



Número:121/2004
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

MARCO FÁBIO POLLI

**INCORPORAÇÃO DA VARIÁVEL AMBIENTAL NA DINÂMICA DE INOVAÇÃO:
OPORTUNIDADES E RESTRIÇÕES PARA A INDÚSTRIA QUÍMICA
E O EXEMPLO DA SUBSTITUIÇÃO DOS CFCS**

Tese apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Política Científica e Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Newton Müller Pereira

CAMPINAS - SÃO PAULO

Fevereiro – 2004

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IG - UNICAMP**

P764i Polli, Marco Fábio
Incorporação da variável ambiental na dinâmica de inovação:
oportunidades e restrições para a indústria química e o exemplo da
substituição dos CFCs / Marco Fábio Polli.-
Campinas,SP.: [s.n.], 2004.

Orientador: Newton Müller Pereira
Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de
Geociências.

1. Inovações tecnológicas - Aspectos ambientais. 2. Meio
ambiente. 3. Indústria química. 4. Tecnologia industrial I. Pereira,
Newton Müller. II. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de
Geociências. III. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PÓS-GRADUAÇÃO EM POLÍTICA CIENTÍFICA E
TECNOLÓGICA**

AUTOR: MARCO FÁBIO POLLI

**INCORPORAÇÃO DA VARIÁVEL AMBIENTAL NA DINÂMICA DE INOVAÇÃO:
OPORTUNIDADES E RESTRIÇÕES PARA A INDÚSTRIA QUÍMICA
E O EXEMPLO DA SUBSTITUIÇÃO DOS CFCS**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Newton Müller Pereira

Aprovada em: ____/____/____

PRESIDENTE: Prof. Dr. Newton Müller Pereira

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Prof. Dr. Newton Müller Pereira	_____	- Presidente
Profa. Dra . Adelaide Maria de Souza Antunes	_____	
Profa. Dra . Rosana Icassatti Corazza	_____	
Prof. Dr. Ademair Romeiro Ribeiro	_____	
Prof. Dr. André Tosi Furtado	_____	

Campinas, 27 de fevereiro de 2004.

Aos meus pais,

Eu não poderia neste espaço agradecer a todas as pessoas que me apoiaram no período em que trabalhei nesta tese. Mesmo assim gostaria de expressar aqui a minha gratidão:

À CAPES, CNPq, UNICAMP e, em especial, ao IG pelas bolsas e suporte,

Ao meu orientador, Prof. Newton Pereira, cujo apoio contínuo foi condição essencial para esse trabalho,

À minha banca de exame, Profa. Adelaide Antunes, Prof. Ademar Romeiro, Prof. André Furtado e Profa. Rosana Corazza,

À Profa. Beatriz Bonacelli, Profa. Léa Velho e Profa. Hebe Mitlag, integrantes do DPCT que em momentos diversos deram-me ajuda e atenção,

A Aníbal Romano, Adriana Teixeira, Edinalva Schultz e Valdirene Pinotti, funcionários que ajudam a fazer do IG um ambiente leve e propício ao trabalho.

Aos amigos, Adalberto Azevedo, Alain François, André Campos, Eduardo Godoi, Marco Catalão, Pedro Pessoa, Rosana Monteiro e Simone Pallone, sempre prestativos,

E, por fim, à Tággidi e à minha família,

“Todo conhecimento é precário,
mas não podemos deixar de nos apoiar nele.”

R. Lunc



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

**INCORPORAÇÃO DA VARIÁVEL AMBIENTAL NA DINÂMICA DE INOVAÇÃO:
OPORTUNIDADES E RESTRIÇÕES PARA A INDÚSTRIA QUÍMICA
E O EXEMPLO DA SUBSTITUIÇÃO DOS CFCs**

RESUMO

TESE DE DOUTORADO

Marco Fábio Polli

O setor químico possui uma problemática especialmente crítica relacionada à toxicidade e cumulatividade de seus produtos, emissão de poluentes e acidentes de grande porte. O tema geral desta tese refere-se às oportunidades e barreiras para a incorporação da variável ambiental na dinâmica inovativa desse setor. É traçada a evolução histórica da indústria química tendo em vista as principais mudanças na sua base tecnológica e o aparecimento de problemas de ordem ambiental. Identifica-se como questão-chave o fortalecimento das regulamentações ambientais e da pressão da sociedade civil no momento em que o setor químico já perdia parte do seu dinamismo tecnológico. É salientada a diversidade da indústria química atual em termos de produtos, empresas e capacidade de renovação técnica e são discutidos modos de tratar o setor como um objeto de estudo. Para um melhor entendimento sobre as perspectivas de geração e adoção de inovações ambientalmente amigáveis, é realizada uma revisão teórica de autores ligados à economia evolucionista/neoschumpeteriana. Com o apoio desses elementos teóricos, são discutidas linhas de análise e hipóteses para o caso do setor químico. Um contraponto a partir de um caso concreto será realizado pela análise do processo de substituição dos CFCs deflagrada com o Protocolo de Montreal (1987). São avaliadas as alternativas técnicas introduzidas pela indústria química até a data limite de produção dos CFCs nos países centrais (1º de jan. de 1996). Por essa análise, evidencia-se uma substituição técnica realizada majoritariamente por inovações incrementais, porém, apesar disso, revela-se também um processo complexo, que demandou consideráveis esforços dos produtores e usuários.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM POLÍTICA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

**INCORPORATING THE ENVIRONMENTAL VARIABLE IN THE INNOVATION
DYNAMICS: OPPORTUNITIES AND RESTRICTIONS FOR THE CHEMICAL
INDUSTRY AND THE EXAMPLE OF THE CFCS SUBSTITUTION**

ABSTRACT

DOCTORATE THESIS

Marco Fábio Polli

The chemical sector represents a particularly critical set of problems with regard to its products toxicity and accumulativity, pollutant emission and major accidents. The opportunities and barriers to the incorporation of the environmental variable in this industry's innovative dynamics are the main topic of this thesis. It begins reviewing the historical evolution of the chemical industry focusing on the main changes in its technological base and the appearance of environmental problems. It recognizes the strengthening of the environmental legislation and the pressure of the civil society at a time when the chemical industry was already losing part of its technological dynamism as a key issue. It highlights the diversity of the current chemical industry as far as products, companies and the technical renovation capacity are concerned and discusses ways to treat this sector as a study object. To better understand the perspectives of generating and adopting environment-friendly innovations, it reviews the literature on the evolutionary/neo-schumpeterian economics. Drawing on these theoretical elements, it discusses analysis lines and hypotheses for the case of the chemical sector. Next, it analyzes the concrete case of the CFCs substitution process provoked by the Montreal Protocol (1987). It then assesses the alternative techniques introduced by the chemical industry before the deadline to phase out the production of CFCs in the central countries (January 1st, 1996). Although this analysis clearly shows a technical substitution effected mainly through incremental innovations, it also reveals a complex process that demanded substantial efforts from both users and producers

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
 CAPÍTULO 1:	
INDÚSTRIA QUÍMICA: EVOLUÇÃO HISTÓRICA E PERFIL SETORIAL	5
<u>1.1 As Principais Fases de Desenvolvimento da Indústria Química</u>	6
1.1.1 Primeira Fase: A Emergência da Indústria Química Inorgânica.....	6
1.1.2 Segunda Fase: O Processo Solvay e os Produtos Químicos Sintéticos Orgânicos	12
1.1.3 Terceira Fase: O Desenvolvimento da Petroquímica, dos Materiais Sintéticos e a Expansão Geral do Setor Químico	19
1.1.4 Quarta Fase: Perda de Dinamismo e Reestruturação	33
<u>1.2 Problemas de Definição e Modos de Abordagem Relacionados à Indústria Química</u>	39
<u>1.3 Dados Econômicos sobre a Indústria Química no Mundo</u>	43
<u>1.4 Temas de Análise Essenciais sobre a Indústria Química</u>	48
1.4.1 O Alto Grau de Encadeamento Interno e Externo.....	48
1.4.2 A Alta Intensidade de Capital e de P&D.....	49
1.4.3 O Perfil das Empresas no Setor Químico	51
1.4.4 Estratégias de Integração, Diversificação e Racionalização.	54
1.4.5 Problemática Ambiental Especialmente Crítica.....	55
 CAPÍTULO 2:	
INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E A QUESTÃO AMBIENTAL: UMA REVISÃO DA CONTRIBUIÇÃO DA ECONOMIA EVOLUCIONISTA E NEOSCHUMPETERIANA E LINHAS DE ANÁLISE PARA O CASO DO SETOR QUÍMICO	59
<u>2.1 Inovação Tecnológica e Questão Ambiental: uma Revisão da Contribuição Teórica da Economia Evolucionista e Neoschumpeteriana</u>	60
2.1.1 <i>Lock-in</i> e Tecnologias Sujas.....	60

2.1.2 Um <i>Framework</i> Evolucionista	64
2.1.3 O Paradigma Técnico-econômico da Informação e suas Implicações para o Meio Ambiente	68
2. 2 Oportunidades e Restrições para a Incorporação da Variável Ambiental na	
<u>Indústria Química: Linhas e Hipótese de Análise</u>	73
2.2.1 Inovações de Produto	75
2.2.2 Inovações de Processo	76
2.2.3 Alto Grau de Encadeamento Industrial	79
2.2.4 Alta Intensidade de Capital e de P&D	80
2.2.5 Perfil de empresa	80
2.2.6 O Impacto das Novas Tecnologias	81
2.2.7 Comentário Final	83
 CAPÍTULO 3:	
O EXEMPLO DA SUBSTITUIÇÃO DOS CFCs	85
<u>3.1 A Evolução da Crise Ambiental dos CFCs até o Protocolo de Montreal (1988)</u>	86
3.1.1 Os CFCs como Produtos Químicos Seguros	86
3.1.2 Os CFCs como Depletors da Camada de Ozônio	91
<u>3.2 Reconstrução da Trajetória de Substituição de CFCs a partir de Periódicos</u>	
<u>Setoriais (1987-1996)</u>	99
1987/1988	99
1989	102
1990	103
1991	104
1992	105
1993	107
1994	108
1995	109
Após 1995 (comentários)	110
Limitações no Uso dos Periódicos Chemical Week e Chemical Engineering	112
<u>3.3 Discussão Geral sobre a Substituição dos CFCs</u>	114

3.3.1 Os CFCs e a Problemática Ambiental da Indústria Química	114
3.3.2 Controvérsia e Estabilização dos Universos de Percepção	115
3.3.3 A Introdução de Inovações Incrementais pelos Produtores Químicos	116
3.3.4 A Adaptação dos Usuários	118
3.3.5 <i>Trade-offs</i> nas soluções ambientais	119
DISCUSSÃO FINAL	122
BIBLIOGRAFIA	129

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1: Principais Cadeias da Indústria Química no Primeiro Estágio	9
Fig. 1.2: Estilização da Cadeia dos Primeiros Derivados do Etileno	26
Fig. 1.3: Rede Mundial dos Maiores Fluxos de Comércio de Produtos Químicos (1998) ..	45
Fig. 2.1: Representação Esquemática da Incorporação da Questão Ambiental no Ambiente Seletivo	65
Fig. 3.1: Reação de Síntese do CFC-12	87
Fig. 3.2: Reações de Decomposição do CFC-12 e do Ozônio	92

LISTA DE GRÁFICOS

Graf. 1.1.: Divisão Geográfica da Produção da Indústria Química (2002)	43
Graf. 1.2.: Comparação do Balanço de Comércio de Produtos Químicos entre UE, EUA e Japão (1985-1997)	46
Graf. 1.3: Comparação de Coeficientes de Exportação: UE, EUA e Japão (2002)	46
Graf. 1.4.: Financiamento de P&D por Setores da Manufatura nos EUA: Comparação por % de Vendas Líquidas (1997)	50
Graf. 1.5: Contribuição da Indústria Química e afins (SIC 29) no Inventário de Emissões Tóxicas dos EUA	56
Graf 1.6: Distribuição do Gasto com Abatimento de Poluição pela Indústria dos EUA em 1994	57
Graf. 2.1: Emissão Equivalente em DBO em Complexos Químicos da ICI	74
Graf. 2.2: Intensidade Energética da Indústria Química Europeia	74
Graf. 3.1: Produção de CFC-12 (1931-1950)	87
Graf. 3.2: Produção Mundial de CFCs (1950-2000)	89
Graf. 3.3: Consumo de CFCs por Aplicação (1974)	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1: Padrão de Classificação Industrial dos EUA: Produtos Químicos e Afins	40
Quadro 1.2: Classificação dos Produtos Químicos	42
Quadro 1.3: Tipologia de Empresas Químicas	52
Quadro 1.4: 20 Maiores Empresas Químicas do Mundo (em vendas, 2001)	52
Quadro 1.5: Exemplos de Acidentes Importantes da Indústria Química	58
Quadro 2.1: Exemplos de Produtos Ambientalmente Amigáveis (ICI)	75
Quadro 2.2 Fontes de Resíduos em uma Planta Química	77
Quadro 3.1: CFCs e HCFCs no mercado (em torno de 1973)	91
Quadro 3.2: Estimativas de Depleção de Ozônio	90
Quadro 3.3: Principais Substituintes aos CFCs (na classe dos fluorcarbonos).....	100

SIGLAS UTILIZADAS

ARAP - Alliance for Responsible Atmospheric Policy
ARCP - Alliance for Responsible CFC Policy
CEE - Comunidade Econômica Européia
CEO - Chief Executive Officer
CFC - Clorofluorcarbono
CMA - Chemical Manufacturers Association
EPA - Environmental Protection Agency
FPP - Fluorcarbon Program Panel
HCFC - Hidroclorofluorcarbono
HFC - Hidrofluorcarbono
HFE - Hidrofluoréter
PAFT - Program for Alternative Fluorocarbon Toxicity Testing
NRC - National Research Council
UE - União Européia
WMO - World Meteorological Organization

INTRODUÇÃO

“Ver-se-ão as artes químicas se enriquecerem com procedimentos novos; depurarem, simplificarão os antigos métodos; desembaraçarão-se de tudo aquilo que ali a rotina tinha introduzido de substâncias inúteis e nocivas, de práticas vãs ou imperfeitas; enquanto que, ao mesmo tempo, encontrava-se o meio de prevenir uma parte dos perigos, freqüentemente terríveis, aos quais ali os operários estavam expostos; e que assim, procurando mais desfrutes e riquezas, eles não os comprassem por tantos sacrifícios dolorosos, por tantos remorsos.”

(J. Condorcet [1743-1794], *Esboços de um quadro histórico dos progressos do espírito humano*, p. 161-162, 1994)

“Os produtos químicos melhoram muito a saúde e a expectativa de vida: incrementaram a produção agrícola; aumentaram o conforto; as facilidades e a qualidade de vida em geral; e ampliaram as oportunidades econômicas. A indústria química é também um dos setores mais dinâmicos em vários países, incluindo muitos dos em desenvolvimento. Mas essa indústria e seus produtos podem exercer um impacto particularmente grave sobre o meio ambiente. Ela deu origem a uma infinidade de novos problemas de poluição ligados não só aos produtos como aos processos. Continua a gerar efeitos uma quantidade cada vez maior de produtos e rejeitos cujos efeitos, sobretudo a longo prazo, sobre a saúde do homem e o meio ambiente ainda são praticamente desconhecidos. Ocorreram acidentes graves, e nos últimos anos os índices de segurança da indústria ficaram abalados.”

(Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, *Nosso futuro comum*, 1988 [1987], p.249)

As duas citações acima ilustram com propriedade o paradoxo entre os benefícios e os danos que a indústria química oferece à sociedade, paradoxo este que constitui a motivação inicial desta tese. Condorcet, que estava se referindo a uma indústria química no final do séc XVIII, ainda em seu estado embrionário, aponta que a riqueza obtida pelos operários pelo seu trabalho nas plantas químicas vem ligada a riscos e sacrifícios consideráveis. Na perspectiva de sua obra, Condorcet coloca que o aperfeiçoamento futuro das “artes químicas” seria um componente do progresso geral da humanidade. Dois séculos mais tarde, como atesta o *Nosso Futuro Comum*, o paradoxo relacionado aos benefícios e danos prosseguiu em uma escala bastante ampliada. A indústria química é um integrante crucial das economias industrializadas e sua vasta gama produtos, na ordem de milhares, encontra aplicação ubíqua em nosso cotidiano. Entretanto, os seus danos potenciais ultrapassaram o nível do chão-de-fábrica para se tornarem problemas de caráter global, entre eles: mutagenia e cumulatividade dos produtos químicos sintéticos, a carga de efluentes de produção e os riscos de grandes acidentes industriais.

O exemplo dos CFCs é bastante significativo. Tratava-se de um produto químico em geral inerte e que, desse modo, podendo ser considerado um fluido refrigerante seguro, facilitou a expansão da refrigeração doméstica e residencial. Essa característica de segurança promoveu igualmente outras aplicações técnicas: expansão de espumas, agente propelente em aerossóis, agente de limpeza de circuitos eletrônicos. O consumo dos CFCs cresceu exponencialmente de 1940 até 1974, quando um artigo científico propôs que o lançamento desses produtos na atmosfera significaria uma ameaça para a camada do ozônio, a qual serve de escudo contra a incidência de raios ultravioleta na terra. Em resposta a esse problema, os CFCs foram objeto de um acordo multilateral de caráter inédito, o Protocolo de Montreal (1987), o qual, conjuntamente com suas emendas, determinou o fim da produção dos CFCs nos países desenvolvidos em janeiro de 1996.

O **foco** desta tese reside no processo de inovação tecnológica e, mais precisamente, de que modo a variável ecológica pode influenciar esse processo. No caso do CFCs, por exemplo, podem-se perguntar quais foram os tipos de alternativas técnicas oferecidas pela indústria química e se elas conseguiram cobrir todos os mercados pertinentes. Em suma, o **tema principal** deste trabalho consiste na capacidade da indústria química de incorporar a componente ambiental dentro da sua dinâmica tecnológica. São dois os **objetivos principais**:

- 1) Identificar oportunidades e restrições gerais para inovações ambientalmente amigáveis no setor químico e discutir elementos analíticos relevantes.
- 2) Obter um melhor entendimento sobre o processo de substituição dos CFCs, considerando as repostas dadas pelo setor químico.

Para realizar esta tese, será utilizada como **apoio teórico** a contribuição dos economistas comumente denominados de neoschumpeterianos e evolucionistas, acrescentando-se também o trabalho dos historiadores da tecnologia. Esta opção justifica-se pelo foco desses autores no entendimento da mudança tecnológica. Será a partir da literatura dessa área que será buscada uma compreensão da dinâmica tecnológica da indústria química, como também da incorporação da variável ambiental no processo de inovação em geral. Outra motivação para esta tese reside na percepção de que a literatura existente cobre em separado os temas “Inovação e Indústria Química” e “Inovação e Meio

Ambiente”, restando ainda um espaço pouco explorado na união dessas duas áreas de estudo.

Para o estudo do **caso concreto** dos CFCs, será utilizada como base de informações a cobertura dos periódicos setoriais *Chemical Week* e *Chemical Engineering*. Essa opção justifica-se pelo conjunto único de dados sobre tecnologia, mercado e regulamentação contido nesses periódicos. Com essa base de informações, será possível montar um quadro, ano a ano, da dinâmica da substituição dos CFCs, focalizado nas ações das empresas químicas. Por conta do limite do escopo deste trabalho, tratar-se-á apenas da substituição nos países desenvolvidos, centrada nos entre 1987-1996.

O **cap. 1** caracteriza a indústria química. Será descrita a trajetória de evolução do setor químico, atentando para as mudanças na sua base tecnológica e o aparecimento de problemas ambientais. Também serão discutidos problemas analíticos por se ter uma indústria tão diversa como objeto de estudo.

No **cap. 2**, será feita uma revisão teórica da contribuição dos autores neoschumpeterianos e evolucionistas sobre o tema da inovação tecnológica e meio ambiente. Buscar-se-á a identificação de oportunidades e restrições para a incorporação da variável ambiental no processo de inovação tecnológica. Ainda neste capítulo, essas oportunidades e barreiras serão discutidas para o caso da indústria química, delineando-se linhas de análise e hipóteses de trabalho.

O **cap. 3** trata da substituição dos CFCs. Primeiramente, será feita uma introdução do desenvolvimento dos CFCs e de suas aplicações comerciais, assim como do debate sobre a crise ambiental do ozônio até a assinatura do Protocolo de Montreal. Num segundo momento, será analisada a trajetória de substituição, ano a ano, buscando-se avaliar as alternativas técnicas surgidas, novidades científicas, mudanças na regulação, estratégias da indústria química e o processo de adaptação técnica por parte dos usuários. Em seguida, o processo de substituição dos CFCs será discutido com base nos elementos analíticos vistos nos caps. anteriores.

Por último, é reservado um espaço (**discussão final**) para retomar os principais elementos discutidos na tese, dando ênfase em suas interfaces. Serão apontados também pontos relevantes para futuros estudos.

CAPÍTULO 1

INDÚSTRIA QUÍMICA: EVOLUÇÃO HISTÓRICA E PERFIL SETORIAL

Sendo o objetivo geral desta tese *analisar de que forma a inovação tecnológica na indústria química pode incorporar as questões de ordem ambiental*, é necessário, como um primeiro passo, buscar uma compreensão do que é esse setor industrial, da sua dinâmica de inovação tecnológica e dos seus problemas ambientais. Por conseguinte, este capítulo procura na literatura elementos básicos para caracterizar a indústria química, revisando a evolução histórica do setor e discutindo questões críticas para a sua análise.

Na primeira seção deste capítulo, esboça-se uma introdução histórica à indústria química, em que são apresentadas as principais fases de seu desenvolvimento a partir do séc. XVIII. Em cada uma dessas fases, serão destacados o surgimento de novos produtos e/ou subsetores, as transformações estruturais do setor (p. ex., em termos de matérias-primas, cadeias produtivas), os países líderes, e, por fim, as implicações de ordem ambiental.

Do esboço histórico contido na seção 1.1, espera-se já obter um entendimento básico sobre a indústria química e da sua dinâmica de transformação. Por sua vez, a seção 1.2 procura ampliar e refinar esse entendimento, avaliando problemas metodológicos face à complexidade da indústria química. A seção 1.3 apresenta dados econômicos gerais sobre o setor químico. A seção 1.4 finaliza o capítulo, selecionando e discutindo aspectos qualitativos importantes para o entendimento do setor em seu estágio atual.

1.1 As Principais Fases de Desenvolvimento da Indústria Química

Esta seção tem como objetivo realizar uma introdução histórica à indústria química, analisando as suas principais fases de desenvolvimento. A partir da literatura, foram consideradas quatro fases:

- 1) *A emergência da indústria química inorgânica* (de meados do séc. XVIII até meados do séc XIX);
- 2) *O processo Solvay e os produtos químicos sintéticos orgânicos* (de meados do séc. XIX até início do séc. XX);
- 3) *O desenvolvimento da petroquímica, dos materiais sintéticos e a expansão geral do setor químico* (do início do séc. XX até os anos 60);
- 4) *Perda de dinamismo e reestruturação* (a partir dos anos 70 do séc. XX).

Tal divisão certamente possui uma natureza simplificadora, podendo haver períodos de sobreposição entre esses estágios. De qualquer modo, procurou-se identificar as etapas mais importantes da evolução da indústria química tendo como critérios os seguintes elementos: novos produtos/subsetores, mudanças estruturais do setor (p. ex., em termos de matérias-primas, cadeias produtivas), países líderes, características da inovação tecnológica e implicações sobre a questão ambiental. Ao serem esboçados os estágios do seu desenvolvimento histórico, espera-se obter uma primeira compreensão da natureza dessa indústria e das formas pelas quais ela se transforma.

1.1.1 Primeira Fase: A Emergência da Indústria Química Inorgânica

A partir de meados do séc. XVIII, durante a primeira revolução industrial, a indústria química emergiu centrada na produção de alguns compostos inorgânicos, especialmente o ácido sulfúrico (H_2SO_4), o cloro (Cl_2) e o carbonato de sódio (Na_2CO_3) (Landes, 1969; Quintella, 1993). Landes (1969) ressalta nesse período a forte interdependência entre o desenvolvimento da indústria química e o da indústria têxtil. Este último setor, líder da expansão industrial à época, não podia se basear continuamente na

oferta limitada de insumos naturais para suprir a sua demanda por alvejantes e detergentes. De modo progressivo, a indústria química passou a fornecer à têxtil produtos iguais ou de mesma função aos obtidos por fontes naturais, sendo que melhorias de processo iriam possibilitar um declínio nos preços .

Ainda segundo Landes, esse vínculo intersetorial é um dos grandes fatores explicativos para que a liderança industrial inglesa em relação à Europa Continental também se verificasse no caso do setor químico. Mesmo havendo plantas químicas em países como França, Alemanha e Bélgica e ainda sendo na Europa Continental onde se encontrava um melhor sistema de formação de profissionais químicos, era somente na Inglaterra que existiam a demanda e a escala suficientes para que a indústria química pudesse se estruturar de forma mais completa.

