda não tem como campo do saber uma estrutura completamente definida. A aplicação de noções de Prevenção de Poluição e Produção mais Limpa já apresentam resultados significativos em muitos setores da economia (Oldenburg e Geiser, 1997), ao nosso ver em razão de sua aplicação estar vinculada diretamente às empresas e suas unidades industriais. É na perspectiva das atividades preventivas que se fala em estratégias sem perdedores, em que os ganhos ambientais (associados aos benefícios sociais) são acompanhados por benefícios privados das empresas que investem em tecnologias/medidas ambientais (Porter e van der Linde, 1995a).

O debate em torno das oportunidades de ganhos privados e sociais dos investimentos ambientais ainda está longe de se encerrar. Há uma evidente necessidade de se analisar caso a caso, de acordo com as metas de redução da poluição e/ou eficiência energética. No entanto, em linhas gerais advogamos a hipótese de Porter, ainda mais no caso brasileiro, em que estratégias privadas, primeiro, de negação do problema ambiental em nome de maior competitividade, e, segundo, de limitados controles de poluição *end-of-pipe* podem se mostrar bastante prejudiciais no futuro exatamente por razões de perda de competitividade⁷¹.

A Ecologia Industrial ao nosso ver ultrapassa as fronteiras de sua própria delimitação inicial como um campo de conhecimento que realiza inventários do metabolismo industrial e que propões arranjos organizacionais fortemente baseados em reciclagem de materiais. O primeiro passo para além desta fronteira se revela na pergunta de um dos autores mais atuantes da Ecologia Industrial. Allenby (1999) questiona sobre a relação entre a Ecologia Industrial e cultura/ideologias. Deveria a Ecologia Industrial incluir aspectos sociológicos, éticos, teológicos ou de ciência política? No capítulo I vimos como ele percebe que uma determinada opção tecnológica favorável do ponto de vista da Ecologia Industrial pode esconder outros condicionantes do mundo real das sociedades humanas. A rígida separação das ciências ambientais da dimensão humana constitui uma violação de um importante princípio da Ecologia Industrial: a visão mais global dos sistemas em sua complexidade peculiar e inequívoca. Ao mesmo tempo o autor alerta para o perigo da Ecologia Industrial se

⁷¹ Ver Machado (2002) para uma defesa vigorosa de uma política industrial brasileira voltada para um desenvolvimento que leve em conta a questão ambiental como fator de aumento de competitividade.

transformar em algo normativo, que possa afastar-se da saudável objetividade e se tornar apenas um receituário político.

Seguimos a concepção geral de Allenby (1999) quanto à importância da objetividade e da consideração de aspectos sócio-econômicos, todavia não temos o temor de que formulações ecopolíticas possam desvirtuar a Ecologia Industrial de seu caminho como ciência da sustentabilidade. Ao contrário, acreditamos que a Ecopolítica derivada da Ecologia Industrial possa contribuir com o programa da sustentabilidade dos sistemas econômicos. Nossa opção não foi incorporar mais um critério social ou cultural em um modelo de decisão de alternativas tecnológicas, como parece bastante promissor. Nossa escolha foi o trabalho de base filosófica para o conceito de ecossistema industrial. Foi como fincar pilares ontológicos para a Ecologia Industrial, não para estabelecer trajetórias dadas e garantidas de um ser desde já, mas sim de fazer da ontologia uma fonte para uma análise e uma tomada de posição da Ecopolítica e seus desafios.

VI.1 Ecologia Industrial da produção de aço

A produção de aço, por suas características e grande volume de produção, está associada a um consumo intensivo de energia e materiais e a significativas emissões de poluentes e resíduos. Caso sejam incluídas etapas de produção de insumos para a indústria siderúrgica, o quadro de degradação ambiental se torna ainda mais acentuado. Por outro lado, os sistemas de produção de aço constituem um caso exemplar da interconexão entre etapas de produção, com grandes unidades dentro de uma mesma planta realizando o intercâmbio de energia e materiais. Além disso, o índice de reciclagem do aço é de cerca de 60-70%, bastante elevado em comparação a outros materiais.

Ao fazer um inventário do ciclo de vida do aço, nosso objetivo foi comparar três processos de produção (integrado convencional, integrado com fusão redutora e semi-integrado) do ponto de vista das emissões atmosféricas e da eficiência exergetica. Na verdade, fomos obrigados a fazer algumas simplificações devido à falta de dados suficientes para algumas etapas/insumos de produção. Os processos estudados estão de acordo com as grandes linhas de evolução dos processos siderúrgicos (Figura 45).

Uma premissa adotada no início do trabalho, e confirmada mais tarde pelos dados, foi a de que havia uma grande disparidade de desempenho ambiental para um mesmo processo de produção. Ou seja, considerando, por exemplo, plantas siderúrgicas semi-integradas com forno elétrico, encontramos diferenças significativas no consumo de energia e na emissão de poluentes. Tais diferenças são ainda mais acentuadas para as plantas com base em processos integrados, principalmente devido à operação de muitas plantas com idade avançada e de outras de construção mais recente. Já no caso das integradas com fusão redutora COREX, tais diferenças são mínimas pois o processo em escala industrial foi desenvolvido recentemente e há poucas plantas em operação. Por isso, estabelecemos níveis para emissões atmosféricas e eficiências exergeticas para cada um dos processos. Esta metodologia serviu como um mapeamento dos sistemas de produção de aço existentes e permitiu vislumbrar caminhos da evolução do desempenho ambiental dos processos. Na Tabela 65 indicamos para cada etapa de produção as principais emissões e resíduos sólidos gerados.

Na Tabela 66 comparamos aspectos ambientais e tecnológicos dos diversos processos de produção, inclusive apontando prós e contras das novas tecnologias ainda em fase inicial de difusão no mercado. A tendência de compactação de unidades e flexibilidade no atendimento às demandas do mercado de aço tem impulsionado a evolução dos processos siderúrgicos.

Um ponto relevante em nossa análise foi a identificação das vantagens e compensações do desempenho ambiental de certas alternativas tecnológicas. As conseqüências são evidentes quando se determinam as chamadas Melhores Tecnologias Disponíveis (MTD), as quais não são consensuais no meio siderúrgico. Nem sempre uma MTD específica permite atingir fatores de emissão baixos para toda espécie de poluentes. Pudemos identificar as escolhas (e seus custos) entre a redução de poluentes atmosféricos, efluentes líquidos e resíduos sólidos. Mesmo assim, é possível verificar as vantagens de determinadas rotas de produção. São mostrados alguns dos principais resultados obtidos na Tabela 67.

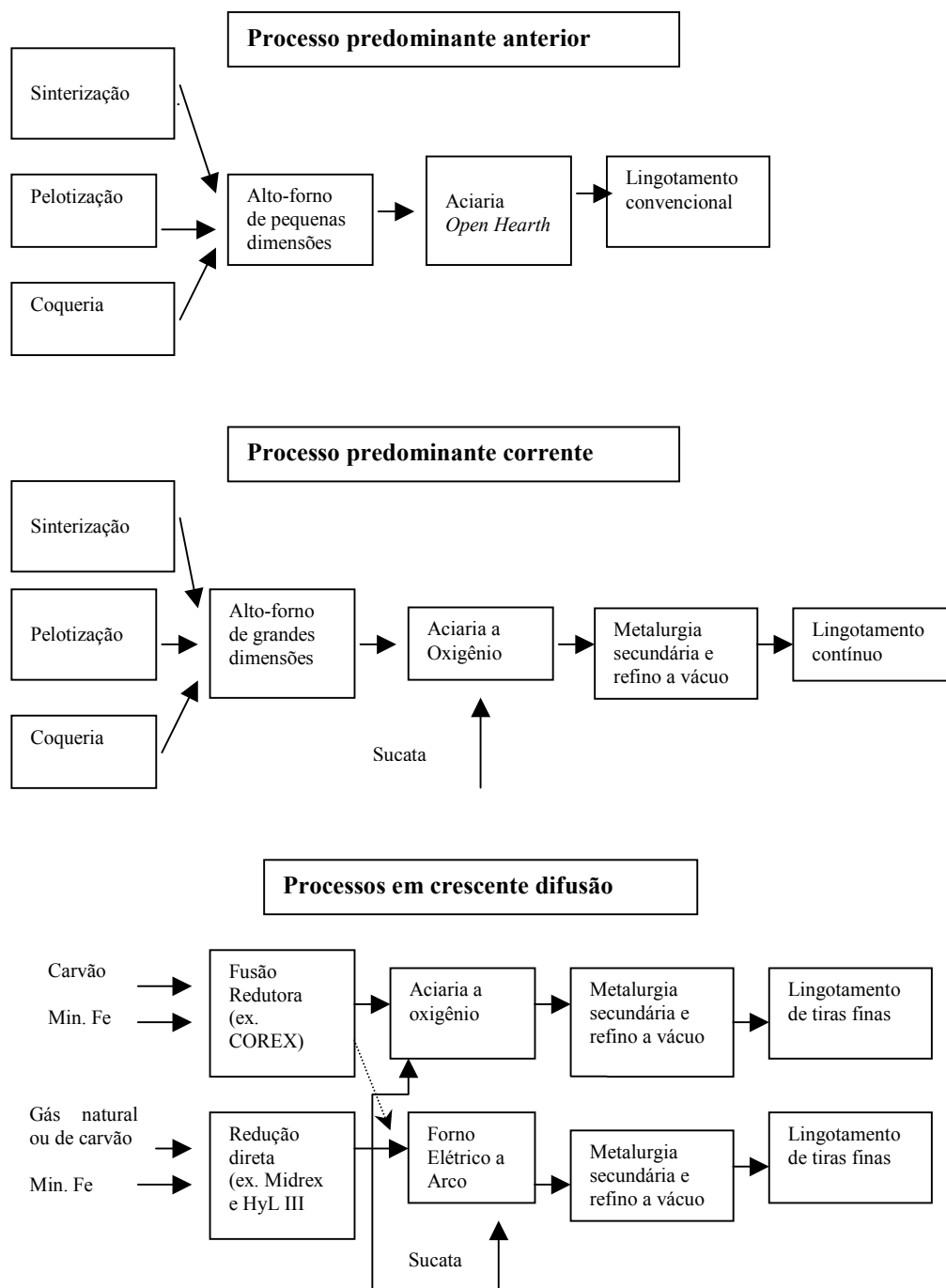


Figura 45 - Diagrama esquemático com a evolução dos processos de produção de aço a partir do período de predominância das aciarias Open Hearth (Freuhan, 1996)

Tabela 65 - Principais aspectos ambientais de cada etapa dos sistemas de produção de aço

Principais etapas de produção (excluindo etapas de lingotamento, laminação e acabamento)	Emissões atmosféricas importantes	Efluentes líquidos	Resíduos sólidos
Mineração de carvão	Material particulado, NOx, CH ₄		Gdes. Volumes de rejeitos (<i>overburden</i>)
Mineração de ferro	Material particulado		Gdes. Volumes de rejeitos (<i>overburden</i>)
Mineração de calcáreo	Material particulado		Gdes. Volumes de rejeitos (<i>overburden</i>)
Fornecimento de sucata (armazenagem e processamento)	Metais pesados	Óleo	
Fornecimento de energia elétrica	Material particulado; CO, CO ₂ , SO ₂ , NOx (termoelétricas a carvão)		
Pelotização	Material particulado; CO, CO ₂ , SO ₂ , NOx, VOCS, HF; HCl		
Sinterização	Material particulado; CO, CO ₂ , SO ₂ , NOx, VOCS, HF; HCl		Na planta de sinterização uma série de resíduos (pós, lamas, carepas etc) são reciclados
Coqueria	Material particulado; NOx, VOCs; benzeno, PAH, CH ₄	Amônia, benzeno, tolueno, xileno	alcatrão
Alto-forno	Material particulado; CO, CO ₂ , SO ₂ , NOx, VOCS, HF; HCl, H ₂ S		Escória, pós e lamas
Aciaria a Oxigênio	Material particulado; metais (ex. zinco); dioxinas, VOCs, CO		Escória, pós e lamas
Aciaria Elétrica	Material particulado; metais (ex. Zn, Pb, Me); dioxinas;		Escória, pós e lamas
Redução Direta	NOx		
Fusão redutora COREX	CO ₂		
Lingotamento		Óleo	
Laminação	Material particulado; CO, CO ₂ , SO ₂ , NOx, VOCS, vapores ácidos		Carepas, lamas, <i>pickle liquor</i>
Acabamento	Material particulado, metais	Óleo;	
Limpeza de gases			Pós, Lamas, metais
Tratamento de água		Sólidos em Suspensão, meia, óleo, amônia	
Disposição em aterros			Resíduos químicos variados
Transporte de materiais	CO ₂ , SO ₂ , NOx		

Tabela 66 - Aspectos energéticos, ambientais e tecnológicos das rotas de produção de aço

	Aspectos energéticos / tecnológicos	Aspectos ambientais	Avanços recentes e Tecnologias emergentes
ROTA INTEGRADA Mineração de ferro, calcáreo e carvão – Pelotização – Sinterização – Coqueria – Alto-forno – Aciaria a Oxigênio	Consumo de carvão ***; Consumo de energia elétrica *; Consumo de oxigênio **; Redução do consumo energético com lingotamento contínuo; Uso de GCO, GAF e GAC nas outras etapas da planta siderúrgica, para geração elétrica e de vapor; PCI reduz demanda por coque.	Geração de poluentes *** CO ₂ ***	Lingotamento de tiras finas a frio; Coqueria sem geração de subprodutos (permite cogeração a partir do calor de processo)
ROTA SEMI-INTEGRADA ❖ 100% sucata – Aciaria Elétrica ❖ Min. Fe – Pelotização – Redução Direta (DRI) – Sucata – Aciaria Elétrica	Normalmente escala de produção de até 500 mil t/ano; Lingotamento contínuo permitiu aumento de eficiência e produtividade (atendimento a mercados locais específicos é facilitado); Consumo de energia elétrica ***; Consumo de oxigênio *; Redução direta do minério de ferro com gás natural ou carvão gaseificado elimina a etapa de coqueificação; Produção de DRI demanda minério de ferro; Uso de DRI aumenta consumo elétrico na Aciaria Elétrica.	CO ₂ * Geração elétrica a carvão com fatores de emissão altos aumenta emissões de CO ₂ ; Geração de resíduos sólidos perigosos no Forno Elétrico a Arco	Lingotamento de tiras finas a frio; Processos de Redução Direta: Midrex, HyL III em forno de cuba c/ GN como redutor; Fior, Carbetto de ferro e Circofer em leito fluidizado; Circofer e Circored a carvão em leito fluidizado; Fastmet e Finmet – uso de finos de ferro.
ROTA INTEGRADA COM FUSÃO REDUTORA COREX Mineração de ferro, carvão – Pelotização – COREX – Aciaria a Oxigênio ou Elétrica	Consumo de carvão *** (superior às integradas); Consumo de oxigênio ***; Utiliza vários tipos de carvão não coqueificáveis; Geração de gás de exportação utilizado para geração termoelétrica e de vapor, redução em DRI, Pelotização.	CO ₂ *** (inferior às integradas); Maior geração de resíduos sólidos.	Pesquisa p/ maior utilização de finos de minério de ferro; Processos de fusão redutora: Cyclone Converter Furnace (CCF), Direct Iron Ore Smelting Reduction Process (DIOS), Hismelt e Romelt

Nota: *** (alto); ** (médio); * (baixo)

Tabela 67 - Principais resultados comparativos dos processos analisados para emissões atmosféricas e perdas/eficiências exergéticas

	Integrada Convencional		Semi-integrada		Integrada COREX				
Principais etapas de produção (excluindo etapas de lingotamento, laminação e acabamento)	Mineração de carvão, ferro e calcáreo; Geração de energia elétrica; Pelotização, Sinterização, Coqueria, Alto-forno, Aciaria a oxigênio; (inclui plantas de oxigênio e calcinação)		Geração de energia elétrica; Aciaria Elétrica; (p/ carga c/ DRI [ferro-esponja] inclui etapas de mineração de ferro, pelotização e redução direta)		Mineração de carvão, ferro e calcáreo Geração de energia elétrica; Fusão redutora COREX, Aciaria a oxigênio ou elétrica; (inclui planta de oxigênio e pode incluir pelotização e redução direta)				
Insumos por tonelada de aço líquido p/ Caso Base e nível de emissão Médio					COREX-Aciaria O2		COREX-Aciaria Elétrica		
Calcáreo (kg)	427		103		364		355		
Cal (kg)	55		45		62		73		
Min. Ferro (kg)	1633		0		1028		1327		
Óleo Comb. (kg)	34		7		31		31		
Gás natural (Nm3)	42		27		11		124		
Eletricidade (kWh)	145		554		66		123		
Oxigênio(Nm3)	85		20		453		366		
Pelotas (kg)	381		0		671		1042		
Sínter (kg)	1132		0		0		0		
Carvão (kg)	637		160		740		618		
Coque (kg)	408		0		0		0		
Sucata (kg)	124		1050		380		165		
Ferro-gusa (kg)	976		0		0		0		
DRI - ferro esponja (kg)	0		0		0		352		
Metal COREX (kg)	0		0		720		583		
Obs.: variações significativas para os insumos	Carga % de Sínter/Pelotas no Alto-forno; autoprodução de energia elétrica		Carga metálica na Aciaria (alternativa p/ nível Médio): 18%DRI e 72%Sucata		Carga % Pelotas/Finos de Fe no COREX; Carga % de Metal COREX / sucata / DRI na Aciaria				
Emissões totais para rotas de produção e plantas siderúrgicas somente (nível Médio de emissões)	Rota de produção	Planta siderúrgica	Rota de produção	Planta siderúrgica	Rota de Produção	Planta Siderúrgica	Rota de Produção	Planta Siderúrgica	
Material Part.	g/t aço líq.	2069	911	384	124	1476	232	1521	221
SO2	g/t aço líq.	2171	1507	2324	120	536	108	956	211
NOx	g/t aço líq.	1640	921	1326	250	920	164	1389	389

CO	g/t aço líq.	24232	23834	1325	991	856	311	2052	1355
VOC	g/t aço líq.	164	100	59	40	82	0	129	40
H₂S	g/t aço líq.	101	101	0	0	0	0	0	0
HCl	g/t aço líq.	79	61	3	3	32	0	53	3
HF	g/t aço líq.	26	11	4	4	26	0	45	4
PAH	mg/t aço líq.	736	736	120	120	0	0	n.d.	n.d.
PCB	mg/t aço líq.	7	7	17	17	0	0	n.d.	n.d.
PCDD/F	µg/t aço líq.	11	11	9	9	0	0	n.d.	n.d.
Benzeno	g/t aço líq.	8	8	2	2	0	0	n.d.	n.d.
NH₃	g/t aço líq.	2	2	0	0	0	0	n.d.	n.d.
CH₄	g/t aço líq.	2419	27	497	0	2283	0	1914	0
Exergias dos produtos, rejeitos e perdas para plantas siderúrgicas		(GJ / t de aço líquido)		(GJ / t de aço líquido)		(GJ / t de aço líquido)			
Aço líquido		7,1		7,1		7,1		7,1	
Subprodutos		0,8		0		7,9		3,7	
Emissões atmosféricas e líquidas		0,9		0,04		0,4		0,41	
Resíduos sólidos		0,9		0,2		1,2		1,1	
Perdas exergéticas		10,6		3,0		13,1		13,0	
Faixas de perdas exergéticas para plantas siderúrgicas		9,7 - 17,0		2,7 - 4,0		12,5 - 15,0		9,8 - 12,5	
Faixas de perdas exergéticas para rotas de produção		11,0 - 20,0		3,7 - 13,0		15,0 - 17,0		12,5 - 17,0	
Faixas de eficiências exergéticas (Ψ₂ - inclui aproveitamento de subprodutos e reciclagem externa)		38% - 52%		63% - 69%		50% - 52%		43% - 45%	
Observações gerais e simulações	No Caso Base foi considerado para uma planta relativamente nova e eficiente com o objetivo de aproximar as condições de comparação com as outras rotas mais recentes; Etapa de Sinterização é altamente poluidora mas recicla grande parte dos resíduos sólidos; Etapa de Coqueificação é altamente poluidora (incluindo emissões de benzeno, substância cancerígena);			Forte dependência do tipo de geração de energia elétrica para o desempenho ambiental da rota de produção; Emissões e resíduos sólidos por tonelada de aço aumentam (devido à mineração e pelletização) à medida que maior carga de DRI seja usada nos fornos elétricos.			No Caso Base foi considerado aproveitamento de 100% do gás de exportação COREX (prioridade p/ geração de energia elétrica na própria planta, e depois utilização do excedente para outras atividades (redução direta ou planta química, por exemplo).		

No caso de plantas siderúrgicas determinadas não é possível prescindir das tecnologias de Controle de Poluição. Por mais que se apliquem medidas e tecnologias de Prevenção de Poluição, sempre se fará necessário algum tipo de CP. Na verdade, o recomendável é a integração das tecnologias CP e PP para cada uma das etapas siderúrgicas e a consideração da interrelação entre elas⁷² (EIPPCB, 1999; OECD, 1991).

No capítulo II foram determinadas, para cada uma das etapas siderúrgicas, tecnologias de CP e PP para as faixas de emissão consideradas. O nível Baixo serviu para mostrar alternativas já utilizadas comercialmente no setor, e que representam um possível arranjo tecnológico com desempenho superior. Não foram tratadas com detalhe neste trabalho outras tecnologias que estão em fase de pesquisa ou de experimentação industrial, com potencial de adicionais reduções dos fatores de emissão (EIPPCB, 1999). O nível Médio representa a média da Indústria Siderúrgica Européia, entendida como a dos países do Oeste Europeu, e assim pode ser considerado com fatores de emissão inferiores à média mundial, ou seja, com desempenho ambiental superior. Embora não seja possível determinar exatamente que plantas ou setores siderúrgicos nacionais se ajustariam à faixa do nível de emissão Alto, pode-se afirmar que reflete o desempenho ambiental de diversas plantas em operação no mundo, em especial no Leste Europeu e na China. Seria um exercício tentador a aplicação das faixas de cada nível de emissão a cada um dos países produtores de aço do mundo, de acordo com suas especificidades, seguindo informações qualitativas sobre o desempenho ambiental das plantas e dados quantitativos sobre os insumos e tecnologias CP e PP utilizadas. Ao se ponderar as faixas de emissões assim descritas com o percentual de produção de cada processo, poderia ser feita uma estimativa das emissões mundiais do setor siderúrgico e uma comparação entre países. Todavia a incerteza seria muito elevada e o risco de equívocos desta monta não recomenda tal exercício.

⁷² Se, no estudo de Ecologia Industrial, não houver restrição quanto ao tipo de processo a ser adotado, obviamente haverá um processo mais vantajoso de acordo com os objetivos especificados. Mais ainda, se o estudo for mais abrangente, no caso por exemplo de um produto que tenha o aço como um dos componentes, a decisão pode ser a troca por um material de menor impacto ambiental. Uma outra extensão do método seria a avaliação sobre a utilização do próprio produto.

Apesar das grandes reduções de emissões obtidas pelas plantas integradas em muitos países, as vantagens ambientais das plantas semi-integradas e das integradas compactas com fusão redutora são evidentes, principalmente por prescindirem das etapas de Sinterização e Coqueificação, e foram mostradas em detalhe ao longo do trabalho. Estas vantagens são claras para as plantas siderúrgicas mas podem ser significativamente reduzidas ao se considerar a rota de produção como um todo. Na seção III.5 foram comparados os resultados das emissões de cada um dos processos e aquelas conclusões se aplicam novamente neste capítulo final.