Voltando aos produtos-chave desta primeira fase, deve-se destacar inicialmente o ácido sulfúrico, o qual tem uma funcionalidade variada (ácido, eletrólito, agente de desidratação) e serve de base para a produção de outros compostos. Mudanças de processos introduzidas a partir de 1736, como o *bell process* e o *lead chamber*, permitiram que o preço do ácido sulfúrico na Inglaterra caísse em torno de 85% (Quintella, 1993; Landes, 1969, p. 109).

A partir do ácido sulfúrico e do cloreto de sódio (NaCl), pode-se obter o ácido clorídrico (HCl), e deste último, o cloro. Sendo um eficiente agente de limpeza e alvejante, o cloro possui um poder reativo e corrosivo tão grande que se fazia necessário misturá-lo a outra substância para tornar mais seguros o seu transporte e a sua utilização. Para o uso doméstico destaca-se a criação da água Javel (hipoclorito de potássio, KClO), patenteada em 1796. Já para o uso industrial tem-se a invenção do pó alvejante (*bleaching powder*, primeira patente de 1797), o qual consiste de cloro absorvido em cal extinta (CaOH). Em 1852, a produção de pó alvejante na Grã Bretanha chegava a 13.100 toneladas, com preços cerca de 90% menores em relação à fase inicial de produção. (Landes, 1969, p. 110).

Outra área de produtos que a indústria química iria desenvolver no seu primeiro estágio seria a fabricação álcalis. Denominam-se álcalis compostos como o carbonato de sódio (Na₂CO₃, também conhecido como soda) e o carbonato de potássio (K₂CO₃) que servem como bases químicas e que eram obtidos originalmente de cinzas de plantas. Os

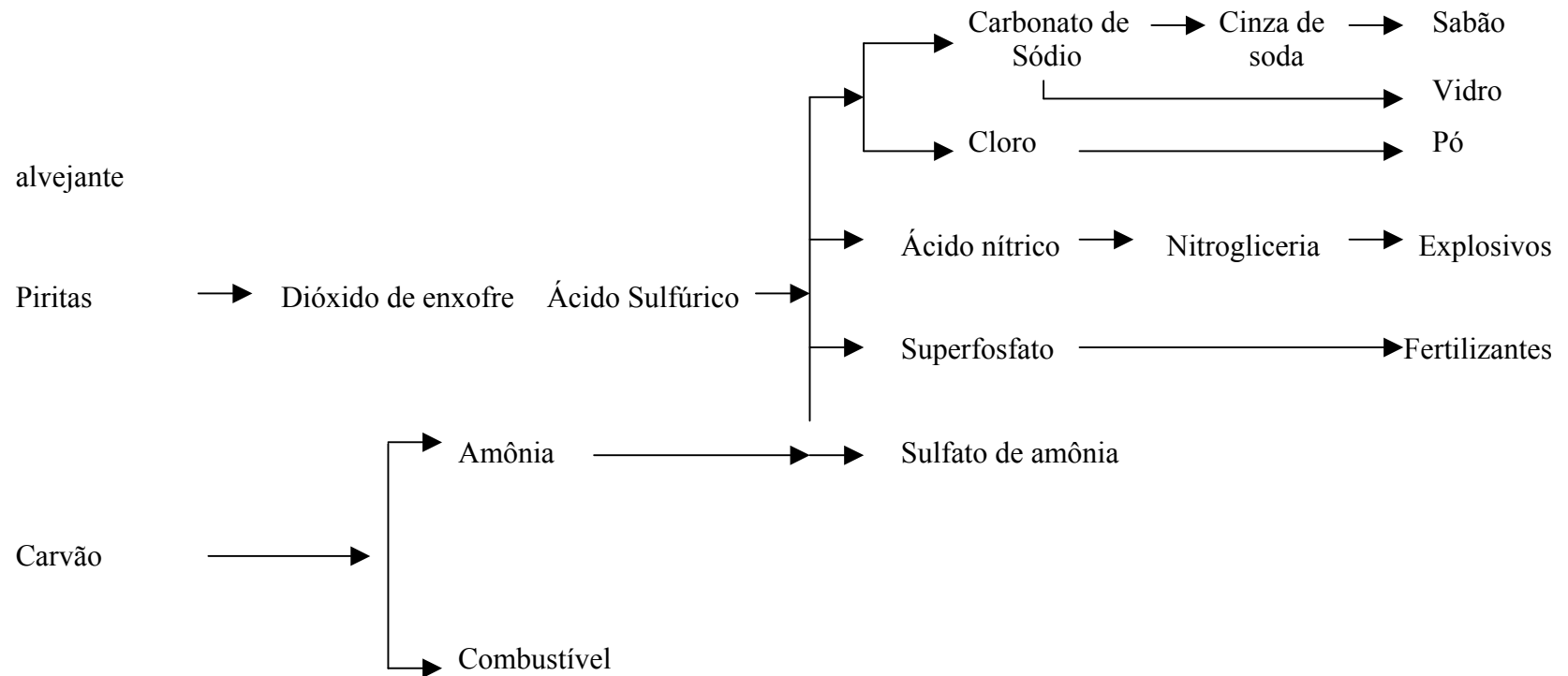
álcalis eram usados de maneiras diversas: como agentes alvejantes, no tratamento de couro, na produção de sabão a partir de gordura animal, e na produção de vidro a partir de areia. Uma alternativa às fontes vegetais de álcalis surgiu graças ao francês N. Leblanc, que criou uma técnica para a produção de soda a partir de cloreto de sódio (patente de 1791).

O processo Leblanc compreendia, na verdade, vários processos químicos integrados, incluindo a produção de ácido sulfúrico. Entretanto, a rota principal consistia na reação de ácido sulfúrico com cloreto de sódio, resultando em sulfato de sódio (Na_2SO_4); reagia-se então este composto em fornalhas com carvão e carbonato de cálcio (CaOH , geralmente em forma de calcário), para enfim se obter o carbonato de sódio (em forma de cinza de soda, *soda ash*). Foi na França que o processo Leblanc estabeleceu-se de início, sendo adotado pela Inglaterra mais tardiamente. Contudo, entre 1820 e 1851, a produção inglesa de cinza de soda cresceu de algumas centenas de toneladas para 140.000 ton/ano, havendo uma queda correspondente de preço em cerca de 86%. Desse modo, a Inglaterra tornou-se a maior exportadora desse produto (Landes, 1969, p. 109).

Em meados do séc. XIX, novos produtos como os superfosfatados (primeiro fertilizante, 1843), a nitrocelulose (1845) e a nitroglicerina (1846) aumentariam o escopo da indústria química inorgânica (Quintella, 1993). A fig. 1.1 esquematiza as cadeias da produção da indústria química que foram citadas aqui. Vale destacar o encadeamento e a interdependência entre as linhas de produção, uma característica que a indústria química irá manter de forma mais complexa em seus períodos posteriores.

Em relação à invenção e inovação tecnológica, a figura-chave do período é a do *inventor-empREENDEDOR* (Freeman, 1982). Geralmente químicos autodidatas (Landes, 1969), homens como N. Leblanc, J. B. Lawes (superfosfatos) e A. Nobel (nitroglicerina) participavam tanto da invenção de novos produtos ou processos quanto da introdução comercial dessas invenções através do estabelecimento de novas firmas.

Fig. 1.1: Principais Cadeias da Indústria Química no Primeiro Estágio



Fonte: adaptado de Quintella (1993, p. 67)

Em geral, eram os próprios inventores–empreendedores que financiavam e conduziam os trabalhos do laboratório — item já então indispensável para a inovação da indústria química, indicando a importância especial do saber científico e da pesquisa experimental para o setor. Contudo, deve-se dizer que, à época o trabalho experimental era realizado em uma escala pequena e em uma aparelhagem barata, sendo calcado muito mais em tentativas e erros dentro do escopo do conhecimento já existente do que no alargamento da fronteira da ciência química (Freeman, 1982, p. 29; Landes, 1969: p. 113-114).

Freeman (1982) destaca ainda a importância que os inventores-empreendedores davam às patentes como forma de proteção intelectual — Nobel detinha 350 patentes ao falecer. Na maioria dos casos, a detenção da patente garantia que a utilização dos novos produtos e processos em outros países acontecesse por acordos de licenciamento ou por empresas filiadas.

Em relação às implicações ambientais relacionadas a esse primeiro estágio da indústria química, destaca-se o grande volume de resíduos de produção gerados. Desses resíduos decorriam os problemas da dispersão de substâncias nocivas a partir das plantas fabris e a necessidade de aterragem de lixo químico. No caso da produção de pó de soda pela técnica Leblanc, havia a emissão de vapores contendo ácido clorídrico¹ e de uma mistura lodosa contendo enxofre, cálcio e carvão não utilizado — duas toneladas dessa mistura eram produzidas para cada tonelada de soda (Landes, 1969, p. 113).²

O problema da emissão de resíduos tem o seu contraponto na questão da melhoria de processos. Quanto mais eficiente for um processo — ou seja, quanto melhor ele utilizar matérias-primas, energia e subprodutos — menos resíduos ele produzirá. Desse modo, há um espaço de concordância entre o estímulo econômico (processo mais rentável, menos custos com matérias-primas, energia e disposição dos resíduos) e melhor performance ambiental. Landes (1969) ressalta que a indústria química inorgânica do séc. XIX tem sua trajetória marcada justamente pelo esforço em usar melhor os materiais no processo

¹ Um dos primeiros atos legais de controle de poluição relaciona-se justamente a esse problema: em 1864, foi lançado o *Alkali Act* na Inglaterra, regulando a emissão de ácido clorídrico (Chenier, 2002)

² A maior produtora química inglesa possuía uma fábrica cuja chaminé para a dispersão de poluentes chegava a medir cerca de 138 m (Landes, 1969, p. 112).

produtivo. Um exemplo importante é a introdução de torres de condensação de ácido hipoclorito ao processo Leblanc em 1836 (Landes, 1969, p. 271). Essa alteração no processo evitava a emissão de vapores ácidos e possibilitaria mais tarde a integração da produção de cloro junto à produção de soda.

A produção de álcalis para a substituição das cinzas de plantas aponta para uma outra ligação relevante entre meio ambiente e indústria química: a capacidade do setor em substituir através de rotas sintéticas produtos anteriormente obtidos por extrativismo natural e cultivo de plantas. Obviamente, os processos químicos necessitam de recursos naturais, no caso dos álcalis, as matérias-primas básicas eram minerais: piritas, sal e carvão. A mudança da via “natural” para a via industrial implica também uma mudança no tipo de impactos ambientais, mudança essa que deve ter seus efeitos positivos e negativos avaliados caso a caso.

Como veremos nas seções posteriores sobre o desenvolvimento da indústria química, o setor passará por transformações qualitativas profundas que o deixarão mais próximo do seu perfil atual. Entretanto, algumas características que marcarão a indústria química podem ser verificadas já nesse primeiro estágio:

- os importantes vínculos intersetoriais (no caso, com a indústria têxtil) e intra-setoriais (p. ex., o encadeamento da produção de ácido sulfúrico, cloro e soda);
- a relevância especial do conhecimento científico e da prática experimental;
- a problemática da emissão de resíduos e do desperdício de materiais —problemática que tem seu contraponto na busca da melhoria dos processos químicos, trazendo potencialmente vantagens econômicas e ambientais.
- A capacidade do setor químico em substituir produtos anteriormente fornecidos por extrativismo natural ou cultivos de plantas.

Além disso, iniciou-se nessa primeira fase a produção industrialmente estruturada de compostos inorgânicos, como o ácido sulfúrico e o cloro, que são ainda hoje produzidos em grande escala e fazem parte da indústria química de base.³

³ Heaton (1994, p. 190) cita o ácido sulfúrico, o cloro e o carbonato de cálcio entre os 12 produtos químicos de maior tonelagem de produção nos EUA em 1991.

1.1.2 Segunda Fase: O Processo Solvay e os Produtos Químicos Sintéticos Orgânicos

A segunda fase de desenvolvimento da indústria química é marcada 1) pela suplantação do processo Leblanc pelo processo Solvay, em uma disputa que revela importantes aspectos sobre a inovação de processos e 2) pela emergência do setor de orgânicos sintéticos sob a liderança da Alemanha, ligada à sistematização e institucionalização da P&D industrial.

Considerando inicialmente o processo Solvay, este constituiu uma solução técnica para que a fabricação de álcalis pudesse ser feita usando amônia (NH_3), apresentando-se como uma alternativa ao processo Leblanc.⁴ A reação básica usada no processo Solvay foi estabelecida por Frestel em 1811: parte-se de soluções concentradas de amônia e cloreto de sódio; tratando-as com ácido carbônico (H_2CO_3), pode-se obter cloreto de amônio (NH_4Cl) e bicarbonato de sódio (NaHCO_3). Este último composto é aquecido, resultando em água, gás carbônico e no produto requerido, soda. Embora estabelecida, essa rota de síntese dependia ainda de ser viabilizada como um processo industrial, incluindo o aumento de escala e o desenho de equipamentos adequados. Uma questão-chave era a necessidade de recuperar a amônia, sem o que o processo seria inviável economicamente.

Por algumas décadas, pesquisadores independentes dedicaram-se à rota da amônia e somente em 1863 ela seria lançada comercialmente pelo belga E. Solvay. Como um exemplo de inventor-empREENDEDOR, Solvay conduziu experimentos, desenhou seu processo — o qual incluía torres de mistura e destiladores de amônia, e estabeleceu uma firma própria para colocar a sua invenção no mercado. Igualmente a outros inventores-empREENDEDORES, Solvay negociava a utilização de seu processo através de acordos de licenciamento, abrindo mais possibilidades para a sua expansão comercial.

Tal expansão do processo Solvay iniciou-se mais propriamente a partir de 1872-73, cerca de uma década após seu lançamento, quando vários aperfeiçoamentos haviam sido feitos à tecnologia-base. Iniciava-se, então, uma disputa dentro do mercado de soda entre os

⁴ Toda a descrição da concorrência entre os processos Leblanc e Solvay nesta seção é baseada em Landes (1969, p. 270-273), Freeman (1982, p. 29-30) e Quintella (1993, p. 68).

processos Leblanc e Solvay. A indústria inglesa, líder na tecnologia Leblanc, adotou uma posição defensiva, procurando aumentar a rentabilidade das suas plantas e abaixar os seus preços. Um grande passo nesse sentido foi o processo Welton, que adicionado às plantas Leblanc permitia que do ácido hipoclorito, um subproduto, pudesse-se obter o cloro. O processo Solvay, por sua vez, encontrava difusão na Europa Continental (especialmente na França e na Alemanha) e nos EUA, onde a indústria química era nascente.

O domínio inglês no mercado de soda foi sustentado até cerca de 1895, quando o processo Leblanc teve a sua mais forte alternativa de lucros atacada pelo surgimento do método eletrolítico para a produção de cloro, empregado principalmente nos Estados Unidos e Alemanha. As ações posteriores na Inglaterra, como a implementação da recuperação do enxofre e acordos de preço, não impediram que suas plantas Leblanc fechassem finalmente em 1920.

A concorrência entre o processo Leblanc e o processo Solvay apresenta alguns aspectos importantes da inovação de processos na indústria química e na indústria em geral, os quais serão discutidos a seguir. Primeiramente, destaca-se o longo tempo de implementação da rota da amônia (estabelecida em 1811) como um processo comercial (1863). Esse hiato exemplifica como que além da experimentação em laboratório e dos conhecimentos básicos sobre uma síntese química, existem ainda outras áreas que demandam conhecimentos e esforços próprios para tornar um processo químico viável. Essas áreas incluem, por exemplo, desenho de equipamentos, controle e “otimização” de processos, busca de fornecimento adequado de matérias-primas, análises de retorno financeiro e organização da mão-de-obra.

Em segundo lugar, vê-se que dentro do escopo de um mesmo processo, várias modificações e inovações menores podem ser feitas ao longo do tempo. A tecnologia Solvay dependeu de cerca de uma década de aperfeiçoamentos (1863-73) para que pudesse efetivamente competir no mercado de álcalis. Já o processo Leblanc, quando ameaçado comercialmente, foi acrescido de inovações que lhe trouxeram mais fôlego no mercado. Desse modo, deve-se ver um processo industrial dentro da sua dinâmica de transformações, da qual depende sua viabilidade e eventual superioridade técnica e comercial (ver Rosenberg, 1982; Nelson e Winter, 1977).

Em terceiro e último lugar, é interessante notar que a vantagem inicial inglesa no mercado de álcalis acabou por traduzir-se em um obstáculo. Ao passo que França, Alemanha e EUA adotaram mais facilmente a nova tecnologia (Solvay), a Inglaterra comprometeu-se com a tecnologia que já dominava (Leblanc) — na qual tinha conhecimento acumulado e capital investido —, impedindo-se de modernizar em maior grau as suas plantas. Ou seja, na concorrência tecnológica, importa muito a trajetória específica de cada empresa ou país. Tal trajetória é um grande fator explicativo para as decisões e eventos posteriores dentro da dinâmica tecno-econômica (Rosenberg, 1982).

Neste segundo estágio de desenvolvimento da indústria química, não seria apenas no mercado de álcalis que o enfraquecimento da posição competitiva inglesa mostrar-se-ia significativo. Essa debilitação seria ainda mais profunda no emergente subsector de orgânicos sintéticos, o qual iria alargar e transformar profundamente a atuação da indústria química.

O setor de orgânicos sintéticos desenvolveu-se inicialmente em torno da pesquisa e produção de corantes artificiais para têxteis. Ou seja, tal como no estágio anterior, há a demanda decisiva da indústria têxtil por produtos que substituam aqueles provenientes de fontes naturais. Entretanto, neste segundo estágio, os produtos substituintes terão uma base orgânica ao invés de inorgânica implicando, entre outras, uma mudança nas fontes de matérias-primas. Neste segundo estágio, o carvão emerge como a matéria-prima central do setor químico.

Entre os fundamentos sobre os quais se constituiu o setor de orgânicos sintéticos destaca-se primeiramente a pesquisa de caráter mais teórico sobre a química orgânica, e em especial sobre a química do benzeno (C_6H_6), substância que pode ser obtida a partir do carvão. A partir de Landes (1969) e Quintella (1983), podem ser citados como passos científicos fundamentais o isolamento do benzeno (Faraday, em 1825), o estabelecimento do isomerismo dos compostos orgânicos (Wöhler, em 1828), a análise e o fracionamento do alcatrão do carvão (Hoffman e equipe, em torno de 1849), e a formulação teórica da estrutura do benzeno (Kekulé, em 1865). Em segundo lugar, foi central para o novo setor o esforço de pesquisa dedicado à síntese de corantes artificiais, estimulado ainda pela demanda da indústria têxtil. Esse esforço tem como marco inicial a síntese do corante de

anilina, *mauve* (malva, por Perkin em 1856), inaugurando um campo inteiro de experimentação (Landes, 1969; Walsh, 1984). Entre os próximos compostos sintetizados estariam a magenta (Natanson e Verguin, em 1859), o marrom de Bismark (Martius, em 1863), a alizarina (Graebe e Liebermann na Alemanha, e Perkin na Inglaterra, em 1869) e o índigo ou anil (Baeyer em 1880).

Em comparação aos produtos inorgânicos então correntes, a exploração das substâncias químicas orgânicas não apenas possibilitava aplicações inéditas, tal como os corantes artificiais, mas ainda dava-se dentro de um modo diferente e profícuo de pesquisar novos produtos químicos. Os produtos orgânicos podem ser “montados” a partir de uma base carbônica simples, como o benzeno ou o etileno, na qual são adicionados grupos químicos funcionais, os quais, por sua vez, vão conferindo propriedades específicas ao composto. Assim, tendo em perspectiva as combinações variadas a partir da base carbônica, dos diversos grupos funcionais e da condução das reações químicas, abria-se um campo vasto para a criação experimental de novas substâncias e para a pesquisa sobre as diferentes rotas de síntese de uma mesma molécula.

Concomitantemente à emergência do novo espaço de experimentação com os produtos orgânicos, a própria organização institucional e posição estratégica da P&D na indústria química passariam por mudanças profundas na segunda metade do séc. XIX (ver Freeman, 1982; Walsh, 1984; Landau, 1994). Embora o papel do empreendedor-inventor continuasse relevante, a emergência do laboratório industrial de P&D surgiu como uma inovação institucional chave para o setor químico. As empresas alemãs como Bayer, Hoechst e BASF foram pioneiras na montagem de estruturas próprias para pesquisa *in-house*, aliando também uma estreita colaboração com as universidades e institutos de pesquisa. Como destaca Freeman (1992), os requisitos para uma P&D competitiva na indústria química estavam saindo do alcance do brilhantismo individual e começando a pressupor um custoso, sistemático e longo esforço de pesquisa coletiva, o qual apenas grandes companhias poderiam manter.

Um exemplo significativo do valor crescente da P&D industrial interna em comparação ao papel dos inventores-empresendores é o caso da disputa entre Perkin e a BASF. Conforme já citada, a primeira síntese de um corante artificial (malva) ocorreu

acidentalmente em 1856 pela mão de Perkin, um inglês então com apenas 19 anos e aluno do eminente químico alemão W. Von Hoffman. Com dinheiro da sua família, Perkin montou uma empresa para explorar a sua invenção, além de continuar a pesquisar e lançar novos corantes. A malva era um corante da classe de anilinas, outros corantes puderam ser desenvolvidos nesta base, entretanto um objetivo importante nesse campo de pesquisa era formular e dominar a síntese de novas classes de corantes. Apesar de representar bem a figura do inventor-empresendedor bem-sucedido, Perkin em 1869 foi vencido pela BASF por um dia na requisição de patentes para os corantes de alizarina.

Já o caso da pesquisa sobre o índigo artificial ilustra bem os novos requerimentos de tempo e investimento para uma inovação exitosa dentro da indústria química (Freeman, 1982). A empresa Bayer foi quem iniciou a pesquisa sobre o índigo artificial na década de setenta, porém sem sucesso. Nesta época, o comércio de índigo natural era monopolizado pelo Reino Unido, que controlava a produção da Índia. Em 1880, professor Baayer da Universidade de Munique conseguiu sintetizar o índigo artificial em laboratório, o que lhe valeu o prêmio Nobel. A partir de patentes relacionadas a essa primeira síntese, BASF e Hoechst tentaram desenvolver o processo de produção do índigo em escala industrial, porém ele se mostrou economicamente desvantajoso tendo em vista o preço do corante natural. O mesmo problema de viabilidade técnica mas não econômica iria se colocar para BASF e Hoechst com mais duas rotas de sínteses do índigo, uma delas do mesmo Baayer, estabelecida em 1882, e a outra de Heumann (em 1890).

Apenas em 1887, a BASF conseguiu estabelecer um processo satisfatório para a produção de índigo. O ponto-chave do processo era a utilização do mercúrio como catalisador de uma das reações intermediárias (oxidação do naftaleno), o que foi sugerido pelo vazamento acidental do fluido de um termômetro em um experimento.⁵ A Hoechst, por sua vez, investiu em uma colaboração com outra empresa alemã, Degussa, chegando a ter até 4 plantas-piloto para testar processos alternativos. Mesmo entrando no mercado após a BASF, a Hoechst desenvolveu um processo bastante rentável, deflagrando, a partir do

⁵ Até esse ponto, a BASF já havia gastado 18 milhões de marcos na pesquisa sobre o índigo, equivalente a todo seu capital social (Dutly, 2003).

início do séc. XX, uma competição agressiva de preços com a BASF e com as importações de índigo natural.⁶

A estruturação do laboratório interno de P&D integra uma série de outras ações inovadoras relacionadas à organização industrial que iriam conferir vantagens competitivas às empresas químicas alemãs e aproximá-las do perfil da grande corporação contemporânea (ver Murmann e Landau, 1998; Chandler Jr. *et al.*, 1998). Entre essas mudanças estão, primeiramente, a identificação e exploração intensiva das economias de escala e escopo. Aproveitando similaridades na pesquisa e na manufatura dos orgânicos sintéticos, as empresas alemãs ofereciam um vasto catálogo de corantes, como também diversificavam a sua linha de produtos: a Hoechst começou a produzir o seu primeiro fármaco em 1883, denominado *antipyrin*, já a Bayer começou com o *phencetin* em 1888, chegando à aspirina já em 1899. Além disso, essas empresas passaram a integrar a produção de químicos mais básicos, como ácido sulfúrico e nítrico, e eventualmente a possuir minas de carvão.

Uma outra ação importante tomada pelas firmas alemãs foi a criação de estruturas de *marketing*. Devem ser citados como exemplos importantes a montagem de equipes de vendas voltadas para os principais países importadores e o oferecimento de assistência técnica. Por fim, as empresas químicas alemãs destacaram-se também por criar um corpo de gerência profissional, geralmente possuidor de *expertise* técnica-científica.