Mesmo com vantagens, as plantas de produção Semi-integrada e Integrada Corex não são a resposta completa aos problemas e desafios ambientais da Indústria Siderúrgica, mesmo que no médio prazo. Para as plantas integradas convencionais, ainda há um grande potencial para melhorias operacionais e tecnológicas no que se refere à eficiência no uso de energia e materiais e na redução das emissões associadas, o que é comprovado pela comparação entre o desempenho ambiental de plantas diversas. Isso ficou explícito na diferença das emissões entre os níveis considerados. Embora a produção de aço por intermédio destas rotas deva continuar aumentando nas próximas décadas, em conjunto com outras tecnologias alternativas de redução, as plantas integradas convencionais ainda participam com 59% da produção total e devem ainda permanecer como preponderantes pelo menos nas duas próximas décadas. É claro que esta permanência tem importantes motivos ligados aos baixos custos operacionais, ao prazo de maturação de investimentos, à escala de produção e ao tipo de produto, principalmente os planos e aços especiais, que as integradas podem fabricar. Mas devemos acrescentar que a capacidade de responder às demandas por redução da emissão de poluentes tem levado grande parte da indústria mundial a melhorias no seu desempenho ambiental. Neste sentido, as tecnologias CP e PP para as Integradas ainda têm um importante papel a cumprir na aplicação dos princípios de Ecologia Industrial na Indústria Siderúrgica.

As plantas semi-integradas tradicionalmente fabricam produtos longos utilizados principalmente na construção civil, e cuja qualidade do aço é inferior⁷³ àquela exigida para produtos planos utilizados no setor automobilístico e de eletrodomésticos. Todavia, nos

⁷³ O problema se encontra nos contaminantes encontrados na sucata como ligas metálicas, plásticos e outros materiais que dificultam a obtenção de um aço “limpo”. Adicionalmente, os maiores e oscilantes preços da sucata de mais alta qualidade estimulam o aumento da utilização de ferro-esponja.

últimos anos, com inovações tecnológicas, como o lingotamento de tiras finas⁷⁴, e com a utilização de maiores proporções de DRI (ferro-esponja), as semi-integradas começaram a competir com as empresas com plantas integradas na produção de produtos planos, com aços de melhor qualidade. Identificamos nesta tendência um conflito entre dois objetivos: a qualidade do aço para aplicações mais nobres e a existência de sistemas de produção com 100% de sucata, o que seria um item favorável ao fechamento do ciclo de materiais advogado pela Ecologia Industrial.

Embora tenhamos destacado diferenças sensíveis no desempenho ambiental dos diferentes processos, devemos ressaltar como tais processos são complementares. De acordo com os princípios de Ecologia Industrial, as fronteiras do sistema analisado devem ser estabelecidas no espaço e no tempo. A maior parte da sucata utilizada nas plantas semi-integradas foi produzida há mais de 20 anos, ou seja, é constituída por aço produzido em plantas integradas. Um outro fator é a indisponibilidade de sucata para a demanda total de aço no mundo, o que tornaria difícil tal demanda ser atendida somente por plantas semi-integradas com 100% de sucata. A utilização crescente de outras cargas metálicas nos fornos elétricos, como o ferro-esponja (DRI) e o carbureto de ferro (*iron carbide*) podem ser uma resposta para o futuro das semi-integradas.

Os fatores que levam as rotas de produção semi-integrada a terem reduzidas suas vantagens ambientais estão ligados principalmente à geração de energia elétrica, às emissões de compostos organoclorados (PCDD/F e PCB) e aos rejeitos perigosos com metais pesados. No caso das integradas com fusão redutora COREX, a maior utilização de carvão e oxigênio, assim como o maior volume de resíduos sólidos contribuem para contrabalançar as vantagens das plantas siderúrgicas com relação à maior eficiência energética e às menores emissões atmosféricas e efluentes líquidos.

No tema das perdas exergéticas, verificamos a importância da reciclagem dos rejeitos na própria planta siderúrgica ou em outras plantas e atividades, siderúrgicas ou não, que assim formariam um ecossistema industrial em seu conjunto. Os casos mais evidentes e significativos são, em termos exergéticos, a reciclagem interna e externa de sucata metálica, a

⁷⁴ O *thin slab casting* (lingotamento de tiras finas) permite a compactação das etapas de lingotamento e laminação em apenas uma, o que proporciona maior eficiência exergética por eliminar o reaquecimento do aço.

reciclagem externa de escórias como aditivo nas indústrias de cimento e para pavimentação em geral e a reciclagem interna de pós, lamas e carepas de aço.

O arranjo da rota de produção de maior eficiência exergética e de menores perdas exergéticas (3,67 GJ por tonelada de aço líquido) seria aquele com plantas siderúrgicas semi-integradas utilizando 100% de sucata e com fornos elétricos a arco operando com baixo consumo de energia elétrica por tonelada de aço líquido, tecnologias de controle e prevenção de poluição características do que indicamos no capítulo II como nível de emissão Baixo, e, finalmente, com geração de energia proveniente de hidroelétricas.

No caso da realização de uma Análise do Ciclo de Vida de um produto que contenha aço, quais seriam os fatores de emissão atmosférica a serem adotados para o aço? A dissertação tentou mostrar como tal pergunta exige certos cuidados para ser respondida. Primeiro, recomenda-se identificar o tipo de aço e o processo de produção empregado. Como é bastante difícil estabelecer a origem exata do aço, ou seja, em que planta foi produzido e, ainda mais, quais os fatores de emissão desta planta e de todos os insumos envolvidos, trabalha-se normalmente com valores médios. Desta forma, os fatores de emissão indicados na Tabela 46 podem ser utilizados caso o aço seja proveniente de países cuja indústria siderúrgica apresente bom desempenho ambiental, tal como na Europa, que veio a ser a origem principal dos dados (EC, 1996). Na Tabela 68 indicamos os fatores de emissão de particulados, SO₂ e NO_x, incluindo as etapas de Laminação e Acabamento. As emissões médias destas etapas podem ser acrescentadas aos resultados do nosso trabalho para estabelecer fatores de emissão para cada um dos processos de acordo com os níveis de emissões.

Tabela 68 - Estimativa de fatores de emissões atmosféricas para 1 tonelada de aço, incluindo etapas de laminação e acabamento (não estudadas em detalhe nesta dissertação) para o nível de emissão Médio

	MP (g/t aço)	SO₂ (g/t aço)	NO_x (g/t aço)
Planta integrada (valor médio do Caso base obtido neste trabalho)	911	1507	921
Laminação a quente	65	450	250
Laminação a frio		7	46
Acabamento (EC, 1996)		3	24
Total	976	1967	1241

Quanto às perdas exergéticas outras etapas de produção devem ser acrescentadas para se ter valores mais condizentes com as necessidades de avaliação de 1 tonelada de produtos de aço, por exemplo, e não 1 tonelada de aço líquido.

Tabela 69 - Valores de perdas exergéticas ampliadas (GJ/t aço laminado)

Perdas exergéticas (GJ/t aço acabado)	Integrada	Semi-integrada	COREX-Aciaria O2	COREX-Aciaria elétrica
1 - Plantas siderúrgicas (valor médio do Caso Base obtido neste trabalho)	11,5	3,2	14,2	14,0
2 - Outras etapas (consideradas p/ Caso Base neste trabalho)	2,3	4,5	1,9	3,2
3 - Lingotamento Laminação a quente	3,0-5,0	3,0-5,0	3,0-5,0	3,0-5,0
4 - Transporte	1,0-3,0	0,5-1,0	1,0-3,0	1,0-3,0
Total planta siderúrgica (1 e 3)	14,5-16,5	6,2-8,2	17,2-19,2	17,0-19,0
Total (1, 2, 3 e 4)	17,8-21,8	11,2-13,7	20,1-24,1	21,2-25,2

Notas: Elaboração própria a partir de valores de perdas exergéticas apresentados em Michaelis et al.(1998) e Beer et al.(1998). Fator de conversão 1,08 tonelada de aço líquido por tonelada de aço laminado.

VI.2 Ecossistemas industriais e Ecopolítica

O apelo a uma base material sobre a qual se sustentam os conceitos e métodos da Ecologia Industrial configura, do nosso ponto de vista, um avanço de grande monta para a teoria e prática da sustentabilidade. Uma visão biofísica da economia poderia se constituir em uma força importante para a transformação das relações ‘sociedade - meio ambiente’. No entanto, o estabelecimento de uma nova medida de valor⁷⁵, calcada sobre esta base material, a exemplo da exergia, pode alcançar tão somente as franjas do universo cultural que dá sentido e

⁷⁵ Söllner (1998) apresenta excelente revisão sobre a noção de valor nas teorias neoclássicas e termodinâmicas na economia, e aponta para novos caminhos em direção ao que denomina de teoria do valor social. Hornborg (1998) utiliza estes argumentos para criticar as tentativas de criar teorias do valor de base física, como é o caso da emergia (Odum, 1983) e da exergia. Segundo o autor, a Economia Ecológica ainda deve buscar um caminho adequado para lidar com as relações entre as restrições termodinâmicas, as avaliações culturais e as instituições sociais. A correção de preços que, em suas diversas formas, teoricamente seria uma resposta para a sustentabilidade de longo prazo, não enfrenta as questões distributivas.

sustenta as leis econômicas e jurídicas. Estes universos de referência (valores, símbolos, desejos) estão imbricados nas instituições e nos indivíduos.

Ao conjugar a abordagem dos ecossistemas industriais com a distribuição ecológica, adquirimos um instrumental teórico para lidar com a mudança dos sistemas econômico-naturais. Guiar as economias para configurações sustentáveis comporta grandes desafios, tanto conceituais como práticos. Atualmente, podem ser observados movimentos ainda tímidos em direção a um “esverdeamento industrial” e também para acordos internacionais na área ambiental. Desafios para o balanceamento entre autonomia/soberania nacionais e coordenação internacional estarão cada vez mais presentes nas próximas décadas.

Foram traçados caminhos transdisciplinares entre diferentes campos de pesquisa. Embora a analogia biológica seja uma fonte permanente de modelos e idéias, o conceito de ecossistema industrial explora a natureza das atividades econômicas com elementos do sistema de causalidade da filosofia escolástica. A noção de autopoiese lida com a formação das unidades definidas no espaço dos componentes do ecossistema industrial: os pólos de energia e materiais, de territórios organizacionais, de universos de referência e phylum processuais.

A termodinâmica dos sistemas longe do equilíbrio introduz novas bases teóricas e práticas para a Ecopolítica, sem o privilégio das causas finais, como na visão mais extrema da economia de base termodinâmica, como vimos em Georgescu-Roegen (1971) e Rifkin (1980). São aspectos mais positivos, abertos a novos territórios organizacionais, no campo das causas materiais e eficientes. Uma nova organização autopoietica é engendrada nos pontos de bifurcação, quando o sistema passa a um outro regime dissipativo (Allen, 1994). Organizações autopoieticas que perfazem papéis alopoiéticos em organizações autopoieticas de maior ordem podem ser destruídas sem afetar substancialmente as últimas.

A tecnologia pode reverter as tendências da escassez de recursos e da degradação ambiental, mas tendo como base uma reorganização dos sistemas econômicos (estabelecimento de outros territórios organizacionais), o que implica em “perdas” em outras partes do sistema. Um determinado padrão de exploração, uso e transformação dos recursos naturais apresenta uma distribuição heterogênea de benefícios e custos ecológicos colaterais. Certos grupos sociais são prejudicados com a degradação ambiental enquanto outros se beneficiam. Ferramentas de suporte à tomada de decisão, como as Análises de Ciclo de Vida, enfrentam as dificuldades em lidar com os balanços de perdas e ganhos (*trade-offs*) dos fatores

mensuráveis em unidades díspares, como a monetária, de segurança, bem-estar etc. Torna-se, portanto, fundamental a identificação dos *trade-offs* entre eficiência, equidade e sustentabilidade.

O discurso da sustentabilidade predominante até hoje desqualifica, ou não privilegia, as questões distributivas. Os debates e práticas da sustentabilidade precisam abordar não apenas os aspectos de equidade intergeracional mas também as demandas intrageracionais. Daí a importância do conjunto de princípios da Ecologia Industrial como um verdadeiro programa para a sustentabilidade a ser aplicado desde já. Não se trata de um conjunto de regras fechadas, mas sim de um guia para a melhoria do desempenho individual das empresas, e para uma visão de novos arranjos das atividades produtivas e de consumo nas economias.

Atingir a sustentabilidade implica compromissos locais, regionais e planetários. Os novos territórios organizacionais criados com a redistribuição ecológica dependem dos interesses, responsabilidades e esforços de cada agente. Novos valores, instituições e visões de mundo aparecem e se rearticulam com as alternativas tecnológicas desenvolvidas. O desafio é vislumbrar os meios para incorporar os valores guia da integridade dos indivíduos, da comunidade e da natureza nos conflitos intrageracionais. Se a distribuição ecológica e as desigualdades sociais são tomadas como questões ecológicas fundamentais, a sustentabilidade pode ser fortalecida e assim promover novas formas de organização social, compatíveis com demandas presentes e futuras.

Referências Bibliográficas

- ABM - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS (1998). *Balanços energéticos globais e de utilidades*, ABM, São Paulo.
- AHRENDTS, J. (1980), “Reference states”. *Energy*, v.5, n.5, pp.667-677.
- AISI - AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE (1997), *Steel Industry technology roadmap*. American Iron and Steel Institute.
- ALMEIDA, S.M.G. (1998), *Estudo da técnica de análise do ciclo de vida e sua aplicação como ferramenta de gestão ambiental*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.
- ALTMAN, M. (2001), “When green isn’t mean: economic theory and the heuristics of the impact of environmental regulations on competitiveness and opportunity cost”. *Ecological Economics* 36, pp. 31-44.
- ANDREWS, C. (1994), “Policies to encourage clean technology”. In: *Industrial Ecology and Global Change*, Socolow, R., Andrews, C., Berkhout, F., Thomas V. (eds.), Cambridge University Press, New York, pp. 405-423
- ALLENBY, B. (1992), *MRS Bulletin*, March, n. 47.
- ALLENBY, B. (1999), “Culture and Industrial Ecology”. *Journal of Industrial Ecology*, v.3, n.1, pp.2-4.
- ANDRADE, M.L., CUNHA, L.M., GANDRA, G. (2000a), “A ascensão das *mini-mills* no cenário siderúrgico mundial”. In: BNDES Setorial n.12, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Rio de Janeiro, pp. 51-76.
- ANDRADE, M.L., CUNHA, L.M., GANDRA, G. (2000b), *Mercado mundial de sucata*. Relato Setorial, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Rio de Janeiro.
- ARISTÓTELES, *Ética a Nicômacos*. Introdução e tradução de Mário da Gama Kury, Editora Universitária de Brasília, c1985, 4ª edição (2001).

- ARROW, K., BOLIN, B., CONSTANZA, R., DASGUPTA, P., FOLKE, C., HOLLING, C., JANSSON, B., LEVIN, S., MÄLER, K., PERRINGS, C. AND PIMENTEL, D. (1995), "Economic growth, carrying capacity, and the environment". *Science*, 268.
- ASHFORD, N. (1997), "Industrial safety: the neglected issue in industrial ecology". *Journal of Cleaner Production*, v.5, n.1-2, pp.115-121.
- AYRES, R.U. (1978), *Resources, environment and Economics: applications of the materials/energy balance principle*, John Wiley e Sons, New York.
- AYRES, R. (1994a), "Industrial Metabolism: theory and policy". In: *Industrial Metabolism - Restructuring for Sustainable Development*, R. Ayres, U. Simonis (eds.), United Nations University Press, Tóquio, pp. 3-20.
- AYRES, R. (1994b), *Information, entropy and progress – a new evolutionary paradigm*. AIP Press, New York, NY.
- AYRES, R.U. (1995), "Life Cycle Analysis: a critique". *Resources Conservation and Recycling*, 14, pp.199-223.
- AYRES, R. (1998), "Eco-thermodynamics: economics and the second law". *Ecological Economics*, n.26, pp.189-209.
- AYRES, R.; AYRES, L. (1996), *Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle*. Edward Elgar, Cheltenham, UK.
- AYRES, R., AYRES, L., MARTINÁS, K. (1998), "Exergy, waste accounting, and life-cycle analysis". *Energy*, v.23, pp.355-363.
- AYRES R., AYRES L., MARTINÁS K. (1996), *Eco-thermodynamics: exergy and life cycle analysis*. INSEAD Working Paper 96/19/EPS, Fontainebleau, França.
- AYRES R., MARTINÁS K. (1995), "Waste Potential Entropy: The Ultimate Ecotoxic". *Économique Appliquée*, Tomme XLVIII, n.2, pp.95-120.
- BARNETT, H., MORSE, C. (1963), *Scarcity and growth: the economics of natural resource availability*. John Hopkins, Baltimore.
- BEER, J., WORRELL, E., BLOK, K. (1998), "Future technologies for energy-efficient iron and steel making". In: *Annual Review of Energy and the Environment*, 22, pp.123-205.

- BERTALANFFY, L., KLIR, G.J., RAPOPORT, A., ASHBY, W., WEINBERG, G.M. (1972), *Trends in General Systems Theory*. John Wiley and Sons.
- BESTER, D., KASPAR, S. (1995), *Integrated compact mill incorporating the COREX-EAF technology*. MPT International 1/1995, pp. 40-44.
- BILLEN, G., TOUSSAINT, F., PETERS, P., SAPIR, M., STEENHOUT, A., VANDERBORGHT, J.P. (1983), *L'Écosystème Belgique, Essai d'Ecologie Industrielle*. Centre de Recherche et d'information socio-politique – CRISP, Bruxelles, 1983.
- BINSWANGER, M. (1993), “From microscopic to macroscopic theories: entropic aspects of ecological and economic processes”. *Ecological Economics*, 8, pp.209-234.
- BISIO, G. (1993), “Exergy method for efficient energy resource use in the steel industry”. *Energy*, v.18, n.9, pp.971-985.
- BÖHM, C.(1999), *COREX information*, Comunicação Pessoal.
- BÖHM, C., EBERLE, A. (1997), Latest developments in COREX technology and new project experience, VAI TECH.
- BRILLOUIN, L. (1956), *Science and Information Theory*. Academic Press Inc., New York.
- BRODYANSKY, V.M., SORIN, M.V., LE GOFF, P. (1994), *The efficiency of industrial processes: exergy analysis and optimization*. Energy Research, v.9.
- CAMPBELL, J. (1988), “Evolution as nonequilibrium thermodynamics: halfway there?”. In: Entropy, information and evolution: new perspectives on physical and biological evolution, B. Weber, D. Depew and J. Smith (eds.), MIT Press, Cambridge, pp. 275-284.
- CHEHEBE, J.B.R. (1998), *Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000*. Qualitymark, Rio de Janeiro.
- CHERTOW, M. (2000), “Industrial symbiosis? Literature and taxonomy”. *Annual Review of Energy and the Environment*, v.25, pp.313-337.

- CMA - Chemical Manufacturers Association (1994), *Pollution Prevention in the Chemical Industry: a progress report (1988-1993)*. Chemical Manufacturers Association, Washington, DC.
- CMMAD - Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (1987), *Nosso futuro comum*. Fundação Getúlio Vargas. Edição original em inglês, *Our common future*, Oxford University Press, Oxford.
- COLBY, M. (1990), *Environmental management in development*. World Bank Discussion Paper 80, Washington, DC.
- COMMONER, B. (1997), "The relation between industrial and ecological systems". *Journal of Cleaner Production*, v.5, n.1-2, pp.125-129.
- CONNELLY, L., KOSHLAND, C. (2001), "Exergy and industrial ecology – Part 1: an exergy-based definition of consumption and a thermodynamic interpretation of ecosystem evolution". *Exergy International Journal*, v.1, n.3, pp.146-165.
- COSTA, M.M., SCHAEFFER, R. (1999), "An investigation of air emission levels from distinct iron and steel production processes with the adoption of pollution control and pollution prevention alternatives." In: *Proceedings of 1999 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry – Industry e Inovation in the 21st Century*, pp. 75-86.
- COTÉ, R., COHEN-ROSENTHAL, E. (1998), "Designing eco-industrial parks: a synthesis of some experiences". *Journal of Cleaner Production*, v.6, n.3-4, pp.181-188.
- CURRAN, M.A. (1993), "Broad-Based Environmental Life Cycle Assessment". *Environmental Science and Technology*, v.27, n.3, pp.431-436.
- CURRAN, M.A. (1996), *Environmental life-cycle assessment*. McGraw-Hill, New York.
- DELEUZE, G. (1990), *Expressionism in Philosophy: Spinoza*. Zone Books, New York.
- DALY, H.E. (1992), "Is the entropy law relevant to the economics of natural resource scarcity? – Yes, of course it is!". *Journal of Environmental Resources Management*, 23, pp. 91-95.
- DALY, H., COBB, J. (1989), *For the common good: redirecting the economy toward community, the environment and a sustainable future*. Beacon Press, Boston, MA.

- DELPORT, H. (1992), "The COREX process". *Ironmaking and Steelmaking*, v.19, n.3, pp.183-189.
- DFIU e IFARE - Deutsch-Französisches Institut Für Umweltforschung e Institut Franco-Allemand de Recherche Sur L'Environnement (1997), *Report on Best Available Techniques in the Electric Steelmaking Industry*. Federal Environmental Agency of Germany and French-German Institute for Environmental Research, Karlsruhe.
- DUCHIN, F. (1992), "Industrial Input-Output Analysis: implications for Industrial Ecology", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 89(3), pp.851-855.
- EBERLE, A. , SCHIFFER, W., SIUKA, D. (1997), *Start-up and first operational results of the COREX plant C-2000 at POSCO's Pohang Works*. Linz, Austria: Voest-Alpine Industrieanlagenbau.
- EC - EUROPEAN COMMISSION (1996), *Coordinated study 'steel-environment'*. Final Report EUR 16955 EN. Technical Steel Research. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- EC EAF – EUROPEAN COMMISSION (1994), Technical note on the best available technologies to reduce emissions of pollutants into the air from Electric Arc Steel Production Plants, DG XI A3.
- EHRENFELD, J. (1992), "Industrial Ecology: a technological approach to sustainability", *Hazardous Waste e Hazardous Materials*, v.9, n.3, pp.209-211.
- EHRENFELD, J. (1997), "Industrial Ecology: a framework for product and process design". *Journal of Cleaner Production*, v.5, n.1-2, pp.87-95.
- EHRENFELD, J. (2001), "Industrial Ecology begets a society". *Journal of Industrial Ecology*, v.4, n.3, pp.1-2.
- EIPPCB - EUROPEAN INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL BUREAU (1999), *Integrated Pollution, Prevention and Control (IPPC)*. Document on Best Available Techniques in the Iron and Steel Industry, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla.