Apesar de existirem grandes vantagens comparativas na Inglaterra, como grandes reservas de carvão e uma forte indústria têxtil local (Landau, 1994), as empresas químicas inglesas não acompanharam as suas competidoras alemãs, as quais imprimiram um ritmo mais exigente e inovador no setor químico, mudando paradigmas de organização industrial e de P&D. Em 1880, a Alemanha, num contexto de políticas nacionalistas que seguiram a unificação do país, já era responsável por um terço da produção mundial de corantes, e em 1900, detinha 80% do mercado (Freeman, 1982). Outro país de destaque nesse período é a Suíça (Landes, 1969; Freeman, 1982). Importando da Alemanha os químicos básicos e intermediários, empresas suíças como CIBA, Geyge e Sandoz optaram por se concentrar

⁶ Entre 1895 e 1913, as exportações indianas do produto caíram de 187 mil toneladas para 11 mil toneladas, enquanto que o seu preço caiu 41% (Freeman, 1982).

em produtos mais finos, que exigiam mais *expertise*. Em 1900, a Suíça exportava 90% da sua produção.

Considerando os aspectos ambientais, a novidade neste período diz respeito justamente ao advento dos produtos orgânicos sintéticos. Pela primeira vez na história, começou-se a criar e experimentar sistematicamente substâncias químicas orgânicas. Alguns sintéticos são apenas cópias de substâncias naturais, mantendo-se aqui a tendência de substituir as fontes naturais (extrativismos, cultivo) pela produção industrial. Muitos sintéticos, porém, são compostos totalmente novos no ambiente. Além dos corantes fabricados em escala industrial, já se iniciavam nesse período os experimentos com materiais artificiais, ilustrando a capacidade de manipulação e inovação que se desenvolveria plenamente no século XX.

Também seria somente mais tarde que os problemas ambientais relacionados aos produtos sintéticos chamariam maior atenção: tempo de vida no meio ambiente, cumulatividade, efeitos à saúde dos seres vivos, incluindo possíveis efeitos cancerígenos e teratogênicos (anomalias de gestação). Algumas substâncias químicas causam envenenamentos agudos, de curto prazo, porém alguns problemas toxicológicos podem se dar a longo termo, causados por exposição crônica até a pequenas concentrações de certas substâncias. Mesmo sendo esses problemas que se levantariam de fato posteriormente, já é a partir da segunda metade do séc. XIX que a indústria química adquire uma ampla capacidade de manipulação em relação à matéria, com consequências incertas.

O aumento de escopo advindo com a química sintética orgânica, por outro lado, possibilitou que o setor químico pudesse lidar melhor com materiais outrora sem valor, incluindo resíduos de produção. Ao tratar da economia no emprego do capital, Marx cita o emprego de resíduos e destaca a indústria química:

"O exemplo mais contundente de utilização de resíduos é oferecido pela indústria química. Ela não só utiliza os seus próprios resíduos, ao descobrir nova aplicação para eles, mas também os das mais diversas indústrias, transformando, por exemplo, o gás de alcatrão, anteriormente quase inútil, em corantes de anilina, rubiacina (alizarina) e recentemente também em medicamentos".

(Marx, O Capital, V. 3, T.1, 1992 [1890], p. 79)

Fazendo um comentário geral sobre esta segunda fase da indústria química, deve-se destacar novamente o surgimento do laboratório de P&D *in-house*, uma inovação-chave de caráter institucional e que será um elemento definidor da dinâmica histórica do setor.⁷ Junto com a P&D interna, surgia não só todo o subsetor de corantes naturais, mas também se inaugurava uma capacidade inédita para criar novos produtos e novas áreas na indústria química. Houve, dessa forma, um radical aumento de escopo para além dos produtos inorgânicos que dominaram o setor químico no período anterior. Firms como BASF, Hoechst e Bayer, que implementaram pioneiramente o laboratório *in-house* de P&D, tomaram das empresas inglesas a liderança no setor químico e imprimiram nele níveis mais severos de competitividade e novas formas de organização industrial. Começava a surgir a figura das grandes corporações químicas, capazes de manter estrategicamente grandes investimentos de longo prazo em pesquisa. Por fim, a capacidade de inovação em substâncias químicas iniciaria a problemática da interação dos materiais sintéticos com o meio ambiente e os seres vivos.

1.1.3 Terceira Fase: O Desenvolvimento da Petroquímica, dos Materiais Sintéticos e a Expansão Geral do Setor Químico

Da primeira década até meados do séc. XX, passando pelas duas guerras mundiais, a indústria química experimentará uma expansão sem precedentes em termos de escala e escopo. Entre os fundamentos dessa expansão estão, primeiro, a formação da indústria petroquímica, que iria transformar o perfil geral do setor químico e, em segundo lugar, a exploração das oportunidades de inovação ligadas aos materiais sintéticos. Em ambos os casos, os Estados Unidos da América surgiriam como um poderoso competidor comercial e, ao lado da Alemanha, como um dos principais introdutores de inovações.

1.1.3.1 A Formação da Indústria Petroquímica

⁷ No final do séc XIX, apenas na indústria elétrica haveria tal importância para a P&D interna (Noble (1982)).

A indústria petroquímica formou-se com base em inovações no setor químico e no setor petrolífero, os quais freqüentemente apresentavam interfaces técnicas e comerciais. No ano de 1913, foram lançados comercialmente um processo químico (Habber-Bosch, Alemanha) e um processo de craqueamento de petróleo (Burton, EUA) que constituiriam dois passos fundamentais em direção à indústria petroquímica. Cada um deles será tratado a seguir.⁸

Desenvolvido pela BASF, o processo Habber-Bosch para a produção de amônia (NH_3) é citado como “o primeiro processo químico moderno”, tendo representado um salto de engenharia ao operar em condições de alta temperatura (600°C) e alta pressão (200 atm). A amônia é um composto químico essencial, usado, entre outras aplicações, na produção de fertilizantes nitrogenados e de explosivos. F. Haber, trabalhando na universidade técnica de Karlsruhe, foi o responsável por estabelecer pioneiramente a síntese catalítica da amônia, reagindo nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2) a alta temperatura e pressão. Por esse trabalho, Haber recebeu o prêmio Nobel em 1918. A BASF que, já antes de 1900, pesquisava a produção sintética de fertilizantes, fez um acordo com Haber e passou a desenvolver o processo internamente sob o comando de C. Bosch. Os problemas críticos diziam respeito à melhoria e barateamento da catálise e à viabilização técnica dos extremos parâmetros de temperatura e pressão, incluindo nesta questão o *design* e a construção de válvulas, compressores e vasos adequados.

Entre as implicações do lançamento do processo Haber-Bosch em 1913, destacam-se aqui duas. Primeiramente, a indústria química alemã obtinha, mais uma vez, uma forma de produção internalizada de um composto cuja fonte principal eram as importações do produto natural.⁹ Ter uma fonte sintética de amônia foi crucial para a Alemanha poder resistir aos bloqueios comerciais durante a primeira guerra mundial e assegurar a produção nacional de alimentos e de explosivos. Em segundo lugar, a *expertise* envolvida na elaboração do processo Haber-Bosch dava base para o desenvolvimento de outros processos catalíticos de hidrogenação à alta pressão, alguns deles úteis à indústria de

⁸ Toda a discussão sobre o processo Haber-Bosch e sobre o início da petroquímica baseia-se em Freeman (1982) e Quintella (1993)

⁹ A BASF chegou a montar estações agrícolas experimentais para desenvolver a aplicação de seu fertilizante sintético.

petróleo. Citam-se, por exemplo, os processos de produção do metanol e o de produção de petróleo a partir do lignito (*brown coal*, tipo de carvão de baixa qualidade).

No mesmo ano de 1913, era lançado o processo Burton, inaugurando comercialmente o craqueamento industrial de petróleo. Sendo o petróleo composto por uma mistura complexa de hidrocarbonetos, uma questão-chave para o seu aproveitamento comercial é ajustar as frações obtidas do produto — tais como gasolina, querosene, óleo lubrificante e óleo combustível — à proporção efetivamente requerida pelo mercado. Desde 1855, sabia-se que era possível quebrar (“craquear”) moléculas grandes do petróleo em moléculas menores. Na virada do séc. XIX para o XX, o crescimento da indústria automobilística e a maior disponibilidade da eletricidade para a iluminação alteraram drasticamente o tipo de demanda para frações de petróleo, requerendo uma maior quantidade de gasolina, uma menor de querosene e uma porção também menor das frações mais pesadas. Dessa forma, desenvolver um processo comercial de craqueamento que favorecesse especialmente a fração da gasolina tornou-se uma prioridade para a indústria de petróleo.

A partir de 1909, W. Burton, Ph.D em química, foi recrutado pela Standard Oil para chefiar um laboratório, localizado na refinaria subsidiária de Indiana, dedicado totalmente ao craqueamento. Burton, que logo iria se tornar superintendente da refinaria, baseava a sua pesquisa numa técnica em que o petróleo é tratado a alta temperatura e pressão, tendo, portanto, que resolver vários problemas ligados à segurança e ao risco do processo.¹⁰ O receio de possíveis explosões e acidentes era tão grande que a Standard Oil optou por postergar a construção da primeira planta comercial.

Somente com o desmembramento forçado da companhia-mãe pela lei antitruste norte-americana, foi que a empresa recém-independente em Indiana resolveu lançar o processo Burton de craqueamento térmico do petróleo comercialmente em 1913. Vários aperfeiçoamentos foram sendo adicionados ao processo e a companhia de Indiana foi recompensada com enormes lucros advindos da produção e de contratos de licenciamento em que tinha grande porcentagem nos *royalties*.

Não é surpreendente que, na esteira do sucesso do processo Burton, outras empresas tentassem desenvolver os seus próprios processos de craqueamento. Entre os vários que surgiram, devem-se destacar pela sua importância o processo Dubbs e o processo “Tube and Tank” (tubo e tanque), os quais serão tratados brevemente a seguir.

O processo Dubbs tem como primeira singularidade o fato de que o seu desenvolvimento esteve ligado à criação de uma empresa especializada em processos de petróleo, a Universal Oil Products Company. A UOP terá papel fundamental na história subsequente do setor petrolífero e sua criação antecipa uma tendência de especialização no desenvolvimento de processos que aparecerá igualmente na indústria química. Uma segunda característica importante no caso Dubbs é de se tratar de um processo contínuo, o que lhe trouxe vantagens competitivas em relação aos processos em batelada como o Burton.¹¹ Essas vantagens dizem respeito principalmente a economias de escala. Muito mais do que nos processos em batelada, a capacidade de um processo contínuo pode ser aumentada com decréscimos significativos em custos relativos de trabalho, capital, controle e logística.

Para desenvolver o seu processo, C.B. Dubbs e seus colaboradores tiveram como uma “solução técnica-chave” o *design* de um reciclo do resíduo de petróleo pesado para a corrente de petróleo em craqueamento. Uma planta-piloto foi montada em 1918 e licenciada para a Shell em 1919. Problemas técnicos, incluindo uma explosão, determinaram a necessidade de revisões de *design* até que a Shell lançasse uma planta comercial em 1923. Como é comum nas inovações de processos, várias melhorias foram acrescentadas ao projeto inicial. No exemplo do processo Dubbs, há o desenvolvimento de uma bomba apropriada para operar a corrente de reciclo em alta temperatura e pressão.

Aperfeiçoamentos posteriores foram essenciais também para o processo “*Tube and Tank*”. Este processo foi fruto da estratégia da Standard Oil de New Jersey em montar um forte laboratório de P&D interna. Desenvolvido de forma sobretudo coletiva, o processo *Tube and Tank* foi colocado em operação comercial em 1921. Suas vantagens em relação

¹⁰ Para se ter idéia da superioridade da indústria alemã, a equipe de Burton estava com dificuldades para operar a uma pressão de 5 atm, enquanto que, na mesma época, o processo Haber-Bosch estava sendo desenvolvido para trabalhar a 200 atm.

ao processo Burton justamente só viriam a aparecer mais tarde com melhorias técnicas sucessivas, tais como o desenvolvimento apropriado de sistemas de bombeamento e troca de calor. Tais tipos de aperfeiçoamentos possibilitaram o processamento de maiores variedades de óleo cru e um alto nível desempenho.

Após o surgimento do processo Burton em 1913 e de outros processos alternativos de craqueamento térmico (como o Dubbs e “*Tube and Tank*”) na década de 20, as inovações na área de processamento de petróleo nos anos 30 estavam se voltando para o uso da catálise. O primeiro processo comercial de craqueamento catalítico foi obra do trabalho e do investimento de um rico engenheiro francês, E. Houdry, em associação com duas companhias americanas a Soconoy Vacuum Oil Company e a Sun Oil. Nos processos catalíticos, um dos principais problemas técnicos refere-se à regeneração do catalisador. No desenvolvimento do processo Houdry, um novo turbo-compressor de desenho suíço possibilitou a reciclagem do catalisador de forma a dar viabilidade tecno-econômica a todo o processo.

Quando o processo Houdry foi comercialmente lançado em 1936-37 pela Sun e pela Socony, mostrando ser capaz de produzir com melhor performance e com melhor qualidade do que os processos de craqueamento térmico, o *status quo* do mercado de petróleo foi fortemente ameaçado. Ao invés de licenciar o processo Houdry a alto custo, várias empresas grandes do setor de petróleo já estabelecidas preferiram buscar tecnologias alternativas. Quem se destacaria nessa busca seria a Standard Oil de Nova Jérsei (NJ), a qual havia adquirido patentes e conhecimento sobre processos catalíticos de hidrogenação a alta pressão e temperatura da IG Farben (junção da BASF, Bayer, Hoechst e outras empresas químicas alemãs).¹² Tendo já construído duas plantas de produção de metanol a partir de lignito em 1930-31, a Standard de NJ esperava basear-se na tecnologia alemã para desenvolver um processo de craqueamento catalítico totalmente contínuo e capaz de lidar

¹¹ Processos em batelada, em contraste aos processos contínuos, operam em ciclos, em que cada “corrida” precisa ser finalizada para que tenha início a seguinte.

¹² As firmas alemãs foram inspecionadas em 1919 com a finalidade, entre outras, de adquirir o conhecimento técnico por trás do processo Haber-Bosch. A vantagem técnica alemã era tão grande que produtores ingleses, franceses e americanos levaram até sete anos para imitar o processo. Mesmo com parte do conhecimento desvelado, a Standard de NJ fez um acordo com a IG Farben a um custo de US\$ 35 milhões em 1929. Outro indício da liderança alemã é o fato de que, nos 30, a Standard de NJ tinha que importar equipamentos da Alemanha, já que nos EUA não se fabricava peças de processos para aquelas condições de pressão.

com petróleo de várias graduações. Isso permitiria suplantiar o processo Houdry, o qual era semicontínuo e que se limitava às graduações mais altas do petróleo.

A Standard de N. J. foi a empresa mais importante na associação de pesquisa colaborativa, “Catalytic Research Associates”, formada em 1938 por firmas que buscavam uma alternativa ao processo Houdry. Além da Standard de N. J., o grupo era formado pela Standard Oil de Indiana, IG Farben (depois debandante), Kellogg (firma de desenvolvimento de processos), Shell, Texaco e UOP. Esse foi um esforço colaborativo sem precedentes, envolvendo cerca de mil profissionais e 30 milhões de dólares na sua execução (de 1938 a 1942). Demonstrando outra vez as interfaces entre os processos na indústria química e na indústria de petróleo, o departamento de engenharia química do MIT colaborou para desenvolver uma solução técnica essencial: um leito de partículas de catálise lançado na corrente principal por vapores de óleo. O processo catalítico fluido de craqueamento finalmente desenhado e posto em operação provou-se bem-sucedido, revertendo logo o seu investimento e dominando a maior parte do mercado.

Com a evolução dos processos de craqueamento, o petróleo começava a se tornar uma fonte de matéria-prima economicamente viável para a indústria química em substituição ao carvão. Tal fato era verdade principalmente nos EUA, em que a oferta do petróleo era maior e onde havia o impulso da crescente indústria automobilística. Assim como no caso do carvão, certas frações do petróleo poderiam fornecer hidrocarbonetos básicos que, por sua vez, seriam sucessivamente elaborados por segmentos da indústria química em direção a produtos mais elaborados.

O primeiro processo petroquímico foi lançado comercialmente em 1919 pela Standard de NJ, baseado no trabalho de um químico americano chamado C. Ellis. Esse processo produzia álcool isopropil a partir de gases residuais de refinaria. O desenvolvimento básico da petroquímica, contudo, deve-se mais ao trabalho liderado por G. Curme no Instituto Mellow de Pittsburg com o apoio de Carbide and Carbons Chemical Corporation (futuramente Union Carbide). As pesquisas sobre petroquímica no Instituto Mellow centravam-se no desenvolvimento de produtos químicos tendo o etileno (C_2H_4) como matéria-prima básica. Nesse sentido foi fundamental a contribuição da Linde Air Company que encontrou um modo de obter etileno a partir do craqueamento de misturas de

etano (C_2H_6) e propano (C_3H_8). O primeiro desses produtos derivados do etileno foi o 2-cloroetanol — precursor, entre outros, do gás mostarda — seguido do etileno glicol, cloroetano e dicloroetano.

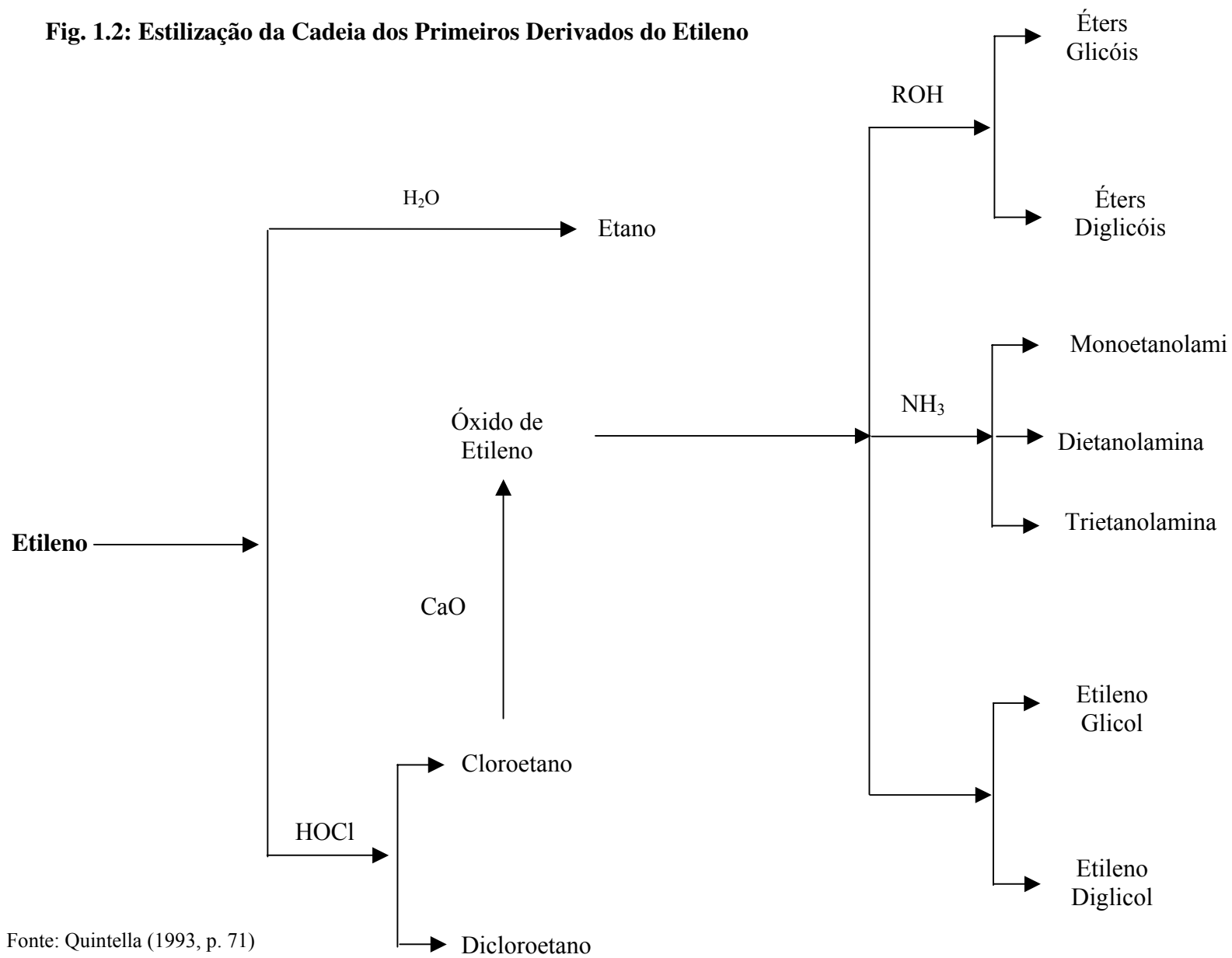
Já a partir de 1919, Carbide lançava plantas comerciais baseadas nos processos desenvolvidos junto ao Instituto Mellow. Em 1925, a empresa começou a operar o primeiro complexo petroquímico do mundo, produzindo cinco derivados do etileno. O complexo aproveitava-se do potencial de integração produtiva que será uma característica importante da indústria petroquímica (a fig. 1.2 esquematiza as cadeias básicas a partir do etileno). Outra característica dessa indústria nascente seria utilizar o etileno processado a partir do nafta (parte da fração leve do petróleo) como principal matéria-prima. Em 1939, Carbide já era capaz de fabricar 41 desses derivados.

Com seu desenvolvimento progressivo, a indústria petroquímica não seria apenas mais um subsetor adicionado à indústria química, mas transformaria perfil desta, além de ter um papel fundamental na sua expansão geral a partir dos anos 50. Este tema será retomado após se tratar dos materiais sintéticos.

1.1.3.2 O Desenvolvimento dos Materiais Sintéticos

Se o desenvolvimento da petroquímica baseava-se principalmente em inovações de processo, as inovações de produto neste terceiro estágio da indústria química têm como campo mais proeminente os materiais sintéticos. Produtos como PVC (policloreto de vinila), polietileno, *nylon* e poliéster foram resultados de um grande esforço de desenvolvimento por parte da indústria química a partir do início do séc XX.

Fig. 1.2: Estilização da Cadeia dos Primeiros Derivados do Etileno



Fonte: Quintella (1993, p. 71)

Mais propriamente, a primeira onda de materiais sintéticos surgiu ainda no séc. XIX. Podem ser citados como exemplos iniciais a “parkesina”, a celulóide, o viscose, o raion e a galalite.¹³ Todos esses materiais eram baseados no tratamento de uma proteína natural, a celulose. Nesses primeiros desenvolvimentos, ainda era crucial a figura do empreendedor-inventor como A. Parker (Inglaterra), C. Chaurdonnet (França), e A. Spitteler (Alemanha). Várias das questões críticas relativas aos materiais artificiais já se colocavam: inflamabilidade, resistência, plasticidade e, no caso de fibras, técnicas de fiamento. No caso de pioneiros como Parkes (“parquesina”) e Chaurdonnet (rayon de nitrocelulose), as dificuldades em resolver satisfatoriamente essas questões técnicas terminaram por colocá-los fora do mercado em favorecimento de produtores com materiais aperfeiçoados.

Em 1910, era introduzido comercialmente o primeiro produto sintético não baseado em um material natural, a bakelita, uma resina de fenol-formaldeído. Novamente, estava por trás dessa inovação um inventor-empresendedor: L. Baekeland, um químico belga radicado nos EUA. Baekeland foi um empresário bem-sucedido, explorando a grande demanda por seu produto, que estava relacionada diretamente à sua versatilidade. Nos anos posteriores, o desenvolvimento dos materiais sintéticos ganharia novos rumos devido aos avanços na ciência e na fabricação dos polímeros, e também pela liderança que assumiriam as grandes corporações químicas (principalmente IG Farben, Du Pont e ICI).

Da mesma forma que o desenvolvimento dos corantes naturais dependeu do conhecimento científico sobre a química do carbono alcançado no séc. XIX, o desenvolvimento dos materiais poliméricos também se baseou nos trabalhos científicos sobre a química das macro-moléculas. Na área acadêmica, destaca-se a contribuição fundamental do alemão H. Staudinger, que receberia por isso um prêmio Nobel em 1953. No âmbito da P&D industrial, veio o trabalho do químico americano W. Carothers a serviço da Du Pont. Staudinger e Carothers estão entre os maiores responsáveis pelos fundamentos da ciência dos polímeros, moléculas com extensão e peso muito maiores que

¹³ Esta discussão sobre o desenvolvimento dos materiais sintéticos basear-se-á em Walsh (1984), Freeman (1982) e Quintella (1993).

as moléculas químicas comuns e que são formadas pelo encadeamento de várias unidades moleculares simples, os monômeros.

Além do entendimento da estrutura dessas macromoléculas, a pesquisa nessa área procurava obter controle sobre os processos de polimerização. A forma com que a polimerização é arranjada e conduzida tem influência determinante nas propriedades finais do polímero, tais como resistência e estabilidade. A capacidade de criação, modificação e mistura de materiais criava um grande potencial de aplicações finais para os materiais poliméricos.

Mesmo havendo trabalhos independentes na academia e em pequenas e médias empresas, a inovação na área dos polímeros foi um empreendimento realizado principalmente pelas megaempresas da área química. Essas empresas eram as únicas em condições de sustentar as várias pontas de pesquisa e trabalho experimental necessárias para tornar os polímeros um produto técnico e economicamente satisfatório. O PVC, por exemplo, havia já sido obtido em laboratório em 1835, mas surgiu como um polímero comercial somente após os esforços competitivos de Hoechst/IG Farben, Du Pont, Union Carbide e ICI durante as primeiras três décadas do séc. XX. Outro exemplo é o da fibra de poliéster *terylene*, inventada por uma empresa têxtil de porte médio em 1940. Apenas com o licenciamento da fibra para a Du Pont e a ICI, as quais investiram cerca de US\$ 20 milhões em seu desenvolvimento, foi possível lançá-la no mercado em 1950.

Entre as grandes empresas químicas investindo em materiais sintéticos neste período, vale destacar primeiramente a IG Farben. Ainda no séc XIX, as empresas químicas alemãs notabilizaram-se pelo investimento próprio em P&D. Resultado da fusão de várias dessas empresas, a IG Farben manteve essa característica dedicando, no período de 1925 a 1939, cerca de 7% do faturamento à P&D, enquanto a cifra comum dos concorrentes estava em torno de 3 a 5%. Essa estratégia de investimento ajuda explicar a liderança da IG Farben em dados relativos ao desempenho em materiais sintéticos: a empresa alemã era responsável por 20% das patentes dos plásticos (entre 1931-45) e por 36% das inovações em sintéticos em geral (entre 1925-45).¹⁴ Entre os materiais introduzidos pela IG Farben,

¹⁴ Os dados sobre investimento em P&D, patentes e introdução de inovações estão organizados e mais apropriadamente discutidos em Freeman (1992, p. 52-62).

podem ser citados: acetado de polivinil (PVA, 1928), poliestireno (1930), PVC (1931), borracha sintética (buna-S e buna-N, 1937) e *nylon 6* (1939).

Considerando outras empresas químicas na Europa, destacavam-se ainda a britânica ICI, responsável pelo polietileno e pelo metil-metacrilato, e a suíça CIBA, que teve sucesso com as resinas epoxi. Já nos EUA, a Du Pont despontava como uma competidora poderosa na área de materiais sintéticos com a introdução comercial do neopreno (1931) e do *nylon 6/6* (1939). Esses dois materiais surgiram a partir do trabalho da equipe W. Carothers, dentro de um programa de pesquisa fundamental estabelecido pela Du Pont em 1928. O *nylon* especificamente foi obtido em 1931, mas não recebeu uma atenção significativa até 1934, quando, por uma decisão corporativa, Carothers e sua equipe deram prioridade ao desenvolvimento de fibras artificiais.¹⁵ O *nylon* passou a responder na época à metade dos lucros obtidos pela Du Pont.

Incorporada por gigantes da área química, a exploração comercial dos materiais sintéticos seria um dos principais propulsores do crescimento que o setor químico conheceria após a segunda guerra mundial, assunto tratado na subseção seguinte. A massiva introdução comercial desses materiais não representou apenas mais um passo em direção a substituição de produtos naturais por equivalentes artificiais, mas também representava a capacidade da criação de materiais com características significativamente novas e diferentes dos produtos então disponíveis. Devido à ampla versatilidade de uso e de modificação dos materiais sintéticos, foram ampliados e reforçados os vínculos do setor químico com outros setores industriais, tais como o têxtil e o automobilística.

1.1.3.3 A Expansão da Indústria Química e as Implicações Ambientais de sua Terceira Fase

Entre 1949 e 1969, a produção mundial de materiais plásticos poliméricos aumentou 30 vezes (Quintella, 1993). Beneficiando-se certamente da era de ouro econômica do pós-guerra (Hobsbawn, 1995), a indústria química chegava a crescer em taxas anuais 2,5 a 3

¹⁵ Sobre a evolução das estratégias de P&D da Du Pont, ver especialmente Hounshell (1992).

vezes maiores que as do PIB nos países centrais (Cook e Sharp, 1991; Landau e Rosenberg, 1992). Junto a essa expansão em termos quantitativos, estava uma mudança qualitativa profunda no perfil do setor químico ligada aos processos contínuos.

Como foi visto anteriormente, os EUA lideraram o desenvolvimento de processos de refino de petróleo e de processos petroquímicos, criando uma alternativa ao carvão como matéria-prima no setor químico, assim como favorecendo os processos contínuos em detrimento dos processos em batelada. No pós-guerra, as possibilidades de economias de escala dos processos químicos foram então intensivamente usadas, sendo criadas plantas com grande capacidade instalada e intensivas em capital, desenhadas para suprir a crescente demanda por produtos químicos básicos (Cook e Sharp, 1991; Landau e Rosenberg, 1992). A capacidade de integração da produção de petróleo, petroquímicos e químicos intermediários favorecia a construção de grandes complexos multiproduto.

Nesse contexto, crescia a importância das inovações, *design* e gerenciamento de processos químicos. Firmas especializadas de engenharias ganhavam importância, acumulando *expertise* própria em processos e disponibilizando tecnologia para novos entrantes no mercado. (Landau e Rosenberg, 1992; Freeman, 1992; Quintella, 1993).

Como destacam Landau e Rosenberg (1992), os EUA possuíam várias vantagens competitivas que lhes permitiram finalmente contestar a liderança europeia na indústria química. Não apenas os americanos não sofreram os impactos físicos e econômicos da guerra como os europeus, mas ainda: a) possuíam grandes reservas naturais de petróleo e conhecimento tecnológico sobre o seu refino, b) foram pioneiros na institucionalização disciplinar da engenharia química, a qual se voltava mais para os problemas específicos do setor químico, especialmente processos, c) possuíam um grande mercado interno em expansão e a sua produção industrial como um todo se voltava para o aumento de escala e massificação — o crescimento da sua indústria automobilística é um importante exemplo.

Essas vantagens permitiram à indústria química americana beneficiar-se pioneiramente da produção em larga escala baseada na petroquímica. Na Europa, o processo de transição do carvão para o petróleo foi mais lento, exemplificando mais um caso da existência de uma inércia tecnológica ligada a um modelo outrora bem-sucedido. Contudo, com a recuperação econômica europeia no pós-guerra, a petroquímica começa

gradualmente a dominar também o perfil da indústria química européia, a qual retomava o seu poder competitivo (Quintella, 1993; Landau e Rosenberg, 1992).

No pós-guerra, o mercado de produtos químicos conheceu também competidores internacionais fora do eixo EUA-Europa. Para isso contribuíram a emergência das empresas de engenharia especializadas e a maturidade tecnológica e codificação alcançada em processos petroquímicos mais básicos. Neste quadro, destaca-se o Japão, o qual logrou constituir uma indústria petroquímica básica em uma estratégia de industrialização nacional em torno de conglomerados empresariais (Hikino *et al.*, 1998). Como será visto na seção, a crescente internacionalização da indústria química ajudaria a causar crises de sobrecapacidade de produção.

A grande transformação da indústria química em escopo e escala nesta terceira fase não poderia deixar de trazer implicações correspondentes no campo ambiental. A capacidade de criar e manipular novos produtos que veio primeiramente com os corantes artificiais no séc. XIX adquire aqui alcance e impacto vastos com os materiais artificiais. A explosão da produção no pós-guerra acarretava uma presença sem antecedentes dos materiais sintéticos no meio ambiente.¹⁶ Além da quantidade, o número de tipos de químicos sintéticos cresceu significativamente, aumentando a incerteza sobre os efeitos desses produtos no homem e ambiente em geral. O exemplo do PVC e do polietileno é significativo em suas implicações: as mesmas propriedades que fazem esses polímeros serem um produto atrativo — não solubilidade, resistência à corrosão e ataques biológicos — são responsáveis pelos problemas de disposição final, fazendo com que esse tipo de material acumule-se no meio. Um exemplo crítico de acumulação progressiva, dessa vez em tecidos orgânicos, refere-se ao DDT (dicloro difenil) e a outros agroquímicos. Este foi o tema de um livro importante na história do ambientalismo, *Silent Springs* de R. Charson, o qual foi lançado em 1962 com grande impacto na opinião pública norte-americana (McCormick, 1992).

No decorrer do século XX, a indústria química havia acumulado conhecimento sobre os efeitos toxicológicos de substâncias devido a questões relativas à saúde

¹⁶ Entre 1950 e 1969, o consumo de plásticos nos EUA saltou de 6,4 para 34,7 quilogramas *per capita*, um aumento de cerca de 442% (Reuben e Burstall, 1973 *apud* Quintella, 1993, p. 76).

ocupacional. Em 1915 na Alemanha, devido a essa preocupação, houve uma reorganização nas plantas químicas de corantes através do uso de processos “fechados” e de rígidos padrões de higiene. Confrontadas por problemas ocupacionais como tumores de bexiga e contaminação por chumbo e benzeno, empresas como Du Pont, Union Carbide e Dow inauguraram os seus próprios laboratórios de toxicologia por volta de 1935. Um dos principais desafios era encontrar métodos para avaliar *a priori* os efeitos de curto e longo prazo de produtos e intermediários químicos, efeitos que via de regra eram descobertos apenas depois do aparecimento de vítimas humanas. Como mostra o caso da Du Pont, houve avanços metodológicos importantes, porém, geralmente, o laboratório de toxicologia era subutilizado e até hostilizado pelos outros setores da empresa, possuindo um papel muito limitado na decisão de construção de novas plantas e de comercialização de novos produtos. Apenas com o posterior aumento de regulamentações governamentais, é que esse tipo de laboratório adquiriria uma função central, garantindo a adequação normativa de novos produtos e evitando conflitos legais futuros (Hounshell e Smith Jr., 1998).

Outra característica desse período — a construção de plantas de grande escala e de complexos fabris operando processos a alta temperatura e pressão — levantavam preocupações sobre risco e segurança, tendo em vista a amplitude das conseqüências de eventuais acidentes. O aumento da escala de plantas e o crescimento da produção também se refletiam num aumento massivo dos efluentes de processos gerados.

Ao final dos sessenta, a questão ambiental começaria a obter uma visibilidade inédita nos EUA e Europa (McCormick, 1992), lançando à indústria em geral uma onda de contestação social e regulamentações governamentais. Essa insurgência pode ser vista como uma reação aos efeitos do crescimento industrial em massa do pós-guerra (Hobsbawn, 1995), no qual a indústria química teve um papel fundamental (Freeman e Perez, 1998). Dois marcos importantes nos EUA foram a fundação da EPA (Environmental Protection Agency) e o lançamento do “Clean Air Act”, ambos em 1970. Como será visto na seção seguinte, essa pressão de ordem ambiental seria um desafio crítico para o setor químico em sua quarta fase, quando haveria um declínio do seu dinamismo econômico e tecnológico.

1.1.4 Quarta Fase: Perda de Dinamismo e Reestruturação

A partir do início da década de 70, o crescimento da indústria química em relação ao crescimento do PIB caiu de uma razão aproximada de 3 vezes para 1,4 na Europa e EUA (Cook e Sharp, 1991). Essa desaceleração foi acompanhada também de uma queda da introdução de inovações radicais e do número de patentes no setor químico (Achilladelis *et al.*, 1990, Freeman *et al.*, 1982). Nesse contexto problemático, diversos tipos de respostas seriam tomadas pelas empresas químicas, propiciando mudanças na estrutura do setor.

A perda do ritmo de crescimento da indústria química deve-se primeiramente à recessão que interromperia o ímpeto econômico nos anos 50 e 60. Além disso, as crises de petróleo de 73 e 79 atingiram o setor químico em sua fonte vital de matéria-prima e energia (Quintella, 1993). Como foi colocado na seção anterior, havia ocorrido uma expansão em termos de escala e em termos geográficos da fabricação de produtos químicos, especialmente os mais básicos. Se na década de 60, a explosão da demanda garantia o mercado para essa produção, já na década de 70, ocorriam muitas vezes períodos de sobrecapacidade. O mercado dos produtos químicos básicos passava a ter um perfil cíclico de baixa e alta demanda, assemelhando-se aos mercados de *commodities*.

De forma unânime, a literatura aponta que, a partir dos anos 70, houve uma queda da introdução de inovações radicais no setor químico, conformando um esgotamento de um grande ciclo inovativo anterior (Achilladelis *et al.*, 1990; Freeman *et al.*, 1982; Quintella, 1993; Walsh, 1984; Chakrabarti, 1990; ECIB, 1993, Arora *et al.*, 1998). Embora as taxas de investimento em P&D em relação ao faturamento terem se mantido entre as mais expressivas na indústria (Landau e Rosenberg, 1992), a inovação no setor químico passava por um processo de maturação tecnológica em grande número dos seus subsectores, favorecendo inovações de processo em detrimento de inovações de produto e, de forma geral, gerando mais inovações incrementais do que inovações radicais. Tratando mais especificamente da indústria de materiais sintéticos, Freeman *et al.* (1982) interpretam tal desaceleramento inovativo como parte de uma trajetória comum a certos conjuntos de

tecnologias inter-relacionadas, os quais têm um apogeu na sua capacidade de geração de inovações e de alavancar o sistema econômico geral, seguido de um natural declínio.¹⁷

Mesmo nesse quadro de menor dinamismo no setor químico, não se deve perder de vista as possibilidades de mudança técnicas dentro do setor químico. Já na década de 70 e ainda mais acentuadamente na década de 80, as tecnologias da informação baseadas na micro-eletrônica tiveram um forte impacto no *modus operandi* da indústria química. Citam-se, por exemplo, a substituição dos controles analógicos pelos controles digitais na produção, a integração das informações da produção e o desenvolvimento de simuladores de processos químicos. As tecnologias da informação tiveram um papel importante igualmente na construção de plantas químicas mais flexíveis quanto a matérias-primas utilizadas e substâncias produzidas (Quintella, 1993; Freeman, 1990; Piore e Sabel, 1984).

Na década de 80, emergia também a biotecnologia moderna ou de “terceira geração” que uniu a utilização de organismos biológicos na indústria com as técnicas da engenharia genética e biologia molecular (Sharp e Galimberti, 1993). Tal confluência inaugurou um campo vasto de pesquisa em novos produtos e processos com duas principais linhas de desenvolvimento dentro da indústria química: 1) a síntese de produtos a partir de processos biológicos, substituindo as tradicionais rotas sintéticas, 2) o *design* de novas moléculas, substituindo a triagem (*screening*) aleatória de substâncias por métodos mais bem direcionados para a busca de estruturas moleculares precisas. A literatura (Chesnais e Walsh, 1994; Green e Yoxen, 1990; Sharp e Galimberti, 1993) aponta que os maiores avanços têm ocorrido nessa segunda linha. Enquanto que a escala, aprendizagem e eficiência acumuladas nas rotas sintéticas são fatores fortes que limitam a competição por processos alternativos, a pesquisa de novas moléculas com as ferramentas da biotecnologia tem se mostrado profícua, principalmente na área de produtos para a saúde, nutrição e agricultura. Num movimento mais extremo, empresas como a Monsanto adquiriram capacidade técnica para a modificação genética de plantas, posicionando-se estrategicamente em uma nova forma de competição dentro da agroquímica (Pelaez e Poncet, 1998).

¹⁷ A sucessão desses conjuntos de tecnologias inter-relacionadas ajudaria a explicar os ciclos de crescimento econômicos (Freeman *et al.*, 1982; Freeman e Perez, 1988)

Enquanto que as tecnologias baseadas na micro-eletrônica tiveram uma aplicação ampla nos diversos subsetores e áreas da indústria química, os investimentos em biotecnologia eram realizados por firmas interessadas em comercializar produtos mais sofisticados e de maior valor agregado. O mesmo pode ser dito sobre a tecnologia dos novos materiais, os quais exigiam grande capacitação técnica para desenvolver materiais com alta performance designados para nichos específicos de mercado. Confrontadas pela saturação no mercado de químicos básicos, pela problemática do petróleo, mas também pelas oportunidades econômicas relacionadas a novas tecnologias, as empresas químicas viriam a tomar estratégias diversas, provocando mudanças na estrutura do setor, como será visto a seguir.

Com duas crises internacionais, o acesso ao petróleo tornou-se um fator ainda mais estratégico para o setor químico. A Du Pont, por exemplo, decidiu adquirir a empresa de base petrolífera Conoco em 1981. Esse tipo de integração a montante, entretanto, não foi a opção comum da maioria das grandes empresas químicas, as quais preferiam estratégias que passavam por 1) “desinvestir” em petróleo e produtos químicos mais maduros, 2) concentrar-se em áreas em que julgavam já ter “competências-chave” e melhores opções de rentabilidade, 3) orientar o seu *portfolio* para linhas de produtos mais sofisticados, seja através da diferenciação de *commodities* ou através de investimentos em áreas técnicas novas, como biotecnologia (Achilladelis *et al.*, 1990; Quintella, 1993).

As ações acima referidas como 1 e 2 passam geralmente por vendas às firmas de base petrolífera ou empresas químicas menos expressivas ou, ainda, por troca de operações. Em 1982, por exemplo, a Dow vendeu os seus ativos em petróleo e gás para Apache Petroleum e Dome Petroleum. Em outro exemplo, a Monsanto iniciou em 1984 uma série de vendas de ativos em química básica e materiais sintéticos, incluindo operações em látex de poliéster, poliestireno e resinas fenólicas. A estratégia da Monsanto incluía igualmente a venda de linhas de produtos de maior valor agregado mas cuja rentabilidade estava decaindo, tais como materiais para eletrônicos, analgésicos e alguns plásticos especiais. Um exemplo de acordo interfirma vem da ICI que, em 1983, negociou a suas operações de polietileno (invenção da firma) em troca de ativos em cloreto de polivinila da British Petroleum (Chandler Jr. *et al.*, 1998; Quintella, 1993).

A busca de um *portfolio* com maior participação de produtos de maior valor agregado (ação 3) seria um caminho natural para as empresas químicas buscarem melhor rentabilidade e maior proteção em relação aos efeitos cíclicos do mercado de químicos básicos. Contudo, a maneira de viabilizar essa estratégia nessa quarta fase é mais complexa tendo em vista a retração da demanda e a tendência das empresas em cortar os investimentos de P&D com retorno de longo prazo, realinhando a pesquisa para os problemas técnicos mais imediatos (Achilladelis *et al.*, 1990, Hounshell e Smith Jr., 1998). Junto a essa tendência, várias empresas químicas buscaram diversificar os seus *portfolios* através da aquisição de firmas ao invés da comercialização de produtos vindo da P&D interna. Alguns exemplos são as aquisições pela Dow da Merrel Drug Division (da Richardson-Vicks) em 1981 ou da Bromide Product (cerâmicas super-resistentes) em 1986. No mesmo ano, a Du Pont adquiriu a divisão de agroquímicos da Shell e de tintas automotivas da Ford (Chandler Jr. *et al.*, 1988). Apesar da numerosa ocorrência de aquisições, não se deve perder de vista os esforços de pesquisa interna por parte de empresas como Du Pont e Monsanto em biotecnologia, um campo novo e, assim, especialmente marcado pela incerteza de resultados (Hounshell e Smith Jr., 1998; Pelaez e Poncet, 1998; Sharp e Galimberti, 1993).

Os resultados das estratégias das grandes corporações químicas variam muito caso a caso. A Dow conseguiu aumentar a participação de produtos de maior valor agregado no faturamento de 15% em 1978 para 52% em 1989. Deve ser salientado, entretanto, que a Dow ainda produz químicos básicos como cloro, soda cáustica e estireno e que grande parte do faturamento da empresa ainda relaciona-se a capacitações técnicas e comerciais adquiridas durante a fase anterior de evolução do setor químico. Apesar dos investimentos em ciências da vida, a Du Pont também segue uma trajetória apoiada firmemente em capacitações prévias, contando, porém, com a participação da Conoco, que respondeu por 24% dos rendimentos globais em 1994. A Monsanto, por sua vez, é um exemplo contundente de transformação corporativa. Na década de 60, a Monsanto era uma típica empresa química multiproduto, com negócios em petroquímica, materiais sintéticos e agroquímica. A partir de meados dos anos setenta, o sucesso comercial do herbicida *Round-up*, uma estratégia agressiva de P&D em biotecnologia e a aquisição da empresa Searle possibilitaram mudanças profundas no perfil da empresa: em 1994, a Monsanto tinha 70%

dos seus rendimentos operacionais provenientes de produtos de saúde, nutricionais e de agricultura. Três mais tarde, a Monsanto decide separar as suas operações remanescentes em química “tradicional”¹⁸ em uma outra empresa (Solutia), em que seria a acionista majoritária (Chandler Jr. *et al.*, 1998).

Durante a sua quarta fase, a questão ambiental passou a tomar uma dimensão inédita para a indústria química. Como foi apontado anteriormente, várias facetas do problema ambiental ligado a essa indústria surgiram nas suas três primeiras fases: emissão de poluentes de processo, uso e disposição de produtos sintéticos, segurança das plantas de produção. Entretanto, seria nesta quarta fase que a regulamentação governamental e a pressão da sociedade civil imporiam ao setor químico a necessidade de incorporar a questão do meio ambiente de forma muito mais profunda em seu discurso e ações (Chenier, 2002; Heaton, 1994; Hoffman, 1996).

No plano legal, devem ser destacados o “Toxic Substances Control Act” (EUA, em 1976) e a sexta emenda ao “Dangerous Control Act” (Comunidade Européia, 1979), os quais contribuíram para endurecer os padrões para se operar uma planta química e comercializar os seus produtos. Documentos da Du Pont relatam que, no final dos anos setenta, a empresa estava gastando 30% dos seus novos investimentos em equipamentos de poluição e igualmente que, na mesma época, um teste completo de um produto químico seguindo as normas da EPA envolveria de 500 a 1.000 cobaias, durando de 3 a 5 anos a um custo de cerca de US\$ 500.000 (Hounshell e Smith Jr., 1998, p. 585 e 570).

Além de se adaptar a um novo *modus operandi*, o setor químico teve que, por vezes, compensar danos ambientais passados, como as empresas americanas atingidas pelo estabelecimento do Superfund a partir de 1980 (Chenier, 2002). Esse fundo tinha como objetivo a limpeza de sítios previamente contaminados por lixo químico no território dos EUA. Os seus recursos viram em parte do próprio governo, mas, por força de lei, majoritariamente dos usuários dessas áreas, em geral empresas químicas. Vale ressaltar que esse é um tipo de instrumento legal retroativo, pois atinge ações que eram autorizadas em sua época. Outro aspecto importante e conflituoso do Superfund é que, uma vez

¹⁸ A Monsanto reteve o herbicida *Round-up*. Para uma discussão sobre a estratégia de diversificação produtiva da Monsanto, ver Pelaez e Poncet (1998).

identificado, um único usuário do sítio contaminado poderia ser responsabilizado judicialmente pela sua limpeza completa (Esteghamat, 1998). O Superfund começou em 1980 com um montante de recursos de US\$ 1,6 bilhões; já em 1986 ele passou a agregar US\$ 9 bilhões com o objetivo de limpar 371 sítios contaminados, sendo que já haviam sido inventariados 30.000 desses sítios (Chenier, 2002, p. 486-487).

Um fato significativo foi o acidente da planta da Union Carbide em 1984 na cidade de Bhopal, Índia, em que 3.000 pessoas faleceram e outras milhares foram gravemente feridas (Heaton, 1994, p. 44). O impacto sobre a imagem da empresa foi profundo e levou, inclusive, a uma queda drástica do valor de suas ações no mercado. O acidente alterou completamente a trajetória da Union Carbide, a qual, ao contrário de várias de suas competidoras, ficou sem capacidade de investimento suficiente para sustentar grandes estratégias comerciais em direção a produtos mais sofisticados (Chandler Jr. *et al.*, 1998). Nesse quadro em que a variável ambiental passa a ser um fator-chave com que as empresas químicas necessitam lidar adequadamente, pode-se entender a seguinte afirmação de E. Woolard, então CEO da Du Pont:

“O futuro da indústria química será diretamente moldado, e realmente pode, ao fim, ser determinado pelas questões de ordem ambiental.”