- EISENHUT, W. (1990), "Coking plant environment in West-Germany". *Coke Making International*, v.1, pp.74-77.
- ENERGETICS (2000), *Energy and environmental profile of the U.S. Iron and Steel Industry*. Prepared for DOE (U.S. Department of Energy), Office of Industrial Technologies, Columbia, MA.
- EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1993), *Life-Cycle Assessment: inventory guidelines and principles*. EPA Report no. EPA/600/R-92/245, USEPA, Office of Research and Development, Washington, D.C.
- EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994a), *Pollution Prevention in Iron and Steel Industry*. US EPA, Office of Research and Development, Washington, D.C.
- EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994b), *Toxic releases inventory - 1992*, US EPA, Washington, D.C.
- EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1994c), Alternative control techniques document – PM-10 emissions for selected processes at Coke Ovens and Integrated Iron and Steel Mills. US EPA, Washington, DC.
- EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (1996), *Practical guide to Pollution Prevention planning for the Iron and Steel Industries*. Washington: National Environmental Publications.
- ERKMAN, S. (1997), "Industrial ecology: an historical overview", *Journal of Cleaner Production*, v.5, n.1-2, pp.1-10.
- ESTY, D., PORTER, M. (1998), "Industrial Ecology and competitiveness – strategic implications for the firm". *Journal of Industrial Ecology*, v.2, n.1, pp.35-43.
- EVANS, R. (1969). A proof that essergy is the only consistent measure of potential work for chemical systems. PhD Thesis. Dartmouth College, Hanover, NH.
- FABER, M., MANSTETTEN, R., PROOPS, J. (1995), "On the conceptual foundations of ecological economics: a teleological approach". *Ecological Economics*, 12, pp.41-54.
- FEREIRA, T. (1999), *Saldanha Steel Enquiries*, Comunicação Pessoal.

- FINNVEDEN, G., OSTLUND, P. (1997), "Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications". *Energy*, v.22, n.9, pp.923-931.
- FISCHER-KOWALSKI, M. (1998), "Society's metabolism, the intellectual history of material flows analysis, part 1, 1860-1970". *Journal of Industrial Ecology*, 2, pp.61-78.
- FREUHAN, R.J. (1994), "Effect of emerging technologies on competitiveness in the steel industry". *Iron and Steel Magazine*, February, pp.17-22.
- FROSCH, R.A. (1992), "Industrial Ecology: a philosophical introduction", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 89 (3), pp. 800-803.
- FROSCH, R.A., GALLOPOULOS, N.E. (1989), "Strategies for manufacturing", *Scientific American*, September, v.261, n.3, pp.144-152.
- FREUHAN, R.J. (1996), *Future steelmaking technologies and the role of basic research*. The 1996 Howe Memorial Lecture, ISS 79th Steelmaking and 55th Ironmaking Conferences, Pittsburgh, USA.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971), *The Entropy Law and the economic process*. Harvard University Press, Cambridge.
- GLAESER, R. (1984), *Ecodevelopment: concepts, policies, strategies*. Pergamon Press, New York.
- GONG, M., WALL, G. (1997), "On exergetics, economics and optimization of technical processes to meet environmental conditions". In: *Thermodynamic analysis and improvement of energy systems*, Ruixian Cai (ed.), Chinese Society of Engineering Thermophysics and American Society of Mechanical Engineers, Beijing, pp.453-460.
- GRADY, R., BROOKS, D. (1988), "Teleology and biology". In: *Entropy, information and evolution: new perspectives on physical and biological evolution*, B. Weber, D. Depew, J. Smith (eds.), MIT Press, Cambridge.
- GRAEDEL, T. (1994), "Industrial Ecology: definition and implementation." In: *Industrial Ecology and Global Change*, Socolow, R., Andrews, C., Berkhout, F., Thomas, K., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- GRAEDEL, T. (1996), "On the concept of Industrial Ecology", *Annual Review of Energy and the Environment*, v.21, pp.69-98.

- GRAEDEL, T.E., ALLENBY, B.R. (1995), *Industrial Ecology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- GRAEDEL, T.E., ALLENBY, B.R., COMRIE, P.R. (1995), "Matrix Approaches to Abridged Life Cycle Assessment", *Environmental Science and Technology*, v.29, pp.134A-139A.
- GROSSMAN, G., KRUEGER, A.B. (1995), "Economic Growth and the environment", *Quarterly Journal of Economics*, v.110, n.2, pp. 353-377.
- GUATTARI, F. (1992), *Caosmose*, Editora 34, São Paulo.
- HARDT, M. (1993), *Gilles Deleuze – an apprenticeship in philosophy*. Regents of the University of Minnesota. Edição brasileira: "Gilles Deleuze – um aprendizado em filosofia", trad. Sueli Cavendish, Editora 34, São Paulo, 1996.
- HARDT, M., Negri, A. (2001), *Império*, trad. Berilo Vargas, Editora Record.
- HART, S. (1997), "Beyond greening: strategies for a sustainable world". *Harvard Business Review*, v.75, n.1, pp.66-76.
- HASKONING – ROYAL DUTCH CONSULTING ENGINEERS AND ARCHITECTS (1993), Techno-economic study on the reduction measures, based on best available technologies, of water discharges and waste generation from the primary and secondary iron and steel industry. Commission of the European Communities DG XI A3.
- HAYEK, F. (1967), *Studies in Philosophy, Politics and Economics*. The University of Chicago Press, Chicago, Illinois.
- HEIN, M., STOPPA, H., WUCH, G. (1996), *Environmental protection and occupational health and safety for next-century coke oven plants*, Conference Steel and the Environment in the 21st century.
- HOCKING, M.B. (1991), "Paper versus polystyrene: a complex choice", *Science* 251, pp.504-505.
- HORNBORG, A. (1998), "Towards an Ecological Theory of Unequal Exchange: Articulating World System Theory and Ecological Economics". *Ecological Economics* 25, pp.127-136.

- HUSAR, R. (1994), "Ecosystem and biosphere: metaphors for human-induced material flows". In: *Industrial Metabolism - Restructuring for Sustainable Development*, R. Ayres, U. Simonis (eds.), United Nations University Press, Tokio, pp. 21-30.
- IFIAS – International Federation of Institutes of Advanced Study (1974), *Energy Analysis*. IFIAS, Report n.6.
- IHDP – International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (1999), *Industrial Transformation Project – IT Science Plan*. Vellinga e Herb (eds.), IHDP Report no.12, Bonn, Germany.
- IISI – International Iron and Steel Institute (1998), *Energy Use in the Steel Industry*. Committee on Technology, Brussels.
- IISI – International Iron and Steel Institute (2001), *Steel Statistical Yearbook*. Bruxelles, Bélgica.
- IISI e UNEP – International Iron and Steel Institute International Iron and Steel Institute and United Nations Environment Program (1997), *Steel Industry and the environment - technical and management issues*, UNEP Technical Report n.38, Brussels.
- INFOMIL – INFORMATION CENTRE FOR ENVIRONMENTAL LICENSING (1997), *Dutch notes on Best Available Technologies for the production of primary iron and steel*. Final Report, Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment Directorate for Air and Energy Department of Industry.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2001), *Climate Change 2001: a synthesis report*. Cambridge University Press, Cambridge.
- JELINSKI, L.W., GRAEDEL, T.E., LAUDISE, R.D., McCALL, W., PATEL, C.K. (1992), "Industrial Ecology: concepts and approaches", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* v.89, n.3, pp.793-797.
- KING, A., LENOX, M. (2001), "Does it really pay to be green?", *Journal of Industrial Ecology*, v.5, n.1, pp.105-116.
- KREHBIEL, T., GORMAN, R., EREKSON, O., LOUCKS, O., JOHNSON, P. (1999), "Advancing ecology and economics through a business-science synthesis". *Ecological Economics*, 28, pp. 183-196.

- KLIMISCH, R.L. (1994), "Designing the modern automobile for recycling", In: *The Greening of Industrial Ecosystems*, B.R. Allenby, D.J. Richards (eds.), National Academy Press, Washington, D.C., pp. 172-178
- LAVE, LESTER B.; COBAS-FLORES, ELISA; HENDRICKSON, CHRIS T., FRANCIS, E. (1995), "Using Input-Output Analysis to estimate economy-wide discharges," *Environmental Science and Technology*, v.29, n. 9.
- LEFF, E. (1996), "From ecological economics to productive ecology: perspectives on sustainable development from the south". In: *Getting down to earth: practical applications of ecological economics*, R. Constanza, O. Segura e J. Martinez-Alier (eds.), Island Press, Washington, DC, pp. 77-89.
- LEFF, H., REX, A. (eds.) (1990), *Maxwell's demon: entropy, information and computing*, Princeton University Press, Princeton.
- LEMPERLE, M., SIUKA, D. (1991), *Co-generation with COREX*. 1991 AISE Annual Convention. Pittsburgh, September.
- LINDBLAD, B. (1992), "A Scandinavian view on (coated) scrap and the environment". In: *Proceedings from the 1992 Steelmaking Conference in USA*.
- LOTKA, A. (1922), *Elements of mathematical biology*. Dover Books, New York, NY.
- LOWE, E., EVANS, L. (1995), "Industrial Ecology and Industrial Ecosystems". *Journal of Cleaner Production*, v.3, n.1-2.
- LUA NRW (1997), *Identification of relevant industrial sources of dioxins and furans in Europe*. North Rhine-Westphalia State Environment Agency, Materialien n.43.
- 3M CORPORATION (1993), *3M Waste Minimization Guidelines*. 3M Corporation, St. Paul, MN.
- MACHADO, G. (2002), Meio ambiente e comércio exterior: impactos da especialização comercial brasileira sobre o uso de energia e as emissões de carbono do país. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro.
- MACHEREY, P. (1979), *Hegel or Spinoza*. Maspero, Paris.

- MANAHAN, S. (1999), *Industrial Ecology – Environmental Chemistry and Hazardous Waste*. Lewis Publishers.
- MASINI, A., AYRES, R. (1996), *An Application of exergy accounting to four basic metal industries*. INSEAD Working Paper 96/65/EPS, Fontainebleau.
- MARGALEF, R. (1968), *Perspectives in Ecological Theory*, University of Chicago Press, Chicago.
- MARINHO, M., KIPERSTOK, A (2000), “Ecologia Industrial e Prevenção da poluição: Uma contribuição ao debate regional”, *Revista Bahiana de Tecnologia*, v.15, n.2, Maio/Agosto.
- MARSTRANDER, R. BRATTEBØ, H., ROINE, K., STOREN, S. (1999), “Teaching Industrial Ecology: experiences at the Norwegian University of Science and Technology”. *Journal of Industrial Ecology*, v.3, n.4, pp. 117-130.
- MARTINEZ-ALIER, J., O’CONNOR, M. (1996), “Ecological and economic distribution conflicts”. In: *Getting down to earth: practical applications of ecological economics*, R. Constanza, O. Segura, J. Martinez-Alier (eds.), Island Press, Washington, DC, pp. 153-183.
- MATURANA, H., VARELA, F. (1973), *De maquinas y seres vivos*. Editora Universitaria, Santiago, Chile.
- MAYR, E. (1974). “Teleological and teleonomic: a new analysis”. In: *Methodological and historical essays in the natural and social sciences*, R. Cohen e M. Wartofsky (eds.), v.14, D. Reidel, Boston, MA, pp. 91-117.
- MICHAELIS, P., JACKSON, T., CLIFT, R. (1998), “Exergy analysis of the life cycle of steel”. *Energy*, v.23, n.3, pp.213-220.
- MIDREX (1998), *The MIDREX Direct Reduction Process*. Midrex Direct Reduction Corporation.
- MGL – MASSACHUSETTS GENERAL LAWS (1991), *Massachusetts Toxics Use Reduction Act*. Chapter 211, July.
- MILLER, R., BLAIR, P. (1985), *Input-Output Analysis: foundations and extensions*, Prentice-Hall, New Jersey.