(Woolard, 1990 *apud* Tombs, 1993, p. 133, trad. do Autor)

A problemática ambiental da indústria química será retomada ainda neste capítulo, com apresentação de dados mais recentes. Mas uma conclusão importante já pode ser retirada dessa seção de evolução histórica: o crescimento das regulamentações governamentais e da pressão civil em relação à *performance* ambiental da indústria química a atinge esta justamente quando há um declínio do seu dinamismo econômico e tecnológico. O setor químico manteve ainda capacidade de renovar-se, mas ela não é tão geral e vigorosa como em suas fases anteriores. Dentro desse contexto, está uma das questões principais desta tese: quais são as principais oportunidades e restrições da indústria química incorporar as demandas ambientais surgidas a partir do fim dos anos sessenta e progressivamente institucionalizadas? Nas próximas seções, procurar-se-á refinar o conhecimento da indústria química como objeto de estudo atual e formar, assim, um melhor arcabouço analítico para recuperar a questão aqui formulada nos capítulos posteriores.

1.2 Problemas de Definição e Modos de Abordagem Relacionados à **Indústria Química**

A seção anterior procurou recuperar a evolução da indústria química, detendo-se apenas nos principais elementos de mudança, seja em termos de novos produtos/setores, novos processos, matérias-primas básicas, ou países líderes. O objetivo foi obter uma visão básica da dinâmica histórica do setor químico sem haver uma preocupação em definir melhor os seus contornos. Já nesta seção, passam a ser consideradas mais propriamente as implicações de ter a indústria química como objeto de estudo atual. Pode-se partir do seguinte problema: quando o termo *indústria química* é utilizado, ao que ele precisamente se referencia?

A dificuldade para lidar com essa questão surge em vários estudos setoriais devido à extrema diversidade do setor químico (Bruno, 1995; Quintella, 1993; Council On Competitiveness, 1996; ECIB, 1993; Cook e Sharp, 1991). Essa diversidade pode ser exemplificada a partir padrão de classificação industrial americano (ver quadro 1.1) em que são definidos os produtos integrantes do setor químico. A partir do quadro 1.1, observa-se que a indústria química dos EUA compreende 9 grupos principais, subdivididos em 29 subgrupos, responsáveis por uma grande variedade de produtos, indo de explosivos a perfumes, de fertilizantes a tintas. De fato, estima-se que a quantidade total de produtos químicos no mercado europeu seja de 100.000 (Comissão CE, 2001).

Seguindo Chesnais e Walsh (1994) e Andersen e Walsh (1998), a indústria química compreende, na verdade, um complexo de indústrias que se desenvolveram em torno da base química, dentro de uma dinâmica em que as fronteiras setoriais alteravam-se e, muitas vezes, tornavam-se indefinidas. Assim sendo, qualquer estudo que tente focalizar a indústria química depara-se com uma unidade de análise complexa, compreendendo um conjunto amplo de subsetores ligados a uma gama de produtos bastante heterogênea. Uma estratégia possível é criar categorias analíticas que possam abarcar a diversidade do setor químico. A seguir, será visto de que forma alguns estudos encaminharam-se por esse caminho.

**Quadro 1.1: Padrão de Classificação Industrial dos EUA:
Produtos Químicos e Afins**

Número	Nome do Grupo e dos Subgrupos
• 281 ▸ 2812 ▸ 2813 ▸ 2816 ▸ 2819	• Produtos Químicos Inorgânicos Industriais ▸ álcalis e cloro ▸ gases industriais ▸ pigmentos inorgânicos ▸ produtos químicos inorgânicos industriais sem outra classificação
• 282 ▸ 2821 ▸ 2822 ▸ 2823 ▸ 2824	• Materiais Plásticos e Borracha, Resinas ou Fibras Sintéticas ▸ materiais plásticos, resinas sintéticas, e elastômeros não vulcanizados ▸ borrachas sintéticas (elastômeros vulcanizados) ▸ fibras celulósicas artificiais ▸ fibras orgânicas artificiais, exceto celulósicas
• 283 ▸ 2833 ▸ 2834 ▸ 2835 ▸ 2836	• Drogas ▸ produtos químicos medicinais e produtos botânicos ▸ preparados farmacêuticos ▸ substâncias de diagnóstico <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i> ▸ produtos biológicos, exceto substâncias de diagnóstico
• 284 ▸ 2841 ▸ 2842 ▸ 2843 ▸ 2844	• Sabão, Detergentes, e Preparados de Limpeza ▸ sabão e outros detergentes, exceto limpadores especiais ▸ preparados especiais para limpeza, polimento e saneamento ▸ agentes surfactantes ativos, agentes finalizadores , óleos sulfonados e assistentes ▸ perfumes, cosméticos e outros preparados de toalete
• 285 ▸ 2851	• Tintas, Vernizes, Laquês, Esmaltes e Produtos Afins ▸ tintas, vernizes, laquês, esmaltes e produtos afins
• 286 ▸ 2861 ▸ 2865 ▸ 2869	• Produtos Químicos Orgânicos Industriais ▸ produtos químicos de madeira e látex ▸ produtos orgânicos cíclicos brutos e intermediários, corantes orgânicos e (rever documento) ▸ produtos químicos orgânicos industriais sem outra classificação
• 287 ▸ 2873 ▸ 2874 ▸ 2875 ▸ 2879	• Produtos Químicos Agrícolas ▸ fertilizantes nitrogenados ▸ fertilizantes fosfatados ▸ fertilizantes, mistos somente ▸ produtos químicos agrícolas e pesticidas sem outra classificação
• 289 ▸ 2891 ▸ 2892 ▸ 2893 ▸ 2895 ▸ 2897	• Produtos Químicos Variados ▸ adesivos e vedantes ▸ explosivos ▸ tinta de impressão ▸ negro de fumo ▸ produtos químicos e preparados químicos sem outra classificação

Fonte: adaptado de OSHA (1997)

O Conselho de Competitividade Americano (Council on Competitiveness, 1996) analisa a indústria química do seu país usando três categorias principais: produtos de química de base, produtos intermediários e produtos finais. Exemplos de produtos químicos de base são os ácidos inorgânicos, álcalis, sais e compostos orgânicos. Já os produtos intermediários seriam mais elaborados e seriam usados posteriormente ainda na manufatura, tais como fibras sintéticas, materiais plásticos e pigmentos. Por último, há os produtos voltados para o consumo final. Claramente vê-se no conjunto das categorias acima a idéia de um encadeamento do setor químico, entendendo a natureza dos seus subsetores a partir do uso de seus produtos na cadeia de produção e consumo.

O estudo de Cook e Sharp (1991) divide a indústria química em apenas duas categorias: fabricantes de produtos químicos de massa (*bulk chemical*) e os fabricantes de especialidades químicas. Segundo as autoras, os químicos de massa compreenderiam os produtos de topo de cadeia (*upstream*) e de natureza de *commodity*. O termo *commodity* implica aqui uma massificação em termos quantitativos e qualitativos, sendo que os fabricantes apresentam produtos sem um diferencial significativo de performance entre si, baseando a concorrência sobretudo nos preços. Por outro lado, as especialidades químicas seriam produtos de final de cadeia (*downstream*) e sobre os quais há um esforço de diferenciação por parte de seus produtores para criar e explorar nichos de mercado.

Os termos *commodities* e especialidades químicas são utilizados também nos trabalhos do ECIB (1993), Quintella (1993) e Bruno (1995), porém são acrescidas com as categorias de *pseudocommodities* e química fina (ver quadro 1.2). Como fator de definição dessas categorias, vem primeiramente o volume de produção: *commodities* e *pseudocommodities* teriam uma grande escala de produção, ao passo que os produtos de química fina e especialidades seriam fabricados em baixa escala. Em segundo lugar, vem a classificação dos produtos em diferenciados (*pseudocommodities* e especialidades) ou indiferenciados (*commodities* e química fina). Os produtos químicos classificados como diferenciados têm suas características bastante ligadas a produtores específicos e seus preços estão relacionados a algum tipo de índice de performance. Já os produtos químicos indiferenciados podem ser facilmente obtidos de diversas fontes com o mesmo desempenho e suas especificações são claramente padronizadas.

Quadro 1.2: Classificação dos Produtos Químicos

	Indiferenciado	Diferenciado
Alto volume de produção	<i>Commodities</i>	<i>Pseudocommodities</i>
Baixo volume de produção	<i>Química Fina</i>	<i>Especialidade Química</i>

Fonte: adaptado de Bruno (1995)

Nesta tese, serão empregadas essas duas variáveis-chave (volume de produção e natureza diferenciada do produto) como uma forma de simplificar a heterogeneidade da indústria química. A partir delas, pode-se pensar sobre os efeitos diferenciados das demandas de ordem ambiental na inovação nessa indústria. Obviamente, em uma análise feita desse modo perde-se a visão de determinantes importantes que só se mostrariam em estudos mais específicos voltados para os seus subsetores. Como vimos, a indústria química não é um objeto de estudo coeso, e abordá-lo de forma geral, mesmo qualificando suas peculiaridades internas, deve ser visto como uma estratégia de aproximação e simplificação.

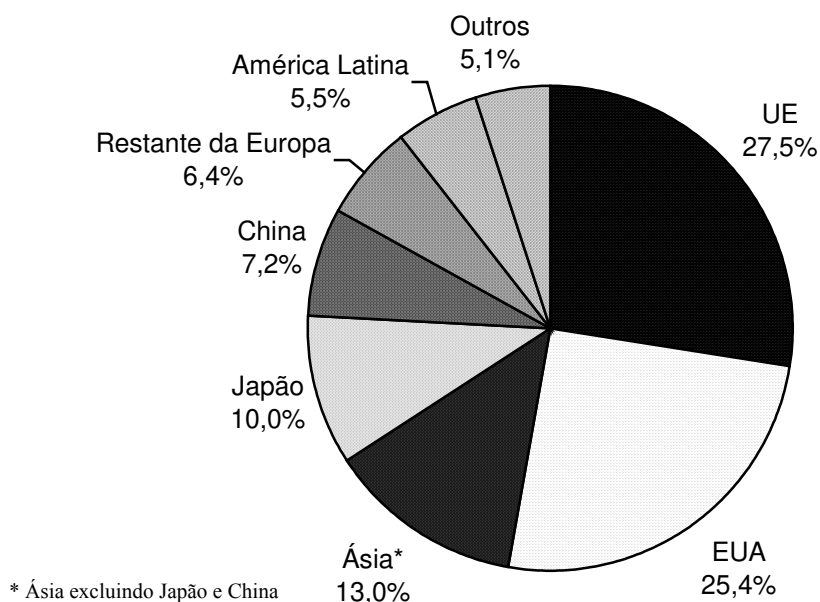
Por outro lado, deve-se levar em conta igualmente a importância das interfaces dentro do setor, aproveitadas sobretudo pelas megaempresas, presentes em várias linhas de produção. Mesmo sendo heterogênea, a indústria química possui elementos técnicos e comerciais que se aproximam e são frequentemente compartilhados em uma mesma empresa. A análise empreendida nesta tese busca se beneficiar da existência desses elementos comuns, sem perder de vista, entretanto, as principais especificidades internas através da incorporação das dimensões de volume de produção e diferenciação do produto.

1.3 Dados Econômicos sobre a Indústria Química no Mundo

Nesta seção, serão apresentados alguns números gerais sobre a indústria química. O objetivo é ajudar na construção do perfil do setor químico em seu estágio atual através de dados quantitativos. Esse perfil será complementado na seção seguinte com a seleção de aspectos qualitativos importantes.

Preliminarmente, uma idéia da dimensão econômica das atividades do setor químico é fornecida pelo gráfico 1.1: a indústria química realizou em 2002 um total estimado de 1.919 bilhões de euros em vendas (CEFIC, 2003a). A União Européia (UE) é líder de participação nesse volume de venda (27,5 %), seguida dos EUA (25,4 %) e Japão (10%). Se forem considerados os países da UE de forma isolada, teríamos como líderes (ainda em 1997): EUA, Japão, Alemanha (6,7%), França (4,3%) e Itália (4,3%) (CEFIC, 2003a).

Graf: 1.1: Divisão Geográfica da Produção da Indústria Química - 2002
(total: 1.919 Bilhões de ECUs em vendas)

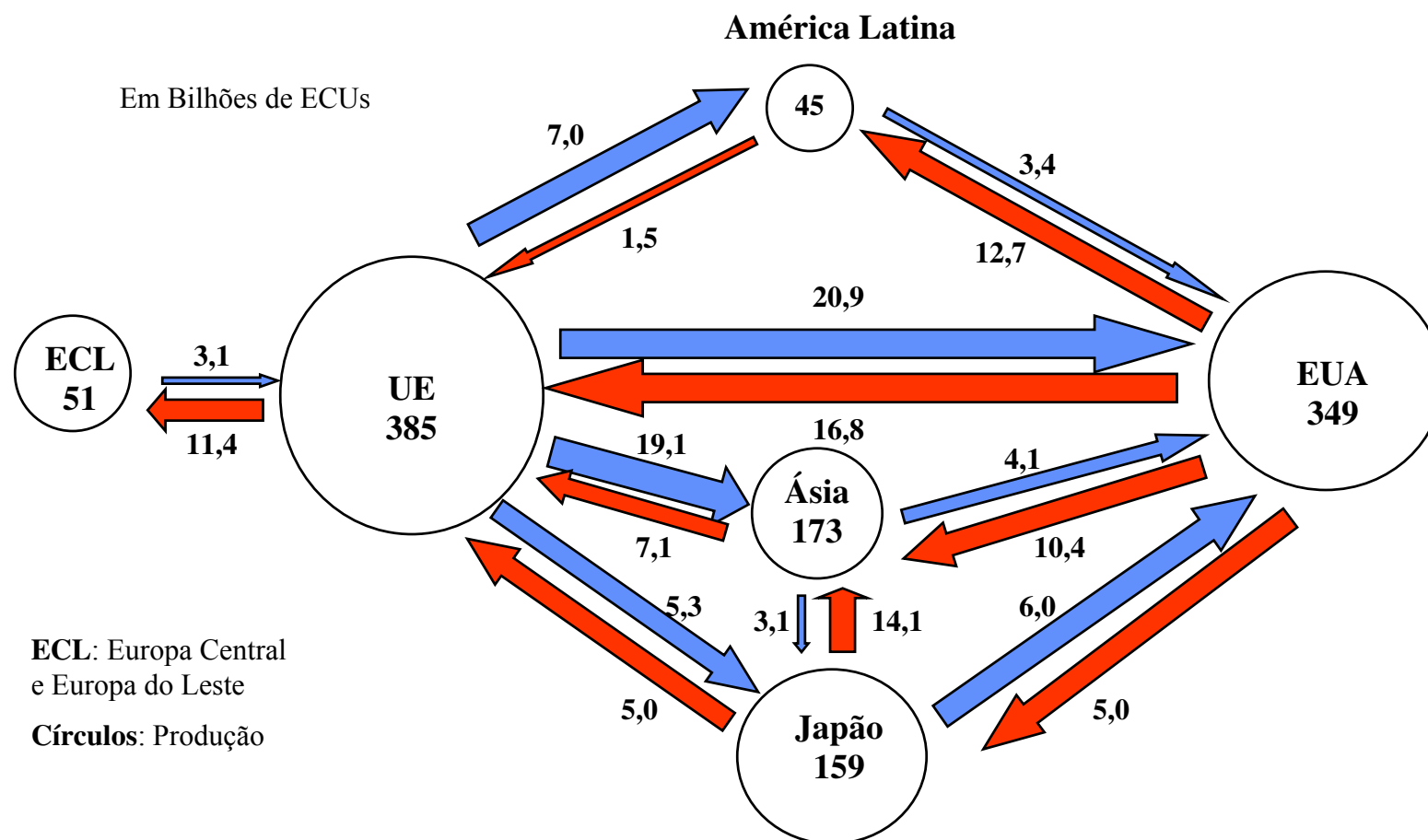


Fonte: CEFIC

Um melhor entendimento da dimensão econômica das atividades da indústria química pode ser buscado através da participação do setor no PIB de alguns países. Nos EUA, a participação da indústria química no PIB gerado pela manufatura entre 1993 e 1999 foi de 11,53 % (US Census Bureau, 2002), o que coloca o setor químico como segundo principal contribuidor da indústria manufatureira, perdendo apenas para o setor de equipamentos eletrônicos. Na União Européia, a indústria química foi responsável 9,9 % do PIB originário da manufatura em 1995 (CEFIC, 2002). Nestes termos, o setor químico na UE fica atrás apenas do setor de alimentos e bebidas e do setor automobilístico.

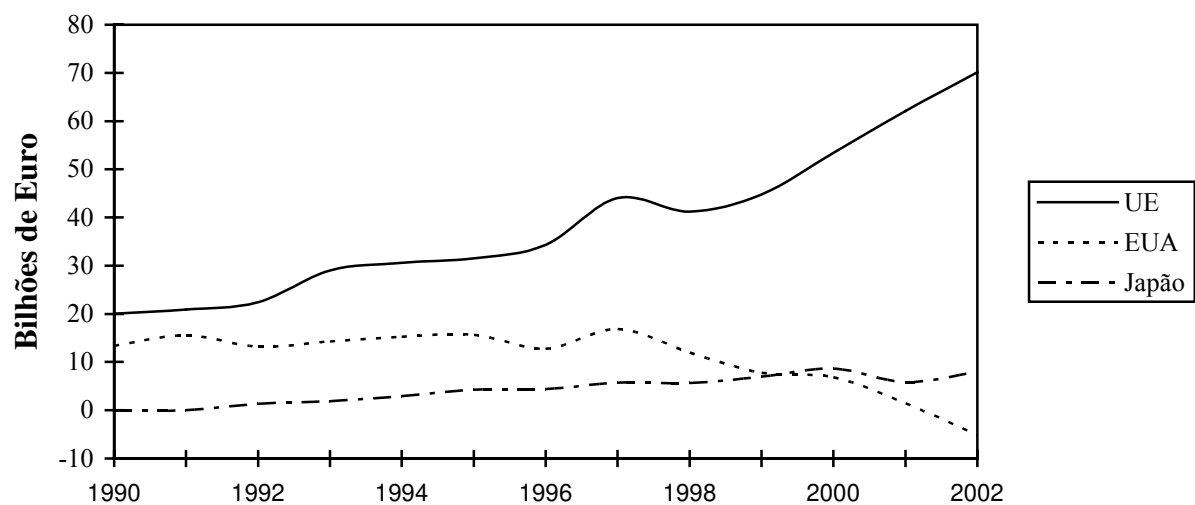
Passando agora ao tema do comércio internacional, a fig. 1.3 esquematiza os principais fluxos mundiais de comércio de produtos químicos para o ano de 1998. Em uma primeira observação, percebe-se que tais fluxos concentram-se de forma relativamente equilibrada na tríade UE, EUA e Japão. Dentro desta tríade, as diferenças de desempenho favorecem a UE e prejudicam mais os EUA — a UE chega a exportar 24,4 % a mais do que importa dos EUA. Em compensação, desequilíbrios proporcionalmente bem mais acentuados favorecem a tríade em detrimento da América Latina, Europa Central e do Leste e restante da Ásia. A UE chega a exportar 366,7 % a mais do que importa da América Latina.

Fig. 1.3: Rede Mundial dos Maiores Fluxos de Comércio de Produtos Químicos (1998)



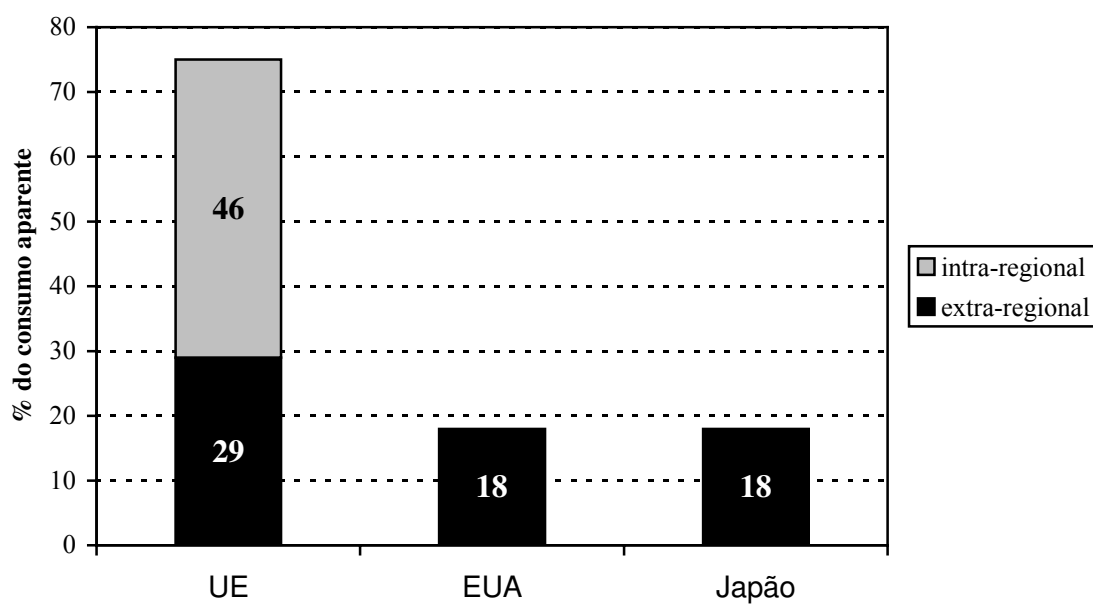
Fonte: adaptado de CEFIC (1999, 2000)

Graf. 1.2: Comparação do Balanço de Comércio de Produtos Químicos entre UE, EUA e Japão (1985-1997)



Fonte: CEFIC (2003a)

Graf. 1.3: Comparação de Coeficientes de Exportação: UE, EUA e Japão (2002)



Fonte: CEFIC (2003b)

Detendo-se apenas na tríade, são disponibilizados no graf. 1.2 dados de balanço de comércio de produtos químicos de 1990 até 2002. Durante esse período, percebe-se um melhora bastante expressiva da performance da UE, cujo superávit cresceu em 52,3 bilhões de euros (um aumento na ordem de 290 %). O desempenho do Japão melhorou também, mas em menor monta, saindo de um déficit de 0,1 bilhões de euros em 1990 para chegar a um superávit de 7,9 bilhões em 2002. Em uma trajetória inversa, os EUA experimentaram uma deterioração completa do seu balanço de mercado de produtos químicos. De 1990 até 1997, o superávit americano manteve-se na faixa entre 13 a 17 bilhões de euros; a partir de então, o desempenho dos EUA decaiu constantemente, resultando num déficit de 5,2 bilhões em 2002.

A UE chega exportar 26% da sua produção contra 18% dos EUA e Japão. Se incluirmos os fluxos de comércio dentro da UE, chega-se a conclusão que 75% dos produtos químicos fabricados nesse bloco econômico são destinados para fora dos seus países originais de produção.

Através da literatura acadêmica mais recente utilizada nesta tese, não foi possível compreender a diferença nas trajetórias européias e americanas em relação ao balanço comercial de produtos químicos. Alguns periódicos setoriais citam como principal causa dessa discrepância a sobrevalorização do dólar, a qual desfavorece as exportações americanas (Chemical Week, 5 de dez., 2001, p. 9; Chemical & Engineering News, 13 de jan., 2003, p. 16).

Pelos dados vistos nesta seção, pode-se dizer que as atividades de produção do setor químico têm uma relevância destacada em relação à indústria manufatureira. A produção desse setor é fortemente concentrada na UE, EUA e Japão. Os EUA destacam-se como país líder de produção. A UE apresenta uma grande performance no comércio internacional no decorrer da década de 90. Os países fora da tríade sofrem com um agudo desequilíbrio negativo nos fluxos de comércio de produtos químicos. Alguns dados adicionais sobre a indústria química serão apresentados na seção seguinte como suporte a uma discussão mais qualitativa do setor.

1.4 Temas de Análise Essenciais sobre a Indústria Química

Esta seção discute alguns aspectos qualitativos essenciais da indústria química, complementando tanto a discussão feita sobre a heterogeneidade do setor na seção 1.2, quanto a apresentação dos dados econômicos na seção 1.3. Espera-se, assim, avançar na formação do perfil do setor químico como objeto de estudo. Alguns elementos já vistos na revisão histórica do setor (1.1) serão apropriadamente retomados.

Destaca-se nesta seção cinco temas: 1) o alto grau de encadeamento interno e externo, 2) a alta intensidade de capital e de P&D, 3) o perfil das empresas no setor, 4) estratégias de integração, diversificação e de racionalização, e 5) problemática ambiental especialmente crítica.

1.4.1 O Alto Grau de Encadeamento Interno e Externo

Cook e Sharp (1991) afirmam que “a indústria química é o seu *“melhor próprio consumidor”* (p. 202). Essa assertiva por ser ilustrada pelo fato da indústria química da UE absorver 42% da sua produção total, ultrapassando a porcentagem de consumo de outros setores da economia e do consumo final (estimativa para 1991; CEFIC, 2000). Essa alta proporção de consumo interno reflete a estrutura encadeada da indústria. Os seus produtos passam por diversas etapas de processamento em várias áreas do próprio setor, aumentando gradativamente a sua complexidade e especificidade funcional.

Além de ser uma grande produtora de insumos para si própria, a indústria química também é uma importante fornecedora para outros setores industriais. Voltando à UE, estima-se que do total da produção de químicos consumida extra-setorialmente, 40% destina-se para o restante da indústria e 28% para o consumo final (estimativa para 1991; CEFIC, 2000). Em relação aos EUA, é interessante observar o comentário do “Council on

Competitiveness” de que a indústria química é freqüentemente considerada como uma “*keystone industry*”.¹⁹ Ainda segundo esses autores:

“O estado geral da indústria química é estreitamente ligado ao das economias dos EUA e das economias globais. A indústria é particularmente ligada aos setores de automóveis, construção e eletrônicos; essas indústrias de manufatura utilizam cerca de metade da produção da indústria química. Como resultado, os produtos químicos ajudam a conformar a natureza competitiva de outros setores industriais, e o vigor dessas indústrias determina o mercado para a indústria química”.

(Council on Competitiveness, 1996, p. 2; tradução do Autor)

Nessa linha, pode-se falar igualmente em um alto grau de encadeamento externo, denotando a grande interdependência entre a indústria química e outros setores industriais. Esse grau de interdependência também ajuda a qualificar a indústria química como um setor econômico chave para as economias industrializadas.

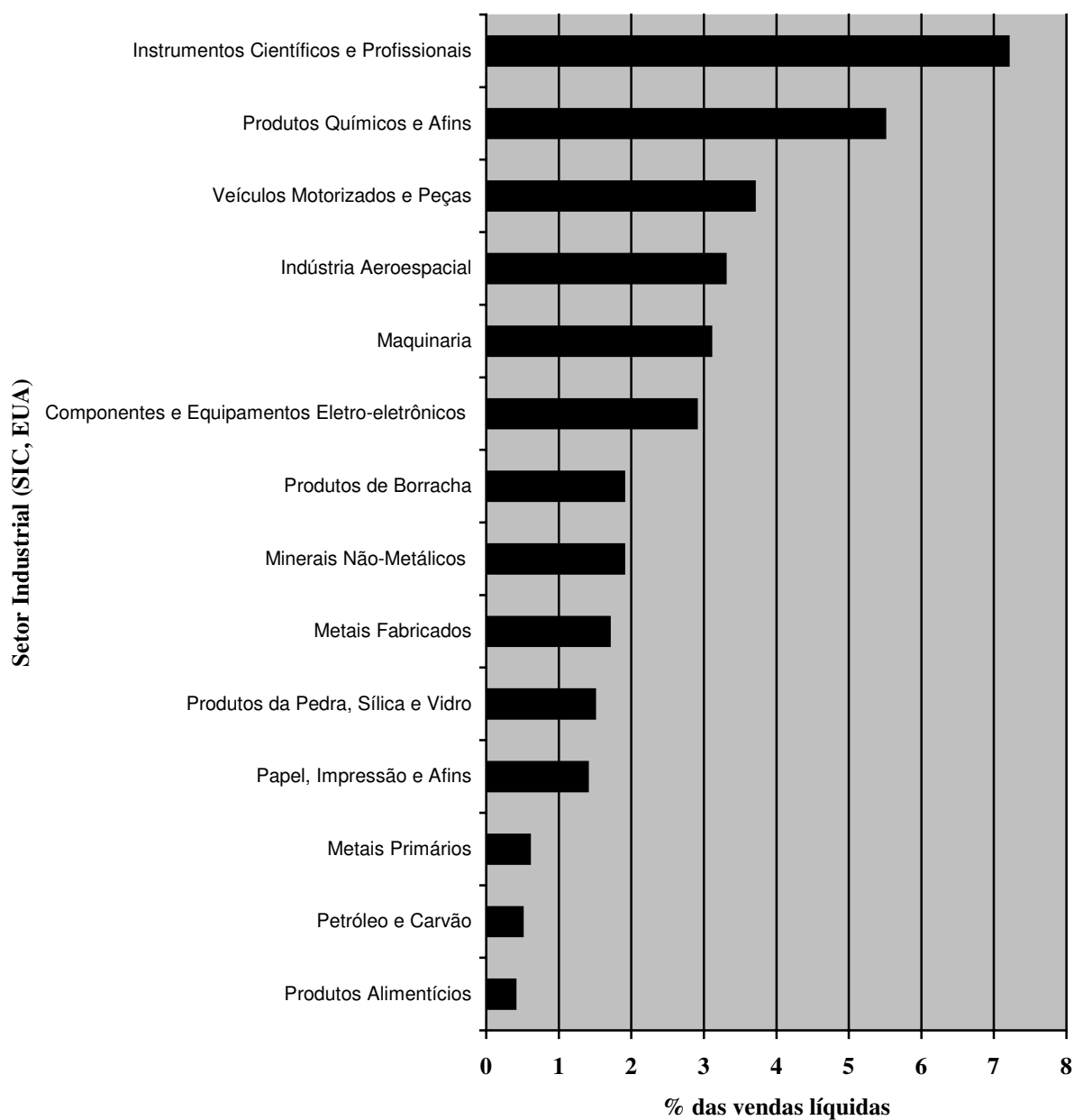
1.4.2 A Alta Intensidade de Capital e de P&D

A necessidade de grandes investimentos em capital e em P&D são apontados na literatura como características essenciais da indústria química (ECIB, 1993; Landau e Rosenberg, 1994). Contudo, como será visto no decorrer deste item, existem grandes diferenças dentro do setor químico em relação a essas duas características.

A intensidade de capital pode ser exemplificada pelo dado incluído no ECIB (1993): nos EUA cada trabalhador na indústria química correspondia a US\$ 92.330 em capital líquido investido, ao passo que a média da indústria manufatureira era de US\$ 42.900. Contudo, esse grau de intensidade de capital seria mais forte nos subsetores da indústria que apresentam altas escalas de produção, ou seja, os classificados como produtores de *commodities* e *pseudocommodities*. Nesses segmentos, o volume de capital constitui uma das principais barreiras à entrada para os novos concorrentes comerciais (ECIB, 1993).

¹⁹ “*Keystone*” pode ser traduzida como pedra fundamental.

Graf. 1.4: Financiamento de P&D por Setores da Manufatura nos EUA: Comparação por % de Vendas Líquidas (1997)



Fonte: adaptado de US Census Bureau (2001)

A intensidade dos esforços em P&D relaciona-se à própria história do setor químico, que inaugurou com o setor elétrico o uso do laboratório de pesquisa *in-house* (Noble, 1982). Devido ao papel central desempenhado pela P&D interna e à aplicação de conhecimentos científicos na inovação, Pavitt (1984) classifica os setores químico e eletrônico como baseados em ciência (*science-based*).

A atualidade da importância da P&D na indústria química é exemplificada pelo graf. 1.4: a indústria química nos EUA é o segundo setor em investimentos próprios de P&D em relação ao volume líquido de vendas (em 1997). É nos segmentos de química fina e de especialidades que a necessidade de investimentos em P&D faz-se hoje mais premente, constituindo uma forte barreira à entrada (Bruno, 1995; ECIB, 1993).

1.4.3 O Perfil das Empresas no Setor Químico

A diversidade da indústria química também pode ser verificada em relação aos tipos de empresas atuantes no setor. O quadro 1.3 apresenta uma forma de classificá-las.

As *megaempresas* (também chamadas de grandes corporações neste trabalho) são caracterizadas por linhas de produtos diversificadas e por sustentarem uma liderança comercial nos seus mercados principais. As *empresas especializadas*, por sua vez, têm a sua competência concentrada em produtos bem particulares e são marcadas pelo intenso esforço inovativo. Já as empresas denominadas como *orientadas para a produção* baseiam-se no seu acesso privilegiado a matérias-primas para montar facilidades de grande escala. Enquanto que estas últimas empresas são geralmente localizadas a montante na cadeia de produção química, as *empresas de produto de consumo* caracterizam-se pela manutenção de relações especiais e diretas com os consumidores finais. Tais empresas geralmente incorporaram algumas linhas de produção química mais como um suporte de suas atividades comerciais prioritárias.

Quadro 1.3: Tipologia de Empresas Químicas

Identificação	Características	Exemplos
<i>Megaempresa</i>	Liderança mundial em todos os seus mais importantes mercados	BASF, Bayer, Hoechst, DuPont, Dow, ICI
<i>Empresa Especializada</i>	Desfrutam de posição de especial competência em áreas especializadas e inovam constantemente, devido a: - capacitação tecnológica - conhecimento de mercado - ampla cobertura geográfica	Lanza (biocidas), Nalco (tratamento de água), Great Lakes (produtos de bromina)
<i>Empresa Orientada para Produção</i>	- Acesso a matérias-primas baratas - Economias de escala globais - Estabilidade nas relações contratuais	Sabir, Oxychem, Shell, Pequiven, Pemex
<i>Empresa de Produtos de Consumo</i>	- Alta capacidade de atendimento ao consumidor - Produção química como suporte às atividades comerciais	Procter & Gamble, Eastman Kodak, 3M, Unilever

Fonte: ECIB (1993)

Quadro 1.4: 20 Maiores Empresas Químicas do Mundo (em vendas, 2001)

Companhia	País de Origem	Vendas de Prods. Químicos (US\$ milhões)
1. Dow	EUA	27.805
2. DuPont	EUA	24.726
3. BASF	Alemanha	24.313
4. TotalFinaElf	França	17.269
5. Formosa Group	Taiwan	16.756
6. Bayer	Alemanha	16.064
7. ExxonMobil	EUA	15.943
8. E.On	Alemanha	15.269
9. Procter & Gamble	EUA	11.620
10. British Petroleum.	Reino Unido	11.515
11. Royal Dutch/ Shell	Holanda/ Reino Unido	10.616
12. Unilever	Holanda/ Reino Unido	9.222
13. ICI	Reino Unido	9.212
14. Akzo Nobel	Holanda	8.982
15. Suez Lyonnaise des Eaux	França	8.899
16. Huntsman	EUA	8.500
17. Norsk Hydro	Noruega	7.988
18. Mitsui Chem	Japão	7.585
19. Dainippon	Japão	7.367
20. Air Liquide	França	7.337

Fonte: adaptado de Chemical Week (4 de dez., 2002, p. 26)

O quadro 1.4 apresenta as 20 maiores empresas químicas no ano de 1997. Nesta lista, podem ser observadas tradicionais megaempresas químicas — Dow, DuPont, BASF, Bayer, ICI —que já sustentam sua posição de liderança por muito tempo, no caso das empresas alemãs, por mais de um século. Empresas orientadas para o consumo (Unilever, Procter & Gamble) e para a produção (Shell, British Petroleum) também são encontradas.

Ao analisar o setor químico, as atenções dos estudos setoriais tendem a recair sobre as megaempresas ou grandes corporações. Podem ser indicadas quatro causas principais para essa tendência:

- 1) As grandes corporações detêm uma forte liderança nos seus mercados, o que é refletido num grande volume de vendas dessas empresas em vários segmentos e, desse modo, num perfil relativamente concentrado do mercado de produtos químicos vista a sua diversidade (ECIB, 1993). Os dados do ECIB mostram que, nos EUA, as 20 maiores empresas químicas controlam 50% do mercado em 25 dos 28 segmentos do mercado de químicos.
- 2) As grandes corporações, como ICI, DuPont, BASF, têm sido hábeis em manter-se em posições dominantes no mercado por décadas.
- 3) As megaempresas são multinacionais com sua base de produção amplamente difundida pelo mundo.
- 4) Apesar do papel das empresas especializadas no desenvolvimento de novas tecnologias, as grandes corporações são grandes financiadoras de P&D, assim como as principais introdutoras de inovações. São essas megaempresas que podem arcar com os requerimentos de recursos financeiros e tempo para o desenvolvimento de novas tecnologias no setor químico (Achilladelis *et al.*, 1990; Cook and Sharp, 1991).

Por essas mesmas razões, daremos ênfase ao longo deste trabalho às megaempresas. Contudo, as outras categorias de firmas também serão utilizadas como mais um modo de tratar a heterogeneidade do setor químico.

1.4.4 Estratégias de Integração, Diversificação e Racionalização.

A estrutura encadeada do setor químico, assim como as interfaces tecnológicas na produção e pesquisa dos seus produtos, criam oportunidades para as empresas químicas expandirem o seu arco de atividades dentro do próprio setor.

Uma das formas dessa expansão é a integração produtiva ao longo das cadeias de produtos. Uma firma pode fazer uma integração a montante, ou seja, começar a produzir alguns dos seus insumos de produção. Isso é interessante quando se mostra ter estabilidade e controle de preço no fornecimento de matérias primas., como no exemplo dos segmentos de *commodities* e *pseudocommodities* (ECIB, 1993).

Outra forma de integração produtiva é do tipo a jusante, em que a companhia torna-se fabricante de produtos químicos mais avançados considerando a cadeia de produção química. Esse movimento é relevante para as empresas que querem incorporar maior valor agregado à sua produção a partir de produtos mais sofisticados e diferenciados. Alguns desses produtos diferenciados mantêm as qualidades básicas do produto original, porém incorporam características específicas que atendem a nichos de mercado (Achilladelis *et al.* 1990; Quintella, 1993).

Um outro exemplo característico de integração produtiva a jusante é o de empresas petrolíferas que se beneficiam de acesso privilegiado a matérias-primas e passam a fabricar produtos químicos básicos. Adotando essa ação, algumas dessas empresas lograram êxito comercial e foram os poucos novos entrantes na listas das maiores empresas químicas nas últimas décadas (ECIB, 1993; Cook e Sharp, 1991).

Tratando agora da diversificação produtiva, ela se difere da integração a jusante por se tratar de uma agregação de produtos que não eram originalmente alinhados à sua cadeia insumo-produto. O exemplo mais óbvio são as empresas que expandem seu *portfolio* com produtos radicalmente novos, saindo de subsetores como plásticos para produtos para a saúde. Aqui, torna-se relevante saber se a empresa decide diversificar por meio de aquisições ou essencialmente por meio de P&D interna (Achilladelis *et al.* 1990, Chandler Jr. *et al.*, 1998).

Opondo-se tanto à integração produtiva quanto à diversificação, observa-se por parte de muitas empresas químicas a decisão de racionalização ou “desinvestimentos” em certas áreas. É o procedimento que busca racionalizar recursos, desfazer-se de áreas menos lucrativas e concentrar-se nas “áreas de competência-chave” (ECIB, 1993; Achilladelis *et al.* 1990). Frequentemente, a estratégia de racionalização compreende acordos interfirmas para a troca de linhas de produção (Quintella, 1993, Chandler Jr. *et al.*, 1998).

As estratégias de integração, diversificação e racionalização vão servir também de guias de análise para as ações das empresas químicas face à questão ambiental.

1.4.5 Problemática Ambiental Especialmente Crítica

Comparando-se com a indústria em geral, o setor químico é um foco privilegiado de questionamento e polêmica no tocante à questão ambiental. A problemática ambiental da indústria química chama a atenção principalmente a partir dos seguintes aspectos:

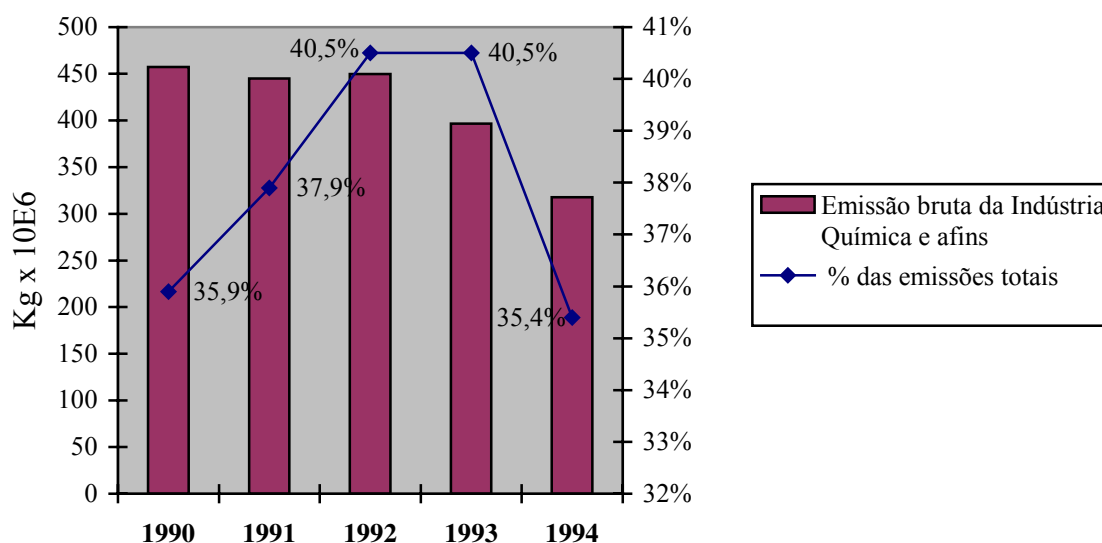
- 1) Os riscos ambientais associados aos produtos químicos. A produção global de substâncias químicas desde 1930 até hoje teve um salto estimado de 1 milhão para 400 milhões de toneladas/ano, sendo que no mercado europeu são comercializados cerca de 120 mil tipos desses produtos (Comissão CE, 2001). À essa grande quantidade e diversidade associa-se uma incerteza sobre os impactos dos produtos químicos sobre as pessoas e o meio ambiente, que podem incluir efeitos cancerígenos, teratogênicos e cumulativos no meio físico e em tecidos orgânicos. Casos como PCBs (bifênis policlorados), BHC (hexaclorocicloexano), DDT (dicloro difenil), TEL (tetra-etila de chumbo) e CFCs (clorofluorcarbonos) — todos produtos de uso corrente até que foram reconhecidos seus efeitos danosos à saúde humana e/ou ao ambiente global (Chenier, 2002) — marcaram negativamente o histórico da indústria química. Ações de governo — inclusive recentes como a Iniciativa Gore nos EUA (1998) e o REACH²⁰ na UE (2003) — tentam lidar com o problema normalizando testes toxicológicos. Mas já que testar o universo completo dos produtos químicos teria um custo proibitivo, essas

²⁰ Policy for registration, evaluation and authorization of chemicals.

regulamentações precisam lançar mão de critérios como quantidade de produção, toxicidade presumida, exposição, etc.

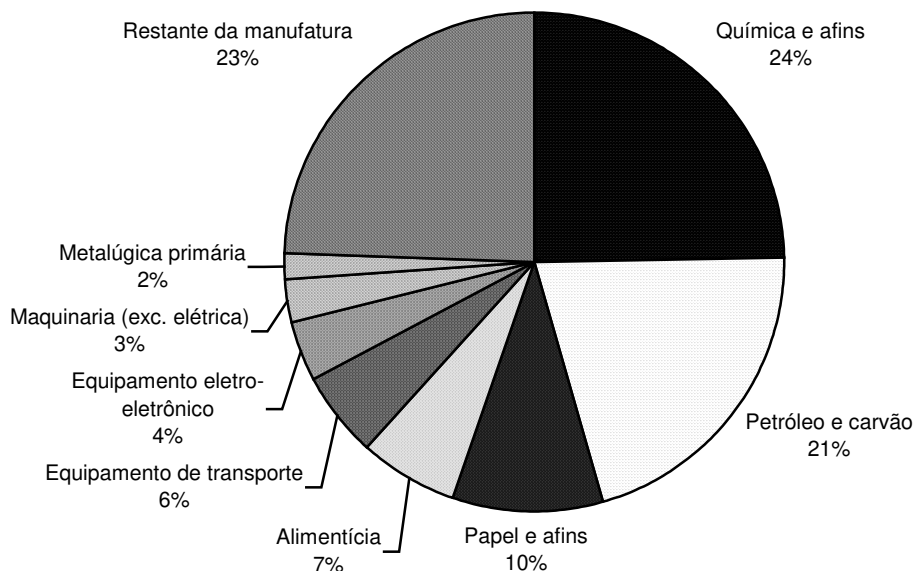
- 2) A poluição associada aos processos químicos. A indústria química destaca-se como uma grande produtora de resíduos perigosos. Nos Estados Unidos, ela foi responsável por 46% em média das emissões tóxicas de toda a indústria entre 1989 e 1994 (ver graf. 1.5). Por consequência, o setor químico também lidera os gastos com abatimento de poluição nos EUA (em 1994, ver graf. 1.6). Problemas como toxicidade e cumulatividade já colocados em relação aos produtos químicos também aparecem em relação aos resíduos industriais, sendo que estes têm um papel mais direto na contaminação do ar, de efluentes líquidos e do solo. Vale comentar que indústria química emite também os óxidos de enxofre e nitrogênio, causadores da chuva ácida, e dióxido de carbono, relacionado ao efeito estufa (Chenier, 2002).

**Graf. 1.5: Contribuição da Indústria Química e afins
no Inventário de Emissões Tóxicas dos EUA (1990-1994)**



Fonte: US Census Bureau (1997)

**Graf 1.6: Distribuição do Gasto com Abatimento de Poluição
pela Indústria dos EUA em 1994
(Total: 26,3 US\$ bilhão)**



Fonte: US Census Bureau (1997)

- 3) Os riscos de segurança associados às plantas químicas. A ocorrência de grandes acidentes em plantas químicas (ver quadro 1.5) marcou a imagem da indústria química como uma atividade de alto nível de risco e periculosidade. Frequentemente, as plantas químicas operam em condições extremas de temperatura e pressão, com grande volumes de materiais perigosos, o que constitui um risco para os seus trabalhadores e para as intermediações dessas fábricas (Heaton, 1994; Baram e Dillon, 1993).

Quadro 1.5: Exemplos de Acidentes Importantes da Indústria Química

Tipo de acidente/material	Local	Ano
<i>Explosão e fogo</i>		
Explosão em cadeia, incluindo planta da Monsanto	Texas, EUA	1947
Explosão em planta de caprolactam	Flixbourg, Reino Unido	1974
Explosão de propileno gasosos	São Carlos, Espanha	1978
Explosão em complexo petroquímico	Channelview, EUA	1990
Explosão em planta de nitroparafina	Sterlington, EUA	1991
<i>Vazamento tóxico</i>		
Cloro	Rauma, Finlândia	1947
Amônia	Potchefstroom, África do Sul	1973
Dioxina	Seveso, Itália	1976
Metil-isocianato	Bophal, Índia	1984

Fonte: adaptado de Heaton (1994) e Chenier (2002)

Este trabalho trata justamente das perspectivas da indústria química em responder dentro de sua dinâmica inovativa aos desafios que a sua própria problemática ambiental impõe. Neste capítulo, foi possível 1) seguir a evolução da base tecnológica e da estrutura dessa indústria e concluir que as demandas de ordem ambiental vindas do governo e da sociedade civil tornaram-se mais fortes justamente quando o setor químico perdia uma parte importante do seu dinamismo técnico e econômico, e 2) ter uma noção da diversidade dos produtos, das empresas e das estratégias na indústria química atual. Estes são tópicos fundamentais para as nossas análises nos capítulos posteriores.

CAPÍTULO 2

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA E A QUESTÃO AMBIENTAL: UMA REVISÃO DA CONTRIBUIÇÃO DA ECONOMIA EVOLUCIONISTA E NEOSCHUMPETERIANA E LINHAS DE ANÁLISE PARA O CASO DO SETOR QUÍMICO

O modo com que a dimensão ambiental pode ser internalizada nos processos de inovação tecnológica é o tema geral deste capítulo. Com o intuito de obter elementos para análise, será feita, na primeira seção, uma revisão teórica da literatura evolucionista e neoschumpeteriana, procurando identificar restrições e oportunidades para inovações ambientalmente amigáveis. Já a segunda seção, busca aplicar esses elementos teóricos ao setor químico.

A revisão teórica empreendida aqui não se pretende exaustiva, concentrando-se nos tópicos úteis para a análise da indústria química. Tal revisão é dividida em três partes: a primeira trata dos efeitos de *lock-in* (ou trancamento) que favorecem as tecnologias convencionais em detrimento das tecnologias mais limpas, tema estudado principalmente por R. Kemp e L. Soete. A segunda parte apresenta o *framework* evolucionista proposto por A. Romeiro e S. Salles-Filho para a compreensão do processo de inovações tecnológicas sob restrição ambiental. Por sua vez, a terceira seção resume a discussão sobre as implicações ambientais do paradigma técnico-econômico da informação, tema tratado por C. Freeman.

Os elementos teóricos estudados servirão de base para a seção seguinte, em que serão discutidas linhas de análise para o caso do setor químico. Retomando as características principais da dinâmica inovativa dessa indústria, vistas no primeiro capítulo, serão apontadas oportunidades e barreiras para a incorporação das demandas ambientais a partir dos seguintes aspectos: inovação de produto, inovação de processo, alto grau de encadeamento industrial, alta intensidade de capital e P&D, perfil de empresa, e, por fim, novas tecnologias. Serão construídas também hipóteses de trabalho, municiando, assim, o estudo da substituição dos CFCs presente no capítulo posterior.