- MIROWSKI, P. (1989), *More heat than light - Economics as Social Physics, Physics as Nature's Economics*. Cambridge University Press, Cambridge.
- MORIGUCHI, Y. (2000), "Industrial Ecology in Japan". *Journal of Industrial Ecology*, v.4, n.1, pp.7-9.
- NAGAI, C. (1995), "Sources of iron beyond 2000". In: *Steel Times International*, EAF Supplement, May.
- NICOLIS, G., PRIGOGINE, I. (1977), *Self-organization in non-equilibrium systems*. John Wiley and Sons, New York, NY.
- NORGAARD, R. (1988), "Sustainable development: a co-evolutionary view". *Futures*, 20, pp.606-620.
- O'CONNOR, M. (1991), "Entropy, structure and organisational change". *Ecological Economics*, 3, pp.95-122.
- ODUM, E. (1969), "The strategy of ecosystem development". *Science*, 164, pp.262-270.
- ODUM, E. (1983), *Ecologia*. Ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro.
- OECD – ORGANISATION OF ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (1991), *Report on Integrated Pollution Prevention and Control*, Environment Monograph 37, OECD Environment Directorate, Paris.
- OLDENBURG, K., GEISER, K. (1997), "Pollution prevention and...or industrial ecology". *Journal of Cleaner Production*, v.5, n.1-2, pp. 103-108.
- O'ROURKE, D., CONNELLY, L., KOSULAND, C.P. (1996), "Industrial Ecology: a critical review". *International Journal of Environment and Pollution*, v.6, n.2-3, pp.89-112.
- PALMER, K., OATES, W.E., PORTNEY, P.R. (1995), "Tightening environmental standards: the benefit-cost or the no-cost paradigm?", *Journal of Economic Perspectives* 9, pp.119-132.
- PORTER, M.E., VAN DER LINDE, C. (1995a), "Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship", *Journal of Economic Perspectives*, v.9, n.4, pp.97-118.

- PORTER, M.E., VAN DER LINDE, C. (1995b), "Green and Competitive: Ending the Stalemate", In: *On Competition*, M. Porter (ed.), Harvard Business Review Books, Boston, pp. 351-375.
- PRIGOGINE, I. (1967), *Thermodynamics of irreversible processes*, Wiley, New York.
- PROOPS, J. (1983), "Organization and dissipation in economic systems", *Journal of Social and Biological Structures*, v.6, pp.353-366.
- RICHARDS, D., ALLENBY, B., FROSCHE, R. (eds.) (1994), *The greening of industrial ecosystems: overview and perspective*. National Academy Press, Washington, DC, pp. 1-19.
- RIDDEL, R. (1981). *Ecodevelopment: economics, ecology and development: an alternative to the growth imperative*. Gower, London.
- RIFKIN, J. (1980). *Entropy in the greenhouse world*. Bantam Books, Bantam Revised Edition, New York.
- RODENBURG, E., (2000), "Spreading the word in Washington". *Journal of Industrial Ecology*, v.4, n.1, pp.10-12.
- ROSEN, R. (1985). "Organisms as causal systems which are not mechanisms: an essay into the nature of complexity". In: *Theoretical biology and complexity – three essays on the natural philosophy of complex systems*, R. Rosen (ed.), Academic Press, New York, NY.
- RUSSELL, B. (1918), *On the notion of cause – mysticism and logic*. Doubleday, Anchor Books, New York, NY.
- RUTH, M. (1993), *Integrating Economics, Ecology and Thermodynamics*. Kluwer, Dordrecht.
- SAGAR, A., FROSCHE, R. (1997), "A perspective on Industrial Ecology and its application to a metals-industry ecosystem". *Journal of Cleaner Production*, v.5, n.1-2, pp.39-45.
- SCHAEFFER R., WIRTSHAFTER, R. (1992). "An exergy analysis of the Brazilian economy: from energy production to final energy use". *Energy*, v.17, pp.841-855.

- SCHIEMANN, J. (1995), *Investigations of collected scrap on PCB sources and development of an appropriate pretreatment*, Final Report n. 10310201 about a Research and Development Project Sponsored by the Federal Agency of Environmental Protection of Germany, D-Berlin.
- SCHOLL, G.U., NISIUS, S. (1998), "The environmental benefits to German companies through application of LCA". *Journal of Cleaner Production*, 6, pp.247-252.
- SCIUBBA, E. (2001), "Beyond thermoeconomics? The concept of Extended Exergy Accounting and its application to the analysis and design of thermal systems". *Exergy International Journal*, v.1, n.2, pp. 68-84.
- SEAGER, T.P., THEIS, T.L. (2002), "A uniform definition and quantitative basis for industrial ecology". *Journal of Cleaner Production*, n.10, pp.225-235.
- SEKUTOWSKI, J.C. (1994), "Greening the telephone: a case study". In: *The Greening of Industrial Ecosystems*, B.R. Allenby e D.J. Richards (eds.), National Academy Press, Washington, D.C., pp. 178-185.
- SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry (1993), *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A "Code of Practice"*, SETAC, Pensacola, FL.
- SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry (1994), *Life-Cycle Assessment data quality: A Conceptual Framework*, SETAC, Pensacola, FL.
- SOCLOW, R. (1994), "Six Perspectives from Industrial Ecology". In: *Industrial Ecology and global change*, Socolow, R., Andrews, C., Berkhout, F., Thomas, V. (eds.), Cambridge University Press, New York, pp. 3-16.
- SOCLOW, R., THOMAS, V., (1997), "The Industrial ecology of Lead and Electric Vehicles". *Journal of Industrial Ecology*, v.1, n.1.
- SÖDERBAUM, P. (1999), "Values, ideology and politics in ecological economics". *Ecological Economics*, 28, pp.161-170.
- SÖLLNER, F. (1997), "A reexamination of the role of thermodynamics for environmental economics". *Ecological Economics*, 22, pp.175-201.

- SPATH, P.L., MANN, M.K., KERR, D.R. (1999), *Life Cycle Assessment of coal-fired power production*. NREL/TP-570-25119, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.
- SPENGLER, T., GELDERMANN, J., HAHRE, S., SIEVERDINGBECK, A., RENTZ, O. (1997), "A multi-criteria decision-support system for ecological management: structure and application to the German Industry", In: *Greener Management International - The Journal of Corporate Environmental Strategy and Practice*, Issue 18, Summer 1997, Sheffield, U.K.
- STIGLIANI, W., ANDERBERG, S. (1992), "Industrial metabolism at the regional level: the Rhine Basin". Working Paper WP-92-10, IIASA, Luxemburgo.
- SZEKELY, J. (1995), *Steelmaking and Industrial Ecology - Is steel a green material?*. The 1995 Yukawa Memorial Lecture, Tokyo, Japan.
- SZARGUT, J. (1987), "Analysis of Cumulative Exergy Consumption", *International Journal of Energy Research*, v.11, pp.541-547.
- SZARGUT, J., MORRIS, D., STEWARD, F. (1988), *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*. Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- SUÁREZ, Francisco, 1548-1617. *Disputationes metaphysicae 17-19*. On efficient causality: metaphysical disputations 17, 18, and 19, tradução em inglês por J. Freddoso. Yale University Press, New Haven, c1994.
- THEOBALD, W. (1995), *Study of the emissions of Polychlorinated Dibenzodioxins and furans and heavy metals from Iron and Steel Plants*, Final Report n. 10403365/01 of a Research Project in charge of the Federal Agency of Environmental Protection of Germany, D-Berlin.
- TIBBS, H. (1993), *Industrial Ecology: an environmental agenda for industry*. Global Business Network, Emeryville, CA.
- UBA-BSW (1996), Determination and minimisation of PCDD/F emissions from thermal processes, investigation of the effect of electric arc furnace input and emission control techniques on the formation of PCDD/F emissions, Final Report about a Research and

- Development Project (n. 104 03 365/17) sponsored by the Federal Agency of Environmental Protection of Germany, D-Berlin.
- UN – UNITED NATIONS (1993), *Impact of developments in scrap reclamation and preparation on the World Steel Industry*, United Nations, Economic Commission for Europe, Geneva.
- UNCTAD (1999), *Iron and scrap steel*. United Nations.
- U.S. CONGRESS (1986), *Serious reduction of hazardous waste for pollution prevention and industrial efficiency*. Office of Technology Assessment, OTA Report no. OTA-ITE-317, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- U.S. CONGRESS (1990). *Pollution Prevention Act of 1990*. USC 42, Section 13106, Washington, D.C.
- U.S. CONGRESS (1992a). *Managing industrial solid wastes from manufacturing, mining, oil and gas production, and utility coal combustion*, Office of Technology Assessment, OTA-BP-O-82, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- U.S. CONGRESS (1992b), *Green products by design: choices for a cleaner environment*, Office of Technology Assessment, OTA-E-541, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- U.S. CONGRESS (1992c), *From pollution to prevention: a progress report on waste reduction*, Office of Technology Assessment, OTA Report no. OTA-ITE-347, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- VAN BERKEL, R., WILLEMS, E., LAFLEUR, M. (1997a), “The relationship between Cleaner Production and Industrial Ecology”, *Journal of Industrial Ecology*, v.1, n.1, Cambridge.
- VAN BERKEL, R., WILLEMS, E., LAFLEUR, M. (1997b), “Development of an industrial ecology toolbox for the introduction of Industrial Ecology in enterprises - I”, *Journal of Cleaner Production*, v.5, n.1-2, pp.11-25.
- VAN BERKEL, R., LAFLEUR, M. (1997), “Application of an industrial ecology toolbox for the introduction of Industrial Ecology in enterprises - II”, *Journal of Cleaner Production*, v.5, n.1-2, pp.27-37.

- VAN DER LINDE, C. (1993), "Micro-economic aspects of environmental policies and competitiveness - the micro-economic implications of environmental regulation: a preliminary framework". *Environmental Policies and Industrial Competitiveness*, OECD, Paris, pp.69-77.
- VAN GOOL, G. (1992), "Exergy analysis of industrial processes". *Energy*; v.17, n.8, pp.791-803.
- VALERO, A., LOZANO, M.A., MUÑOZ, M. (1986), *A General Theory of Exergy Saving – I, II e II*, ASME Book No. 40341C, WAM-1986, AES 2-3, pp. 17-21.
- VALERO, A., SERRANO, M. (1994), *Curso de Termoeconomía – volume II*, Universidad de Zaragoza e Universidade Estadual de Campinas.
- VARELA, F.; MATURANA, H., URIBE, R. (1974), "Autopoiesis: the organization of living systems, its carachterization and a model". *Bio Systems*, 5, pp.187-196.
- VAI – Voest-Alpine Industrieanlagenbau (1997), *COREX – Revolution in Ironmaking*. Voest-Alpine Industrieanlagenbau. Linz, Austria.
- WALL, G. (1977). *Exergy: a useful concept within resource accounting*. Report 77-42. Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology e University of Göteborg, Göteborg, Sweden.
- WALL, G. (1990). "Exergy conversion in the Japanese society". *Energy* 15, pp.435-444.
- WALL, G., SCIUBBA, E., NASO, V. (1994). "Exergy use in the Italian society". *Energy*, 19 (12), pp.1267-1274.
- WALLEY, N., WHITEHEAD, B. (1994). "It is not easy being green". *Harvard Business review* 72 (3), pp.46-51.
- WATANABE, C. (1972), *Industry-Ecology: Introduction of Ecology into Industrial Policy*. Ministry of International Trade and Industry (MITI), Tokio.
- WEC – World Energy Council (1995), "Industrial energy use and efficiency". In: *Energy Efficiency Improvement Utilising High Technology*, London.

- WERNER, C. (1997), "Control of organic micropollutants from the EAF". In: *Steel for sustainable development, International Iron and Steel Institute, ENCOSTEEL Conference*, Stockholm, pp. 247-255.
- WERNICK, I.K., AUSUBEL, J.E. (1995), *Resources Policy*, v.21, n.3, pp.189-198.
- WESTON, R., RUTH, M. (1997), "A dynamic, hierarchical approach to understanding and managing natural economic systems". *Ecological Economics*, 21, pp.1-17.
- WICKEN, J. (1986), "Evolutionary self-organization and entropic dissipation in biological and socioeconomic systems", *Journal of Social and Biological Structures*, 6, pp.353-366.
- WIJETILLEKE, L., KARUNARATNE, S. (1995), *Air Quality Management – Considerations for Developing Countries*. The World Bank Technical Papers n. 278 (Energy Series). The World Bank, Washington, D.C.
- WORRELL, E., MARTIN, N., PRICE, L. (1999), *Energy efficiency and carbon emissions reduction opportunities in the U.S. Iron and Steel Sector*. Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-41724, Environmental Energy and Technologies Division, Berkeley, CA.
- WRI – WORLD RESOURCES INSTITUTE (1997), *Resources flows: the material basis of industrial economies*. World Resources Institute, Washington, D.C.
- YOUNG, J. (1991), "Is the entropy law relevant to the economics of natural resource scarcity?". *Journal of Environmental Resources Management*, 21, pp.169-179.
- ZELNY, M. (1980), "Autopoiesis: a paradigm lost?". In: *Autopoiesis, dissipative structures and spontaneous social orders*, M. Zeleny (ed.), AAAS Selected Symposia Series, Westview Press, Boulder, CO, pp. 3-43.
- ZURN, J., DIENER, J. (1995), *Ecological assessment of products and processes – challenge and opportunity*. Daimler-Benz Research Center. Ulm, Germany.

ANEXO A

Cálculo de exergias de insumos, produtos e poluentes

Poluentes atmosféricos	Formula	Estado	Mol (g)	Exergia (kJ/mol)	Exergia (kJ/g)
Dióxido de enxofre	SO ₂	G	64,1	313,4	4,9
Dióxido de nitrogênio	NO ₂	G	46,0	55,6	1,2
Óxido de nitrogênio	NO	G	30,0	88,9	3,0
Monóxido de carbono	CO	G	28,0	275,1	9,8
Dióxido de carbono	CO ₂	G	44,0	19,9	0,5
Compostos orgânicos voláteis (VOC)	##	G	##	##	42,2
Ácido sulfídrico	H ₂ S	G	34,1	812,0	23,8
Ácido clorídrico	HCl	G	36,5	84,5	2,3
Ácido fluorídrico	HF	G	20,0	80,0	4,0
Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH)	##	G	##	##	41,0
Bifenis Policlorinados (PCB)	##	G	##	##	
Dibenzo-p dioxinas e furanos policlorinados	##	G	##	##	13,0
Benzeno	C ₆ H ₆	G	78,1	3303,6	42,3
Tolueno	C ₇ H ₈	G	92,1	3943,4	42,8
Xileno	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	G	106,2	4581,0	43,1
Clorobenzeno	C ₆ H ₅ Cl	G	112,6	3203,0	28,5
Amônia	NH ₃	G	17,0	337,9	19,8
Metano	CH ₄	G	16,0	831,7	51,8

Minério de ferro	Exergia química	Percentual	Conteúdo exergético
Componentes	(kJ/kg)	(massa)	(kJ/kg)
Fe ₂ O ₃	103,32	83,00%	86
Fe ₃ O ₄	525,18	8,89%	47
MgO	1.637,27	0,10%	2
SiO ₂	33,29	5,00%	2
CaO	1.965,05	1,30%	26

Al ₂ O ₃	1.965,45	1,04%	20
P ₂ O ₅	5.814,24	0,12%	7
Mn	8.778,97	0,33%	29
S	19.011,98	0,20%	38
K ₂ O	4.385,21	0,02%	1
Total		100,00%	257

Sínter	Exergia química	Percentual	Conteúdo exergético
Componentes	(kJ/kg)	(massa)	(kJ/kg)
Fe ₂ O ₃	103,32	83,00%	86
FeO	1.767,67	6,49%	115
Fe ₃ O ₄	525,18	0,00%	0
MgO	1.637,27	1,60%	26
SiO ₂	33,29	5,85%	2
CaO	1.965,05	1,09%	21
Al ₂ O ₃	1.965,45	1,33%	26
P ₂ O ₅	5.814,24	0,12%	7
MnO	1.683,17	0,33%	6
S	19.011,98	0,09%	17
K ₂ O	4.385,21	0,10%	4
Total		100,00%	310

Pelotas	Exergia química	Percentual	Conteúdo exergético
Componentes	(kJ/kg)	(massa)	(kJ/kg)
Fe ₂ O ₃	103,32	83,00%	86
FeO	1.767,67	0,73%	13
Fe ₃ O ₄	525,18	9,74%	51
MgO	1.637,27	0,59%	10
SiO ₂	33,29	3,32%	1
CaO	1.965,05	1,63%	32
Al ₂ O ₃	1.965,45	0,54%	11
P ₂ O ₅	5.814,24	0,12%	7
MnO	1.683,17	0,23%	4
S	19.011,98	0,04%	8
K ₂ O	4.385,21	0,06%	3
Total		100,00%	224

Ferro-gusa	Exergia química	Percentual	Conteúdo exergético
Componentes	(kJ/kg)	(massa)	(kJ/kg)
Fe	6.739,84	93,00%	6.268
C	34.157,02	4,00%	1.366

Si	30.427,97	0,90%	274
P	28.275,51	0,16%	45
S	19.011,98	0,20%	38
Mn	8.778,97	1,74%	153
Total		100,00%	8.144

Aço	Exergia química	Percentual	Conteúdo exergético
Componentes	(kJ/kg)	(massa)	(kJ/kg)
Fe	6.739,84	97,50%	6.571
C	34.157,02	1,00%	342
Si	30.427,97	0,00%	-
P	28.275,51	0,50%	141
S	19.011,98	0,20%	38
Mn	8.778,97	0,30%	26
Total		100,00%	7.119

Calcareo	Exergia química	Percentual	Conteúdo exergético
Componentes	(kJ/kg)	(massa)	(kJ/kg)
CaCO ₃	9,91	95,00%	9
MgCO ₃	449,47	1,00%	4
Fe ₂ O ₃	103,32	0,07%	0,1
SiO ₂	33,29	2,00%	1
S	19.011,98	4,89E-05	1
P	28.275,51	2,02E-05	1
H ₂ O	49,96	1,93%	1
Total		100,00%	17

Ferro-esponja	Exergia química	Percentual	Conteúdo exergético
Componentes	(kJ/kg)	(massa)	(kJ/kg)
Fe	6.739,84	0,88	5.931
C	34.157,02	0,02	683
SiO ₂	33,29	0,02	1
P	28.275,51	5,00E-04	14
S	19.011,98	3,00E-04	6
FeO	1.767,67	0,08	141
Total		1	6.776

		Exergia química	Percentual	Conteúdo exergético
		(kJ/kg)	(massa)	(kJ/kg)
Cal	CaO	1965,05	100%	1965
Cal hidratada	Ca(OH) ₂	724,79	100%	725

Gás oxigênio	Exergia química (kJ/kg)	Percentual (massa)	Conteúdo exergético (kJ/kg)
O ₂	124,07	100%	124

Subprodutos	Fórmula	Exergia química (kJ/kg)	Conteúdo exergético (kJ/kg)
Alcatrão		35.000,00	35.000
Óleo BTX (benzeno, tolueno e xileno)		35.000,00	35.000
Sulfato de amônia	(NH ₄) ₂ SO ₄	4.999,32	4.999
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	1.666,04	1.666
Enxofre	S	19.011,98	19.012
Naftaleno	C ₁₀ H ₈	40.998,63	40.999
Água	H ₂ O	49,96	50
Vapor	H ₂ O	527,34	527
Gesso	CaSO ₄ .H ₂ O	49,95	50

Pós de Alto-forno	Exergia química (kJ/kg)	Fração em peso	Conteúdo exergético (kJ/kg)
ZnO	281,43	0,50%	1
PbSO ₄	122,67	0,10%	0
CuS	7.220,71	0,10%	7
ZnS	7.673,20	0,10%	8
CaO	1.965,05	8,00%	157
FeO	1.767,67	40,40%	714
Pó de coque	29.912,00	35,00%	10.469
MnO	1.683,17	0,50%	8
Al ₂ O ₃	1.965,45	3,70%	73
SiO ₂	33,29	8,00%	3
MgO	1.637,27	2,00%	33
Na ₂ O	4.779,04	0,64%	31
K ₂ O	4.385,21	0,96%	42
Total		100,00%	11.546

Pós de Aciaria a oxigênio	Exergia química (kJ/kg)	Fração (massa)	Conteúdo exergético (kJ/kg)
Fe ₂ O ₃	103,32	36,00%	37

Cr ₂ O ₃	240,15	0,20%	0
NiO	307,86	0,10%	0
ZnO	258,08	3,20%	8
PbO	210,58	1,00%	2
FeO	1.767,67	15,00%	265
Al ₂ O ₃	1.965,45	3,00%	59
SiO ₂	33,29	10,20%	3
Fe	6.739,84	15,00%	1011
Na ₂ O	4.779,04	3,00%	143
K ₂ O	4.385,21	2,60%	114
C	34.157,02	0,70%	239
CaO	1.965,05	10,00%	197
Total		100,00%	2080

Pós de Aciaria elétrica	Exergia química (kJ/kg)	Fração em peso	Conteúdo exergético (kJ/kg)
Fe ₂ O ₃	103,32	36,00%	37
Cr ₂ O ₃	240,15	1,00%	2
NiO	307,86	0,40%	1
ZnO	258,08	25,00%	65
PbO	210,58	6,00%	13
MnO	1.683,17	4,00%	67
Al ₂ O ₃	1.965,45	7,00%	138
SiO ₂	33,29	2,30%	1
MgO	1.637,27	5,00%	82
Na ₂ O	4.779,04	1,20%	57
K ₂ O	4.385,21	1,50%	66
C	34.157,02	1,00%	342
CaO	1.965,05	9,60%	189
Total		100,00%	1.060

Escória de Alto-forno	Exergia química (kJ/kg)	Fração em peso	Conteúdo exergético (kJ/kg)
TiO ₂	267,83	2,70%	7
Fe	6.739,84	0,60%	40
CaS	11.707,79	2,00%	234
CaO	1.965,05	38,70%	760
MnO	1.683,17	0,70%	12
Al ₂ O ₃	1.965,45	12,00%	236
SiO ₂	33,29	30,00%	10
MgO	1.637,27	11,40%	187

Na ₂ O	4.779,04	0,60%	29
K ₂ O	4.385,21	0,80%	35
Total		100%	1.612

Escória de Aciaria a oxigênio	Exergia química (kJ/kg)	Fração em peso	Conteúdo exergético (kJ/kg)
Fe	6.739,84	1,00%	67
Fe ₂ O ₃	103,32	11,00%	11
CaO	1.965,05	50,00%	983
FeO	1.767,67	4,00%	71
Cr ₂ O ₃	240,15	1,00%	2
MnO	1.683,17	6,00%	101
Al ₂ O ₃	1.965,45	2,00%	39
SiO ₂	33,29	18,00%	6
MgO	1.637,27	5,00%	82
P ₂ O ₅	5.814,24	2,00%	116
Total		100,00%	1479

Escória de Aciaria elétrica	Exergia química (kJ/kg)	Fração em peso	Conteúdo exergético (kJ/kg)
TiO ₂	267,83	0,30%	1
Fe	6739,84	1,00%	67
C	34157,02	0,33%	113
P ₂ O ₅	5814,24	0,60%	35
CaO	1965,05	35,00%	688
FeO	1767,67	18,00%	318
Cr ₂ O ₃	240,15	1,00%	2
MnO	1683,17	11,00%	185
Al ₂ O ₃	1965,45	8,00%	157
SiO ₂	33,29	14,17%	5
MgO	1637,27	10,00%	164
Na ₂ O	4779,04	0,50%	24
K ₂ O	4385,21	0,10%	4
Total		100,00%	1.763