2.1 Inovação Tecnológica e Questão Ambiental: uma Revisão da Contribuição Teórica da Economia Evolucionista e Neoschumpeteriana

Considera-se aqui a economia evolucionista e neoschumpeteriana o corpo teórico construído por autores como R. Nelson, N. Winter, C. Freeman e G. Dosi, os quais, seguindo J. Schumpeter, colocaram a inovação tecnológica como ponto central de análise. Recentemente, trabalhos usando essas referências teóricas abordaram a questão do meio ambiente e mudança técnica. A revisão feita a seguir tem como objetivo apontar e organizar essa literatura de modo a servir para o estudo subsequente da indústria química.

2.1.1 *Lock-in* e Tecnologias Sujas

2.1.1.1 A Problemática

A série de trabalhos de Kemp e Soete²¹ é uma tentativa pioneira da utilização da teoria econômica evolucionista para a análise da questão ambiental. A principal tese desses autores é que as inovações que incorporam a variável ambiental tenderiam a seguir as mesmas trajetórias tecnológicas anteriores, ou seja, dificilmente constituiriam inovações radicais. Tais trajetórias dizem respeito à exploração continuada de potenciais técnicos e *trade-offs* econômicos de uma dada tecnologia. As trajetórias tecnológicas podem apontadas em níveis “gerais” — tendência à mecanização, exploração de economias de escala —, como também podem caracterizadas mais especificamente segundo cada tecnologia, como, por exemplo o melhoramento da razão propulsão/peso nos motores de aviões. A exploração das trajetórias tecnológicas dar-se-ia através de arcabouços cognitivos que delimitariam os problemas a serem considerados e os procedimentos de sua resolução, tais arcabouços relacionam-se, simplificadamente, aos regimes ou paradigmas tecnológicos (Nelson e Winter, 1977; Dosi, 1982).

Inovações incrementais podem ser entendidas como mudanças menores através da exploração simples das trajetórias correntes, em contraposição, as inovações radicais

²¹ Kemp e Soete (1990, 1992), Kemp (1994, 1997). Deve-se observar que Kemp (1997) serve também de consolidação de alguns dos trabalhos anteriores..

trazem um elemento de descontinuidade (Freeman e Perez, 1998). Uma ilustração clássica de ruptura ou descontinuidade tecnológica é dada por J. Schumpeter:

“Adicione sucessivamente quantas diligências quiser, com isso nunca terá uma estrada de ferro.”

(Schumpeter, 1997 [1934], p. 75)

Para justificar a tendência à introdução de inovações incrementais no caso de mudanças técnicas ligadas à questão ambiental, Kemp e Soete não se baseiam tanto nos elementos teóricos centrais da economia evolucionista, como seleção e ambiente, mas sim na literatura que aponta as vantagens das tecnologias já adotadas em relação às novas. Essas vantagens são atribuídas pelos autores aos “efeitos dinâmicos de aprendizagem e escala” (Kemp, 1997, p. 269) que gozam as tecnologias já estabelecidas. Esses efeitos, muitos deles estudados no estudo do *lock-in* (Arthur, 1989), serão aqui resumidos pelos seguintes aspectos:

- a) As tecnologias já estabelecidas aproveitam-se de diversos modos de aprendizagem acumulada: *learning by doing, by using, by interacting*. Esses diversos tipos de aprendizado determinam ganhos de eficiência e adaptação ao usuário, ganhos que as tecnologias novas, por seu caráter incipiente, não podem oferecer.
- b) Economias de escala são outro tipo de vantagem que as tecnologias já adotadas usufruem em relação às novas.
- c) As tecnologias já adotadas também podem gozar de “externalidades de rede” (Katz e Shapiro, 1986) baseadas em infra-estrutura — como assistência técnica e redes de abastecimento — e nos números de usuários que já usam a tecnologia. A adoção de uma alternativa técnica pode ser inibida apenas pelos custos de adaptação dos participantes da rede em que está inserida. Um exemplo seria hegemonia perene do teclado do tipo QWERT em relação a suas opções (David, 1985).
- d) Relacionada aos dois itens acima, a introdução de uma tecnologia nova possui um caráter destruidor de competências, de externalidades de rede e de capital já investido nas tecnologias antigas.

- e) Kemp chama a atenção também para aspectos institucionais e sociais: estilos de vida, hábitos dos consumidores e aparatos regulatórios, por exemplo, podem favorecer as tecnologias já adotadas, por sua melhor adaptação a elas.

Os aspectos acima indicados representam pontos críticos para qualquer inovação e não somente para aquelas inovações relacionadas a tecnologias limpas. Kemp e Soete, porém, afirmam que a mudança relacionada a tecnologias para diminuição de poluição, seja do tipo fim-de-linha ou integrada ao processo, difere substancialmente da mudança tecnológica “normal”, voltada para “a sucessão de técnicas de produção novas e mais eficientes” (Kemp e Soete, 1992, p. 251). Para esses autores, a variável ambiental ainda seria um fator fraco para transpor as barreiras associadas aos custos, à incerteza de *performance* e demanda, e à falta de conhecimento que estariam especialmente envolvidos com o desenvolvimento e adoção de produtos e processos limpos. É salientada também a probabilidade de que o governo restrinja as condições de apropriabilidade das tecnologias limpas devido ao interesse público destas, o que representaria um desestímulo adicional às empresas.

Em vista de todos os obstáculos às tecnologias verdes, Kemp chama a atenção para a complexidade da mudança de grandes sistemas tecnológicos, a exemplo do sistema energético baseado nos combustíveis fósseis, no qual várias tecnologias estão imbricadas.

2.1.1.2 Escapando do *Lock-in*

Kemp e Soete são céticos em relação à propensão das firmas adotarem tecnologias limpas autonomamente:

Produzir de forma mais limpa geralmente custa dinheiro, apesar disso ser eventualmente compensado por economias nos *inputs* ou nos custos de disposição de lixo. Portanto, o controle e prevenção de poluição, que são desejáveis do ponto-de-vista social, terão geralmente um efeito negativo na competitividade e nos lucros da firma. Apesar das firmas poderem estar aumentando o seu sentimento de responsabilidade pelos danos causados ao meio ambiente, a produção mais limpa não representa um objetivo *per se* dentro das companhias. Como consequência, a decisão de adotar essas tecnologias depende fortemente na regulação governamental.

Kemp e Soete (1992, p.450).

Cabe assim analisar o caso da ação do governo. Apesar de indicar diversas mudanças tecnológicas que ocorreram devido a regulamentações sobre várias substâncias nocivas, Kemp afirma que “na maioria dos casos, as políticas públicas levam à difusão das tecnologias existentes com limitados ganhos ambientais e, às vezes, as políticas falharam mesmo nesse caso.” (Kemp, 1997, p. 249). Contudo, apesar do relativo pessimismo, Kemp não descarta os possíveis efeitos positivos de instrumentos de política pública, como subsídios para P&D, mecanismos econômicos de política ambiental, introdução de padrões tecnológicos e ambientais que podem favorecer a inovação e difusão de tecnologias limpas.

Uma estratégia especialmente analisada por Kemp (1997) é o gerenciamento de nichos de mercado. O nicho constituir-se-ia de um espaço de mercado protegido para o desenvolvimento de tecnologias novas. Para enfrentar as barreiras a essas tecnologias, a constituição desse nicho precisa se dar através uma política pública integrada que poderia utilizar elementos como taxação e criação de rede de atores. O objetivo principal desse nicho de mercado seria o melhor desenvolvimento da tecnologia, apoiado:

- 1) No melhor entendimento das necessidades do usuário.
- 2) Na identificação e resolução de problemas técnicos específicos.
- 3) Na obtenção de redução de custos através de maior escala.
- 4) E no apoio de atores diversos como firmas, institutos de pesquisa, agências públicas e usuários.

Kemp indica também algumas questões críticas no uso de nichos de mercado. Há, por exemplo, o risco de proteção inadequada, seja pelo exagero — que favorece o desperdício de recursos, ou pela pouca proteção — a qual determina o fracasso do nicho. Outra questão crítica é a falta de garantia de sucesso, especialmente no curto prazo; o que demanda a escolha de tecnologias com grande potencial de desenvolvimento e uma visão de longo termo.

Exemplos desses nichos de mercado provêm da iniciativa do estado da Califórnia e da Holanda para o desenvolvimento do carro elétrico. Num estudo sobre esse tema (Cowan e Holtén, 1996),²² são elencados seis fatores-chave que, se existentes ou reforçados, poderiam levar à quebra do *lock-in* do carro à gasolina:

²² Ver também Schot *et al.* (1994)

- 1) Crise na tecnologia existente.
- 2) Regulação governamental.
- 3) *Breaktrough* tecnológico produzindo ou criando expectativas de um *breakthrough* de custo.
- 4) Mudanças no gosto dos consumidores.
- 5) Nichos de mercado.
- 6) Descobertas científicas.

Para além do caso do carro à gasolina, esse quadro de fatores fornece uma visão geral dos caminhos que podem enfraquecer ou quebrar um *lock-in* tecnológico. A especificidade do fator ambiental nesse quadro de fatores poderia ser encontrada na regulação especial dedicada ao meio ambiente, na eventual preferência dos consumidores por produtos mais limpos, no papel da ciência em diagnosticar problemas ambientais, e nas iniciativas públicas para criação de nichos de mercado para tecnologias limpas.

2.1.2 Um *Framework* Evolucionista

Centrando-se mais nos elementos teóricos da economia evolucionista de autores como Nelson e Winter, o trabalho de Salles-Filho e Romeiro (1997) oferece uma visão completar de como as tecnologias mais limpas podem ser geradas e adotadas.

Segundo a economia evolucionista (Nelson e Winter, 1982), as inovações podem ser entendidas como mutações das rotinas (equivalente aos genes) integrantes das firmas. O termo inovação aqui se refere não apenas à tecnologia “dura”, mas também às mudanças organizacionais. Esse fenômeno de mutação dar-se-ia pelos mecanismos de busca (*search*) empreendidos pelas próprias firmas. Em tal mecanismo estariam presentes heurísticas, regras informais e, igualmente, rotinas. A P&D seria um exemplo de ação integrante do mecanismo de busca, não a única, considerando os diversos tipos de atividades e decisões envolvidas nas firmas para se realizar uma inovação. As empresas sofreriam uma constante seleção pelo seu ambiente, o qual equivaleria não só ao mercado mas ao contexto sócio-institucional em que as firmas se encontram. Duas características importantes do processo de busca e seleção são a incerteza e a cumulatividade.

Na busca de inovações pelas firmas, Salles-Filho e Romeiro destacam o papel da exploração das competências internas e específicas à firma, da exploração de oportunidades tecnológicas (Dosi, 1982) e oportunidades de diversificação (Penrose, 1973), e, por fim, da exploração dos sinais do meio ambiente de seleção. Os autores enfatizam a interação entre o mecanismo de busca e o processo seletivo, o que se dá pela capacidade de aprendizagem das firmas e pela influência das suas ações no ambiente de seleção.

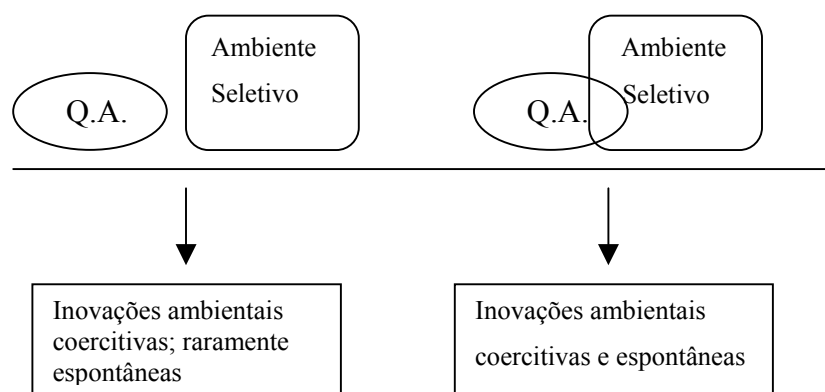
Em vista da abrangência que a questão ambiental conquistou nas últimas décadas, Salles-Filho e Romeiro argumentam que:

“(...) a partir do momento em que a busca de inovações passa a se dar em um meio ambiente seletivo, que tem como um dos seus delimitadores a questão ambiental, não há porque imaginar que esse processo de busca não vá levar em conta, objetivamente, a exploração de trajetórias tecnológicas ligadas a esse “constrangimento” dos ambientes seletivos.”

(Salles-Filho e Romeiro, 1997, p. 101)

Contudo, a incorporação da questão ambiental pelo ambiente seletivo seria parcial, tanto pela complexidade dessa problemática, quanto pelos próprios preceitos da ordem econômica que possuem outras prioridades que não as dadas pela ordem ecológica (ver fig. 2.1).

Fig. 2.1: Representação Esquemática da Incorporação da Questão Ambiental no Ambiente Seletivo



Fonte: Adaptado de Salles-Filho e Romeiro (1997)

Mesmo de forma parcial, essa internalização abriria espaços para inovações que viessem não apenas por medidas coercitivas, impositoras de custos, mas também por ações espontâneas das firmas. Tal caráter espontâneo ou endógeno seria motivado pelas

perspectivas de criação de assimetrias competitivas ao serem antecipadas regulamentações ou pressões externas. Um exemplo dessas perspectivas é o aproveitamento de eventuais preferências por produtos mais amigáveis ao meio ambiente por parte dos consumidores.

É interessante aqui recuperar os conceitos de universos controvertidos e estabilizados em relação a questões ambientais propostos por Godard (1993) e incorporado no referencial econômico evolucionista por Salles-Filho e Romeiro (1997) e Corazza (2001). A diferenciação dos universos controverso e estabilizado tem quatro parâmetros decisivos (adaptado de Godard (1993)):

- 1) O modo de percepção do problema. No universo controvertido, a percepção do problema ambiental é mediada por um conhecimento ainda em construção e reelaborado continuamente por especialistas e outros agentes como administradores, órgãos profissionais e mídia. Em um universo estabilizado, o problema ambiental chegaria de forma mais direta à consciência coletiva..
- 2) A natureza dos interesses em jogo. Num universo controverso, está em causa os interesses de partes ausentes do debate — gerações futuras, países estrangeiros, espécies animais —, como também o modo representar esses interesses. Em um universo estabilizado, são relevantes apenas os interesses dos agentes presentes, os quais possuem instrumentos claros para expressar as suas preferências, tais como mercados, normas, manifestações públicas, etc.
- 3) O grau de reversibilidade dos fenômenos em questão. Dentro de um universo controverso, alguns agentes apontam para uma irreversibilidade potencial dos danos ecológicos em causa, havendo assim a necessidade de se agir preventivamente. Em um universo estabilizado, os efeitos práticos das ações propostas são compatíveis com o horizonte temporal dos danos ecológicos potenciais.
- 4) O grau de estabilidade do conhecimento científico pertinente. Um universo controverso é marcado pela incerteza científica sobre a natureza do problema ambiental em debate, assim como as suas causa e conseqüências. Já dentro de um universo estabilizado, o conhecimento científico é estabilizado e compartilhado pelos agentes, sendo que é possível mais claramente apontar responsabilidades.

Pode-se pensar que os universos relacionados às questões ambientais reais recaem em algum ponto entre os graus extremos acima descritos de controvérsia e estabilidade. Nesse sentido, deve ser levada em conta do grau de controvérsia/estabilidade de uma determinada questão ambiental ao longo do tempo. Especialmente quando são formuladas em seu primeiro momento, as questões ambientais estão cercadas por um alto grau de incerteza e são mediadas por um conhecimento científico ainda em formação em seus aspectos essenciais. Nesse universo controverso, a própria existência do problema é motivo de disputa por setores da sociedade e são muito pouco claros os parâmetros com os quais medidas de ação devem ser tomadas. A partir do debate entre os agentes, algumas questões ambientais ganhando progressivamente legitimidade e estabilidade. Em um universo estabilizado, há um acordo mínimo por diversas partes em relação à natureza do problema ambiental em questão, considera-se o conhecimento sobre o tema minimamente estabelecido e as tomadas de decisão acontecem com uma melhor visão sobre os danos possíveis, causas e responsabilidades. Mesmo de pois de uma fase de estabilização alguns problemas ambientais podem voltar a ser questionados, por exemplo, por fato científicos novos, pelo aumento ou diminuição da preocupação sobre o meio ambiente pela sociedade civil e por inflexões na política ambiental.

Nos termos da economia evolucionista, universos controversos ou estabilizados podem ser identificados como características do ambiente de seleção da firmas. Assim sendo, as empresas necessitam estabelecer estratégias em situações com graus variáveis de controvérsia/estabilidade e, além disso, elas também são partes no debate ambiental e as suas estratégias afetam as trajetórias dos universos de percepção. Podem ser esperadas das empresas estratégias que buscam desqualificar o problema ambiental em debate, como também estratégias passivas que mais observam o conflito e agem apenas conforme o necessário, ou até estratégias antecipatórias, que legitimam o problema e promovem ações antes mesmo que medidas institucionais sejam postas.

Considerando mais propriamente as ações institucionais, Godard (1993) e Salles-Filho e Romeiro (1997) ressaltam a importância do *timing* relacionado aos processos de inovação tecnológica e aos fenômenos naturais. Medidas normativas que estabeleçam um prazo curto tendem a favorecer mudanças técnicas menores como tecnologias de fim-de-linha ou inovações incrementais. Como exemplo, tem-se a regulamentação alemã de

emissões gasosas em carros, a qual favoreceu a instalação de filtros catalíticos ao invés de mudanças no *design* do motor. Se medidas normativas de longo prazo dão espaço a inovações de maior fôlego, deve-se ter em vista, por outro lado, o horizonte o temporal dos danos ambientais e a sua capacidade de reversão. Assim gestão do adequada do *timing* pelos tomadores de decisão é fundamental para não restringir demais o escopo das soluções técnicas e, ao mesmo tempo, minimizar os danos ambientais em questão.

Se a percepção das questões ambientais e os parâmetros para a tomada de decisão possuem uma dinâmica ligada ao grau de estabilidade/controvérsia do debate público, deve-se pensar que existe também uma variabilidade na consideração das soluções técnicas propostas. Essa perspectiva dinâmica relacionada aos parâmetros de avaliação dos problemas ambientais e, por conseqüente, das soluções técnicas substancia a idéia de “alvo móvel”, conforme é colocada por Corazza (2001). Ainda segundo a autora:

[...] se o desempenho ambiental das tecnologias apenas pode ser avaliado comparativamente (de um lado, umas com relação às outras e, de outro, com relação a parâmetros de qualidade ambiental - que sempre evoluem), somos levados a concluir que, em termos de desempenho ambiental, as tecnologias poderão apenas ser "mais limpas", nunca se colocando propriamente como uma solução definitiva para determinado problema ambiental.

Corazza (2001, p. 180)

Ou seja, as tecnologias não podem ser consideradas intrinsecamente “suja” ou “limpa.” Esses conceitos são necessariamente relativos à comparação das vantagens e problemas de cada tecnologia e ao contexto de avaliação dos problemas ambientais em um determinado momento. De forma geral, em uma perspectiva evolucionista, salienta-se o contexto dinâmico em que devem ser analisadas a inovação tecnológica, as questões e soluções ambientais. Como será visto a seguir, essa perspectiva dinâmica será reforçada a partir do conceito de paradigma técnico-econômico

2.1.3 O Paradigma Técnico-econômico da Informação e suas Implicações para o Meio Ambiente

O conceito de paradigma técnico-econômico (Freeman e Perez, 1988) baseia-se fundamentalmente na proposição que a dinâmica tecnológica da economia não se dá continuamente ao longo do tempo mas sofre, por vezes, descontinuidades profundas, com impactos gerais no conjunto da estrutura econômica. Essas descontinuidades, caracterizadas como mudanças de paradigmas técnico-econômicos, seriam causadas pelo aparecimento de um conjunto de inovações técnicas e organizacionais cujas aplicações têm caráter *pervasive* (abrangentes) por todos os setores econômicos.

Nessa perspectiva, uma mudança de paradigma técnico-econômico estaria ocorrendo em torno da difusão ampla das tecnologias baseadas na micro-eletrônica, da orientação da atividade econômica em direção a uma grande intensidade de uso da informação e comunicação e também através da adoção dos princípios da produção flexível. Na esteira da difusão dessas tecnologias, o paradigma dominante até recentemente — tendo a produção em massa e o poder energético do petróleo como elementos centrais — vem sendo substituído por um novo, tendo a informação como seu elemento central.

Uma primeira implicação da sucessão de paradigmas técnico-econômicos é que os problemas ambientais que cada um enfrenta não são necessariamente do mesmo tipo e da mesma intensidade. Freeman (1992) considera que o erro dos autores de “Os Limites do Crescimento” — que preconizaram a necessidade de crescimento zero para impedir um colapso do sistema ecológico (Meadows *et al.*, 1973) — foi confundir “os limites de um paradigma de desenvolvimento em particular com os ‘limites ao crescimento’ do sistema em geral” (Freeman, 1992, p.166). Ou seja, a problemática ambiental tem a sua dinâmica vinculada também a processos de mudanças estruturais de ordem técnico-econômica. Tal interdependência coaduna-se com a noção de “externalidade dinâmica” expressa por Nelson e Winter:²³

“Inseticidas persistentes não eram um problema oitenta anos atrás. Esterco de cavalo poluía as cidades mas as emissões de automóveis não. O problema canônico da “externalidade” da teoria evolucionista é a geração, pelas novas tecnologias, de custos e benefícios que as antigas estruturas institucionais ignoram.”

(Nelson & Winter, 1982, p. 368, trad. do Autor)

²³ Externalidade na teoria econômica do meio ambiente pode ser simplificada como referente a custos e benefícios não previstos pelo mercado formal, resultando em uma diferença entre custo/benefícios privados e sociais (Bellia, 1996).

Retomando a discussão do marco evolucionista colocado na subseção anterior, podemos perceber a idéia de uma dinâmica interdependente entre novas tecnologias e novos paradigmas técnico-econômicos, danos ambientais potenciais, percepção dos problemas ambientais e parâmetros de avaliação, ambiente de seleção sócio-econômico, ações de busca e estratégica das firmas, soluções técnicas específicas. Essa dinâmica interdependente e complexa configuraria um processo co-evolutivo (Cf. Schot *et al.*, 1994; Corazza, 2001).

Voltando ao tema central desta subseção, o caráter profundo das mudanças promovidas pelo paradigma da informação leva à questão de suas implicações ambientais gerais. Primeiramente, podem ser identificados alguns fatores que apontam para impactos ambientais favoráveis, decorrentes da economia de energia e de matérias-primas ensejados pelo novo paradigma, entre eles (adaptado de Freeman, 1992):

- 1) Melhor controle e monitoramento de processos e sistemas: a micro-eletrônica possibilita um avanço na otimização de processos e sistemas, minimizando a relação *input/output* e *resíduo/output*, e também facilitando o controle de qualidade dos produtos.
- 2) Miniaturização: a simplificação e portabilidade de vários eletrodomésticos, equipamentos e dos próprios computadores proporcionadas pela introdução e intensificação do uso da micro-eletrônica exemplificam com propriedade uma tendência poupadora de matérias-primas, ao mesmo tempo em que se verifica um aumento significativo da eficiência desses aparelhos.
- 3) Economia no transporte: são abertas possibilidades em certos setores econômicos para a substituição do transporte de pessoas e suportes físicos pelo transporte de informação (*home banking, home work, e-mail*, etc.), eliminando intermediários e relaxando a necessidade de concentração espacial.
- 4) Consumo de produtos "desmaterializados": o paradigma da informação associa-se a um estilo de consumo de bens culturais, de informação e entretenimento que demanda menos materiais e energia em comparação aos bens de consumo duráveis ou semiduráveis tradicionais.

Por essas consequências positivas, pode-se deduzir que introdução do paradigma técnico-econômico da informação tem contribuído potencialmente para a diminuição da intensidade de gasto energético e de materiais que é observado nos países economicamente centrais, fenômeno freqüentemente estudado no campo temático da desmaterialização (Herman *et al.* 1989, Bernardini e Galli, 1993).

Apesar do contexto estimulante vindo dos efeitos poupadores de energia e de matérias-primas, Freeman (1992) relativiza a extensão real desses impactos benéficos *vis-à-vis* a persistência de vários problemas ambientais mesmo em países que estão avançados no uso das tecnologias de informação. Freeman e Soete (1994) consideram a hipótese de tomar o paradigma técnico-econômico da informação como um estágio intermediário, o qual deveria ser sucedido por um paradigma técnico-econômico “verde”, em que a questão ambiental seria incorporada de forma mais profunda na estrutura econômica. Contudo, a análise fornecida por Freeman (1992) sobre esse paradigma “verde” é sobretudo especulativa não sendo identificados os seus elementos constituintes.