	Poder calorífico Inferior	Coefficiente	Exergia Química
	kJ/kg	Exergético	kJ/kg
Carvão metalúrgico	21.680	1,09	23.588
	31.501	1,09	34.273
Coque	29.035	1,06	30.690
Carvão vapor	23.865	1,09	25.965
	17.899	1,09	19.474
			-
Óleo combustível	40.133	1,07	43.062
	kJ/m3		kJ/m3
Gás Natural	30.960	1,04	32.198
	36.000	1,04	37.440
	38.753	1,04	40.303
	34.878	1,04	36.273
			-
Gás de Coqueria (GCO)	18.841	1,00	18.841
	17.400	1,00	17.400
	19.800	1,00	19.800
Gás de Alto-forno (GAF)	3.000	0,98	2.940
	2.700	0,98	2.646
	3.600	0,98	3.528
			-
Gás de Aciaria (GAC)	9.000	1,00	9.000

ANEXO B

Balanços de Exergia por Etapas de produção

Mineração de Calcáreo								
	Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos	
						MJ/t Calcáreo		MJ/t Calcáreo
	Calcáreo (Terra)	1,1	t/t Calcáreo	17.000	kJ/t	19	Calcáreo	17
	Óleo comb.	0,051	t/t Calcáreo	43.062.250	kJ/t	2.196	Emiss. atmosf.	73
							Efluentes liq.	0
	Elettricidade	15	kWh/t Calcáreo	3600	kJ/kWh	54	Resíduos sól.	0
							Total poluentes	73
							TOTAL prod.	90
							Efic. Exerg. 1	0,04
							Efic. Exerg. 2	0,01
							Emissões CO2	72
					Total	2269	Perdas exergia	2179
					Energia	19		
					Material	2.250		

Mineração de Carvão							
	Insumos		Unidades	Exergy	Unidades	Exergy	
						MJ/t Carvão	MJ/t Carvão
							29.800
	Óleo comb.	0,008	t/t Carvão	43.062.250	kJ/t	344	Carvão
							Emiss. atmosf.
							182
	Elettricidade	10	kWh/t Carvão	3600	kJ/kWh	36	Efluentes líq.
							0
							Resíduos sólidos
							29800
							Total poluentes
							29982
							TOTAL prod.
							59782
	Carvão	2	t/t Carvão	29.800.000	kJ/t	59.600	Efic. Exerg. 1
							0,997
							Efic. Exerg. 2
							0,50
							Emissões CO2
							8
					Total	59980	Perdas exergia
							199
					Energia	380	
					Material	59.600	

Mineração Ferro							
Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos	
					MJ/t Min.Ferro		MJ/t Min.Ferro
						Min.Ferro	257
Min.Ferro terra	1,85	t/t Min.Ferro	88.580	kJ/t	164		
Óleo comb.	0,003	t/t Min.Ferro	43.062.250	kJ/t	129	Emiss. atmosf.	4
						Efluentes liq.	0
Eletricidade	27	kWh/t Min.Ferro	3600	kJ/kWh	97	Resíduos sólidos	46
						Total poluentes	50
						TOTAL prod.	307
						Efic. Exerg. 1	0,79
						Efic. Exerg. 2	0,66
						Emissões CO2	4
				Total	390	Perdas exergia	83
				Energia	226		
				Material	164		

Sinterização							
Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos	
					MJ/t Sinter		MJ/t Sinter
Calcáreo	0,15	t/t sinter	17.000	kJ/t	3	Sinter	317
						Emiss. atmosf.	277
Min.Ferro	0,95	t/t sinter	257.495	kJ/t	245	Efluentes liq.	
						Resíduos sól.	
						Subprodutos	
Eletricidade	15	kWh/t sinter	3600	kJ/kWh	54	TOTAL prod.	594
Coque	0,052	t/t sinter	30.690.481	kJ/t	1596		
						Efic. Exerg. 1	0,25
						Efic. Exerg. 2	0,13
Pós reciclados	0,011	t/t sinter	13.082.000	kJ/t	144		
GCO	3,164	m3/t sinter	18.841	kJ/m3	60	Emissões CO2	74
Mat. reciclados	0,042	t/t sinter	7.000.000	kJ/t	294		
				Total	2395	Perdas exergia	1801
				Energia	1710		
				Material	685		

Planta de Oxigênio							
Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos	
					MJ/m3 O2		MJ/m3 O2
Eletricidade	0,5	kWh/m3 O2	3600	kJ/kWh	1,8	Oxigênio	4,7
Air	5	m3/m3 O2	1.033	kJ/m3	5,2		
						TOTAL prod.	4,7
						Efic. Exerg.	0,67
				Total	7	Perdas exergia	2,3
				Energia	2		
				Material	-		

Coqueria								
Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos		
					MJ/t Sinter			30.690
						Coque		29800
						GCO		6000
						Subprodutos		1603
						Emiss. atmosf.		276
						Efluentes líq.		2
Eletricidade	40	kWh/t Coque	3600	kJ/kWh	144	Total Poluentes		278
						Total produtos		37.403
						TOTAL prod.		37681
Carvão	1,25	t/t Coque	32.096.000	kJ/t	40.120			
Coque		t/t Coque	30.690.481	kJ/t	0			
						Efic. Exerg. 1		0,85
						Efic. Exerg. 2		0,85
						Efic. Exerg. 3		0,68
Reações Químicas						Emissões CO2		241
vapor								350
GAF + GCO								3200
90%/10%				Total	44104	Perdas exergia		6423
				Energia	3984			
				Material	40.120			

Alto-forno								
Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos		
					MJ/t Fe gusa			MJ/t Fe gusa
Calcáreo	0,15	t/t Fe gusa	17.000	kJ/t	3	Ferro gusa		8135
Cal	0,01	t/t Fe gusa	1.965.000	kJ/t	20			
Min. Ferro	0,15	t/t Fe gusa	257.495	kJ/t	39	GAF		4500
						Emiss. atmosf.		446
Gás natural	30	m3/t Fe gusa	32.198	kJ/m3	966	Efluentes líq.		2
Eletricidade	16	kWh/t Fe gusa	3600	kJ/kWh	58	Resíduos sól.		660
Oxigênio	35	m3/t Fe gusa	4685,7	kJ/m3	164	Total produtos		12635
Pelotas	0,39	t/t Fe gusa	220000	kJ/t	86	TOTAL prod.		13743
Sinter	1,16	t/t Fe gusa	317000	kJ/t	368	Total Poluentes		1108
Carvão	0,084	t/t Fe gusa	32.640.000	kJ/t	2.742	Efic. Exerg.1		0,81
Coque	0,358	t/t Fe gusa	30.690.481	kJ/t	10987	Efic. Exerg.2		0,74
BFG+COG					1534	Efic. Exerg. 3		0,53
Mat. Recic.	0,006	t/t Fe gusa	7.000.000	kJ/t	42			
						Emissões CO2		433
				Total	17007	Perdas exergia		3264
				Energia	16451			
				Material	556			

Aciaria a Oxigênio							
Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos	
					MJ/t aço líq.		MJ/t aço líq.
						aço líq.	7.085
Cal	0,045	t/t aço líq.	1.965.000	kJ/t	88	BOF gas	700
Min.Ferro	0,021	t/t aço líq.	257.495	kJ/t	5	Emiss. atmosf.	64
						Efluentes líq.	1
Gás natura	5	m3/t aço líq.	32.198	kJ/m3	161	Resíduos sól.	227
Eletricidad	13	kWh/t aço líq.	3600	kJ/kWh	47		
Oxigênio	51	m3/t aço líq.	4685,7	kJ/m3	239	TOTAL prod.	8077
						Total produtos	7.785
						Total Poluentes	292
						Efic. Exerg.1	0,86
						Efic. Exerg.2	0,83
Sucata	0,124	t/t aço líq.	7.084.956		879	Efic. Exerg. 3	0,75
Ferro gusa	0,976	t/t aço líq.	8135000		7940	Emissões CO2	63
Mat. recicl	0,01	t/t aço líq.	7.000.000	kJ/t	70		
				Total	9429	Perdas exergia	1352
				Energia	447		
				Material	8.982		

Forno Elétrico a Arco		100% sucata					
Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos	
					MJ/t aço líq.		MJ/t aço líq.
						aço líq.	7.085
Cal	0,045	t/t aço líq.	1.965.000	kJ/t	88	Emiss. atmosf.	45
						Efluentes líq.	0
						Resíduos sól.	243
Gás natural	10	m3/t aço líq.	32.198	kJ/m3	322	Total Poluentes	288
Eletricidade	480	kWh/t aço líq.	3600	kJ/kWh	1.728		
Oxigênio	20	m3/t aço líq.	4685,7	kJ/m3	94	TOTAL prod.	7373
Pelotas	0	t/t aço líq.	220000	kJ/t	0		
DRI	0	t/t aço líq.	6776000	kJ/t	0		
Carvão	0,015	t/t aço líq.	32.096.000	kJ/t	481	Efic. Exerg. 1	0,71
Aço-ligas	0,01	t/t aço líq.	7.084.956	kJ/t	71	Efic. Exerg. 2	0,68
Sucata	1,05	t/t aço líq.	7.084.956	kJ/t	7439		
Eletrodo	0,005	t/t aço líq.	34156000	kJ/t	171	Emissões CO2	11
Mat. reciclados		t/t aço líq.	7.000.000	kJ/t	0		
				Total	10394	Perdas exergia	3022
				Energia	2625		
				Material	7.769		

COREX							
Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos	
					MJ/t H.M.		MJ/t H.M.
Calcáreo	0,325	t/t Metal líq.	17.000	kJ/t	6	Metal líq.	8135
Cal	0,01	t/t Metal líq.	1.965.000	kJ/t	20	Export gas	13200
Min.Ferro	0,444	t/t Metal líq.	257.495	kJ/t	114	Total products	21335
						Emiss. atmosf.	526
						Efluentes líq.	0
Eletricidade	75	kWh/t H.M.	3600	kJ/kWh	270	Resíduos sól.	1384
Oxigênio	560	m3/t Metal líq.	4685,7	kJ/m3	2624	Total Poluentes	1910
Pelotas	0,932	t/t Metal líq.	220000	kJ/t	205	TOTAL prod.	23245
Carvão	0,99	t/t Metal líq.	32.096.000	kJ/t	31.775	Efic. Exerg. 1	0,65
						Efic. Exerg. 2	0,60
						Efic. Exerg. 3	0,23
Metal líq.	0	t/t Metal líq.			0	Emissões CO2	524
Lamas e pós reciclados					505		
				Total	35518	Perdas exergia	12273
				Energia	34669		
				Material	849		

Calcinação							
Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos	
					MJ/t Cal		MJ/t Cal
Calcáreo	1,6	t/t Cal	17.000	kJ/t	27	Cal	1965
Óleo comb.	0,007	t/t Cal	43.062.250	kJ/t	301	Emiss. atmosf.	597
Gás natural	68	m3/t Cal	32.198	kJ/m3	2189	Efluentes líq.	0
Eletricidade	20	kWh/t Cal	3600	kJ/kWh	72	Resíduos sól.	1
Carvão	0,025	t/t Cal	32.096.000	kJ/t	802	Total poluentes	598
						TOTAL prod.	2563
						Efic. Exerg. 1	0,76
						Efic. Exerg. 2	0,58
						Emissões CO2	542
				Total	3393	Perdas exergia	830
				Energia	3365		
				Material	27		

Planta de redução direta (DRI)							
Insumos		Unidades	Exergia	Unidades	Exergia	Produtos	
					MJ/t DRI		MJ/t DRI
						DRI	6776
						Emiss. atmosf.	235
Gás natural	300	m3/t DRI	32.198	kJ/m3	9660	Efluentes liq.	0
Eletricidade	105	kWh/t DRI	3600	kJ/kWh	378	Resíduos sól.	0
						Total poluentes	235
Pelotas	1,418	t/t DRI	220000	kJ/t	312	TOTAL prod.	7011
						Efic. Exerg. 1	0,68
						Efic. Exerg. 2	0,65
						Efic. Exerg. 3	0,65
						Emissões CO2	235
				Total	10349	Perdas exergia	3338
				Energia	10038		
				Material	312		