Como **comentário geral** a essa revisão teórica, podem ser percebidos na economia evolucionista/neoschumpeteriana elementos que permitem identificar melhor as barreiras e os incentivos para a incorporação da variável ambiental na inovação tecnológica. Como é colocado na discussão sobre os efeitos de *lock-in*, uma tecnologia pode oferecer um melhor desempenho ambiental, porém ela precisa competir com várias vantagens que as tecnologias convencionais obtiveram por terem sido adotadas há mais tempo. Nesse sentido, quanto mais atrativos a nova tecnologia puder oferecer, ultrapassando, inclusive, o quesito ambiental, mais chances ela terá de vencer as barreiras de *lock-in*.

Na confluência entre oportunidades econômicas e de ordem ambiental, existem perspectivas para ações espontâneas de empresas por meio de seus mecanismos de busca. Assimetrias competitivas podem ser conseguidas por processos que utilizem melhor materiais e energia e pelos produtos diferenciados no mercado por sua *performance* ambiental. O paradigma das tecnologias de informação, por sua vez, revela potenciais interessantes de renovação técnica. Tais tecnologias não traziam em sua concepção um viés ambiental intrínseco, mas abriram possibilidades de menor utilização de material e energia

e de ganhos de eficiência em geral em vários campos da atividade econômica, incluindo setores menos dinâmicos. Na seção seguinte, buscar-se-á identificar melhor as potencialidades e obstáculos do setor químico para gerar produtos e processos mais limpos.

2.2 Oportunidades e Restrições para a Incorporação da Variável Ambiental na Indústria Química: Linhas e Hipótese de Análise

O debate sobre inovação e meio ambiente na indústria química tende a se concentrar na questão se as regulamentações ambientais inibem ou não a mudança técnica. Apontando que os gastos com controle de poluição no setor químico aumentaram mais de 5 vezes entre 1975 e 1992 e que as despesas nessa área têm uma perspectiva de crescimento, o Council of Competitiveness (1996) afirma que “a P&D de longo prazo é uma das vítimas principais dessas tendências” (p. 4, tradução do Autor).

As despesas ambientais no setor químico, de fato, mostram-se expressivas. Calcula-se que a indústria química européia verteu 3,1% do valor das vendas em gastos relacionados ao meio ambiente em 1998 — enquanto aplicava 6,3% em P&D (CEFIC, 2000). A indústria química pode ser classificada, juntamente com a indústria de petróleo e carvão, como uma das mais afetadas em termos de gastos pelas leis ambientais norte-americanas (Jaffe *et al.*, 1995). Em 1992, o setor de produtos químicos e afins despendeu 12,9% dos investimentos em capital e 1,3% dos custos operacionais com abatimento de poluição. Para se ter uma comparação, o setor eletro-eletrônico despendeu 2,8% e 0,4% respectivamente.²⁴

Entretanto, a visão das regulamentações ambientais como uma simples imposição custosa, que poderia minar a competitividade e a P&D, não é compartilhada nem mesmo dentro da indústria química. Segundo Hoffman (1996), o discurso corporativo do setor evoluiu de uma postura de confrontação nos anos setenta para uma abordagem pró-ativa a partir de 1982, assumindo princípios de responsabilidade corporativa e, inclusive, apontando oportunidades econômicas advindas com a problemática ambiental. Como exemplo, tem-se outra declaração de P. Woolard:

“O mito de que operações ambientalmente seguras sempre devem resultar em custos adicionais é falso. Nós precisamos comunicar isso ao nosso pessoal de operação, aos nossos engenheiros e aos nossos clientes.”

(Woolard, 1990 *apud* Tombs, 1993, p. 140, trad. do Autor)

²⁴ U. S. Department of Commerce (1993) *apud* Jaffe *et al.* (1995, p. 145). Questões metodológicas sobre o que é ou não uma despesa ambiental sugerem que tais números devem ser considerados não em seu valor absoluto, mas sim como um indicativo da importância dos gastos ambientais no setor químico.

O balanço efetivo entre custos e oportunidades relacionados ao meio ambiente é muito difícil de ser avaliado, como demonstram trabalhos de revisão de literatura sobre o tema (Jaffe *et al.*, 1995; Maglia e Sassoon, 1999; Mahdi, S. *et al.*, 2002). O trabalho de Jaffe *et al.* (1995) busca avaliar a influência da regulamentação ambiental na competitividade da indústria americana, na qual, como já foi visto no parágrafo anterior, o setor químico é um dos mais afetados. Os autores concluem que não há indícios na literatura que permitem dizer que há efeitos significativos nem de perda ou ganho de competitividade, seja através da análise de balanços internacionais de comércio, de investimento estrangeiro ou de fuga de capacidade instalada para países menos rigorosos em termos de regulamentação.

Maglia e Sasson (1999) tratam da indústria química e a regulamentação ambiental europeia, apontando que os estudos de caso sobre a questão são muito específicos e sem uma metodologia comparável, impedindo uma conclusão geral sobre o assunto. São citados exemplos casuais — tintas sem solventes na UE e dióxido de titânio com processo livre de sulfato nos EUA — em que regulamentações rigorosas efetivamente ajudaram as empresas a manter ou aumentar a sua competitividade internacional no sentido que anteciparam tendências de mercado. Entretanto, os autores demonstram preocupação com a grande complexidade e burocracia da regulamentação ambiental europeia e igualmente com as dificuldades e custos excessivos que essa regulamentação traz, especialmente para as pequenas e médias empresas (PME). Mahdi *et al.* (2002) também partem da preocupação sobre os efeitos da legislação europeia e concordam sobre a falta de evidências conclusivas sobre impactos positivos ou negativos na dinâmica inovativa do setor químico, em especial por ser muito difícil separar o fator ambiental de outros condicionantes da mudança tecnológica. Não obstante, eles encontram algum suporte na literatura para identificar um efeito negativo inicial no número de inovações introduzidas, persistindo a falta de evidência sobre os efeitos a médio e longo prazo das regulamentações ambientais.

Não está entre os objetivos desta tese tomar partido diretamente nesse debate. Um menor ritmo de introdução de inovações pode ser justificado para se evitar impactos negativos na saúde humana e no meio ambiente, enquanto que devem ser evitados custos e burocracia desnecessários aos objetivos de proteção ambiental. A questão do desenho de políticas ambientais que arranjem de forma adequada custos diretos para o setor produtivo,

benefícios gerais para a sociedade, riscos e incertezas, está fora do escopo deste trabalho. Contudo, mesmo o debate sobre a inibição/estímulo das regulamentações à mudança tecnológica beneficiar-se-ia de uma consideração melhor das especificidades do setor químico e da identificação das suas barreiras e oportunidades principais às inovações ambientalmente amigáveis. Com esse intuito, serão exploradas a seguir algumas linhas de análise, aproveitando tópicos sobre a evolução histórica do setor químico e sobre a sua diversidade (cap. 1) junto a elementos fornecidos pela economia da inovação (seção 2.1).

2.2.1 Inovações de Produto

Conforme visto no cap. 1 (seção 2.4), a maturidade tecnológica revela-se especialmente pela diminuição de inovações radicais de processo (Walsh, 1984). Ou seja, é na inovação de produto em que as barreiras para a incorporação da variável ambiental devem ser mais altas em uma indústria madura. O setor químico apresentou a partir dos anos setenta uma perda do seu dinamismo tecnológico, apresentando sinais de maturidade em vários subsetores, como petroquímica e materiais sintéticos. Entretanto, podem ser apontadas oportunidades advindas do esforço de algumas empresas químicas em diferenciar os seus *portfolios* através de produtos com *performance* específica. Dessa forma, a solução de problemas ambientais pode ser uma linha de desenvolvimentos de produtos de maior valor agregado, abrindo espaço para ações espontâneas das empresas. O quadro 2.1 exemplifica alguns produtos “verdes” desenvolvidos pela ICI.

Quadro 2.1: Exemplos de Produtos Ambientalmente Amigáveis (ICI)

Nome comercial	Aplicação
Aquabase	Substitui solventes orgânicos na pintura <i>spray</i> de carros
Avocer	Permite que a mistura etanol/metanol seja usada no lugar do diesel
Biopol	material biodegradável manufaturado a partir do açúcar que pode substituir plásticos em garrafas
Ecosyl	Substitui os ácidos fórmico e sulfúrico na fermentação de silagem
‘Synec’- TAL	Substitui compostos de cromo na indústria de couro

Fonte: Essery (1993)

Dessa forma, na área de especialidades e química fina, há um espaço potencial de confluência de estratégias empresarias de diferenciação e diversificação de produto e a

incorporação da variável ambiental. No caso das *commodities*, fortemente atingidas pela maturidade técnica, poderiam ser apontadas possibilidades semelhantes nas estratégias de “descomoditização” (Quintella, 1993). Deve-se salientar, porém, que a viabilidade comercial dessas estratégias depende da disposição do mercado em se adaptar tecnicamente aos novos produtos e eventualmente pagar um sobrepreço por sua *performance*. O Biopol (quadro 2.2), por exemplo, é um material mais caro que os plásticos convencionais e encontra o seu mercado na Alemanha, país em que o consumo “verde” estaria mais desenvolvido (Essery, 1993). Outra consideração a ser feita é que a agregação de valor por diferenciação de produto pode ser feita apenas com inovações incrementais, realizando, por exemplo, pequenas modificações na molécula original. Assim, uma hipótese a ser testada é *se a incorporação da variável ambiental nos produtos da indústria química tenderia a se dar por inovações incrementais, mantendo as trajetórias tecnológicas correntes*.

2.2.2 Inovações de Processo

A introdução de inovações de processo é também afetada pelo processo de maturação técnica, porém em grau menor. Ainda em 1985, foram introduzidas mudanças importantes no processo de produção de polietileno, um produto maduro (Landau e Rosenberg, 1990), e dentro da catálise, ainda há um campo profícuo para a pesquisa de processos mais eficientes (Quintella, 1993). Como mostra o histórico da indústria química desde o séc. XIX, a introdução progressiva de inovações incrementais é fundamental para o aumento de eficiência das plantas de produção. Pode ser percebido aqui um outro ponto de convergência econômica e ambiental: a busca por inovações de processo que maximizem a eficiência do uso de matérias-primas e energia e que, assim, minimizem a geração de resíduos e emissão de poluentes. Reduções nos custos operacionais podem ser uma arma especial na competição em produtos homogêneos, como *commodities* e química fina, em que a diferenciação de preço é o fator-chave.

O quadro 2.2 sumaria algumas fontes de resíduos em uma planta química. Tendo em vista a minimização de resíduos, devem ser consideradas não apenas mudanças de *hardware* mas também em técnicas de gerenciamento de produção que evitem desperdícios, erros de operação, acidentes e, de forma geral, aumentem o desempenho da planta.

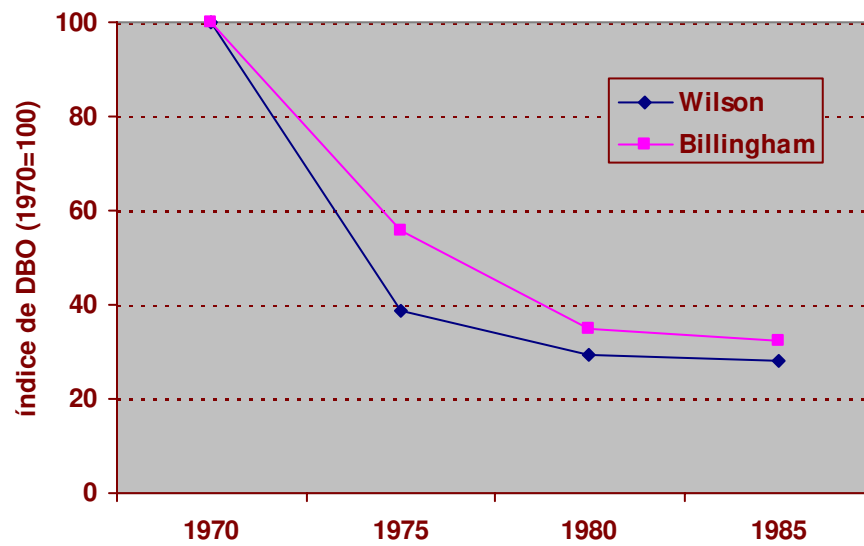
Quadro 2.2 Fontes de Resíduos em uma Planta Química

Matérias-primas que não reagiram
Impurezas nos reagentes
Subprodutos não desejados
Consumo de materiais auxiliares (catalisadores, óleos, solventes, etc.)
Produto fora de especificação
Materiais e resíduos de manutenção
Material gerado durante <i>startup</i> e <i>shutdown</i>
Material gerado em descontroles de processos e vazamentos
Material gerado durante manuseio, amostragem, estoque e tratamento de produtos ou resíduos
Emissões não-controladas (<i>fugitive</i>)

Fonte: Berglund e Lawson (1991)

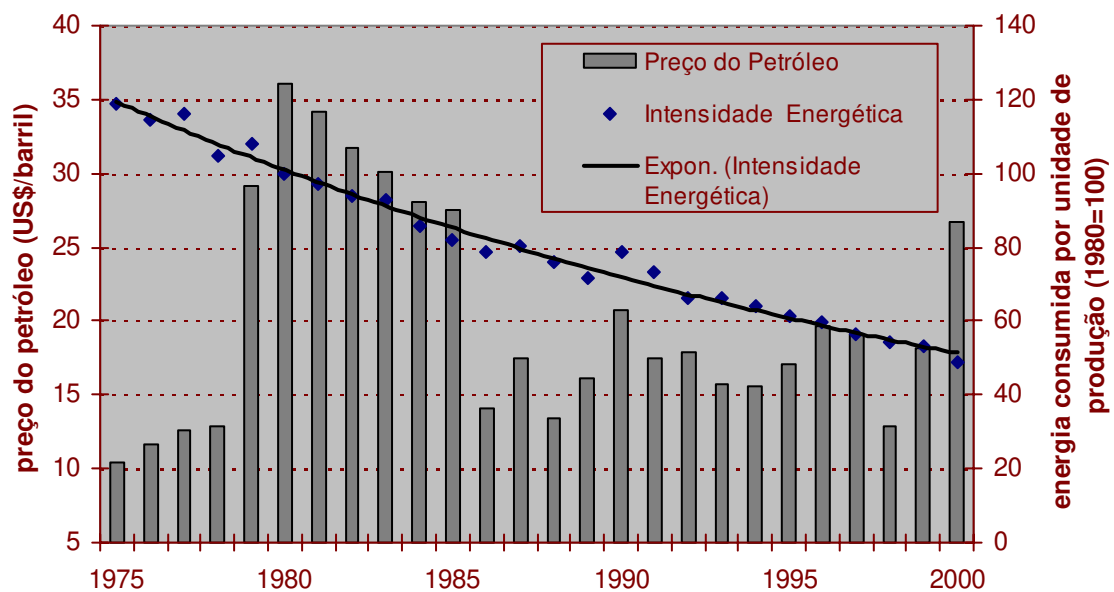
Em um cenário mais conservador, o problema de emissões tóxicas tenderia a ser resolvido apenas com adições de equipamento de fim-de-linha, como filtros e estação de tratamento de efluentes, sem haver mudanças integradas nos processos. Exemplos como o da ICI (Essery, 1993) indicam que as empresas químicas utilizam ambas as formas, (tecnologia fim-de-linha e integrada) para perseguir metas de redução de poluição. Algumas reduções significativas de emissão de poluentes nos complexos da firma inglesa foram possibilitadas pela substituição completa de plantas de ácido nítrico, sulfato de amônia e ácido teraftálico — o graf. 2.1 mostra dados de emissão equivalente em demanda biológica de oxigênio (DBO). Outros dados sobre a indústria química indicam progressos em relação à diminuição de emissão de poluentes: nos EUA o setor de químicos e afins diminuiu as suas emissões tóxicas em 30% entre 1990 e 1994 (US Census Bureau, 1997), na União Européia, o setor químico conseguiu reduzir a emissão de vários poluentes entre 1996 e 2000, em aquíferos: nitrogenados (25%), metais pesados (43%), demanda química de oxigênio (17%), no ar: dióxido de enxofre (57%), óxidos de nitrogênio (27%), orgânicos voláteis (33%) (CEFIC, 2003b). Outro indicador positivo na UE é o aumento da eficiência energética do setor químico em aproximadamente 70% entre 1975 e 2000 (CEFIC, 2003b).

**Graf. 2.1: Emissão Equivalente em DBO
em Complexos Químicos da ICI**



Fonte: Essery (1993)

Graf. 2.2: Intensidade Energética da Indústria Química Europeia



Fonte: CEFIC (2003b)

Voltando ao graf. 2.1, uma simples inspeção visual mostra que o esforço de redução na quantidade de poluentes teve resultados mais expressivos no início (1970-1975), sugerindo um comportamento de *retornos decrescentes*.²⁵ Esse mesmo comportamento pode ser observado nos dados da Hoechst discutidos por Esteghamat (1988, p. 327): entre 1985 e 1994 foram necessários investimentos cada vez mais altos para se ter uma taxa aproximadamente constante na redução de poluição. Uma explicação possível seria que as ações que buscam reduzir a carga de poluição se dão majoritariamente por inovações incrementais, as quais logram obter melhorias no desempenho dos processos, porém apresenta limites ao se manter em uma mesma base tecnológica. A introdução de inovações radicais poderia abrir espaço para saltos de eficiência. Os dados aqui expostos não são suficientes para sustentar uma conclusão, mas sugerem uma outra hipótese de análise: *a incorporação da variável nos processos da indústria química tenderia a apresentar um comportamento de retornos decrescentes, indicando um papel preponderante de mudanças incrementais*.

2.2.3 Alto Grau de Encadeamento Industrial

O papel que a indústria química tem de grande fornecedora para os mais diversos setores industriais implica que os seus produtos estão em vários sistemas ou redes técnicas, cada qual com características próprias. Ao se analisar as perspectivas de introdução de um produto ambientalmente amigável no setor químico, será necessário também compreender as possibilidades e a disposição dos seus usuários em de se adaptar a essa nova tecnologia. Pode-se dizer, dessa forma, que o setor químico sofre diversos tipos de efeitos de *lock-in*, diretamente relacionados a sua grande variedade de produtos e clientes. Há redes técnicas mais ou menos fechadas para a mudança e as alternativas técnicas geradas por um dos seus componentes podem fracassar frente a essa inflexibilidade. Como outra hipótese de análise, sugere-se que a indústria química em suas inovações mais limpas tenderá a minimizar o

²⁵ Preferiu-se não utilizar aqui o graf. 2.2 como exemplo porque a intensidade energética sofre uma influência muito direta da variação do preço do petróleo, dificultando a percepção de tendências de médio ou longo prazo. De qualquer modo, observa-se que entre 1975 e 1980, a taxa média anual de variação de intensidade energética foi de -0,74 pontos de índice, contra -0,29 entre 1995 e 2000.

grau de adaptações necessárias por parte dos seus usuários, inibindo inovações de caráter radical.

2.2.4 Alta Intensidade de Capital e de P&D

A alta intensidade de capital e a alta escala presentes nas plantas de *commodities* e *pseudocommodities* químicas podem ser vistas como um fator provável de *lock-in*, já que a troca de equipamentos ou mudanças radicais nos processos demandariam investimentos muito grandes. Assim, devido aos altos custos de inovações integradas de processo, as empresas tenderiam a instalar tecnologias final-de-linha, para garantir somente a sua conformidade a padrões de emissão de poluentes. Entretanto, conforme visto na seção acima, há incentivos para a introdução de processos mais eficientes no uso de materiais e energia tendo em vista redução nos custos, o que é importante especialmente em mercados de competição intensa de preços, como o de *commodities*.

As altas taxas de investimentos de P&D na indústria química sugerem boas perspectivas de renovação técnica em comparação a outros setores da indústria, oferecendo melhores oportunidades de incorporação do quesito ambiental em sua base tecnológica. Entretanto, essas perspectivas de renovação devem ser relativizadas por dois fatores principais. Primeiramente, mesmo fazendo investimentos em áreas de ponta como a biotecnologia, a P&D na indústria química passou, de maneira geral, a se alinhar a problemas técnicos de curto prazo, estando mais relacionada à geração de inovações incrementais (Achiladelis *et al.*, 1990; ECIB, 1993; Quintella, 1993). Em segundo lugar, os investimentos em P&D concentram-se principalmente nas áreas de química fina e especialidades (Bruno, 1995). No caso do setor de *commodities* e *pseudocommodities* é preciso ter em vista o papel das empresas de engenharia especializadas, as quais têm grande capacitação em inovações de processos (Landau e Rosenberg, 1990)

2.2.5 Perfil de empresa

As perspectivas para a introdução de inovações ambientalmente amigáveis devem variar de acordo ao perfil diferenciado das empresas dentro do setor químico. As *megaempresas* ou grandes corporações químicas possuem um *portfolio* variado com produtos com graus variados de maturidade técnica. Empresas desse tipo têm seguido estratégias de direcionamento de seu negócio para produtos com maior valor agregado, estratégia em que pode ser vantajosa a busca de melhor *performance* ambiental em diferenciação de produtos existentes e na invenção de novas especialidades químicas.

Neste último tipo de produto, concentram-se as *empresas especializadas*, as quais encontram igualmente um potencial econômico em nichos para produtos “verdes”. As *empresas especializadas* possuem uma grande capacidade de renovação técnica, porém atuam em áreas bem mais limitadas do que as *megaempresas*. A situação das *empresas de produtos de consumo* é peculiar, uma vez que estão mais diretamente ligadas ao mercado final de consumo. Desse modo, as preferências dos consumidores finais terão grande determinação no sentido de incentivar essas empresas a mudarem os seus produtos.

As *empresas orientadas para a produção* são as que mais sofrem os problemas de *lock-in* relacionados à área de *commodities*: maturidade técnica, redes técnicas estabilizadas e alta intensidade de capital. Como oportunidades para incorporação da variável ambiental podem ser citadas a diferenciação de produto do caráter de *commodities* para *pseudocommodities* e a busca de processos mais eficientes.

2.2.6 O Impacto das Novas Tecnologias

No cap. 1, foi possível relacionar a dinâmica de mudança da base tecnológica da indústria química com o aparecimento de problema ambientais. A produção de álcalis no séc. XIX já causava transtornos pela emissão de resíduos. Ao mesmo tempo, os processos químicos podiam ganhar mais competitividade a utilizar mais eficientemente os materiais de produção. Ao final do séc XIX, a química orgânica sintética e a instituição da grande corporação multiproduto, financiadora de P&D interna, proporcionaram uma capacidade sem precedentes de experimentação com a matéria, vinculada à criação de produtos sintéticos. Esses produtos podem, entretanto, apresentar efeitos adversos aos seres vivos e ao meio ambiente, tais como cumulatividade e mutagenia. No séc. XX, o desenvolvimento

da petroquímica e o *boom* dos materiais sintéticos dentro contexto de massificação industrial trouxeram uma escala inédita para os potenciais impactos do setor químico em termos qualitativos e quantitativos, incluindo os riscos de acidentes em grandes plantas de produção.

Deve-se notar que todo esse desenvolvimento tecnológico fundamental aconteceu sem que a variável ecológica estivesse presente de forma relevante na concepção e seleção das tecnologias. Foi na virada das décadas de 1960-1970 que a questão ambiental se elevou nas prioridades da sociedade civil e das ações de governo e, assim, a indústria química se viu alvo de pressões públicas crescentes e de regulamentações cada vez mais rígidas. Entretanto, nesse momento em que o ambiente de seleção econômica incorporava de forma mais profunda a variável ecológica, o setor químico já havia perdido uma parte importante do seu dinamismo econômico e tecnológico. De qualquer modo, apesar dos sinais de maturidade surgidos na indústria química desde os anos setenta, não deixaram de ser exploradas novas áreas tecnológicas, com aplicações importantes no setor. Serão destacadas a seguir as tecnologias de informação e a biotecnologia pelas suas significativas implicações ambientais.

Compreendendo ferramentas de aplicação abrangente, as tecnologias de informação tiveram um impacto substancial em diversas áreas da indústria química (Freeman, 1990; Quintella, 1993) com aspectos positivos na área ambiental. Deve ser citada, primeiramente, a troca dos controles analógicos por controles digitais, que possibilitou uma operação de processos mais precisa e segura. Em termos gerais, as tecnologias de informação permitiram uma melhor integração e automação dos processos químicos abrindo caminho para ganhos de eficiência nas plantas de produção. A montagem de extensas bases de dados e o desenvolvimento de *softwares* de simulação permitem que sejam selecionadas alternativas de processos mais limpas ainda na fase de *design* (Chemical Engineering, jul., 1995, p. 32). Deve-ser destacar que as aplicações das tecnologias de informação são encontradas inclusive nos subsetores mais atingidos pela maturidade técnica.

Já a biotecnologia possui um campo de uso mais restrito, centrado especialmente nas linhas de produtos mais sofisticados.²⁶ Ao mesmo tempo que atraiu investimentos de P&D de longo prazo de empresas como Du Pont, Hoechst e Monsanto e se consolidou como uma ferramenta na inovação de produtos, a biotecnologia tornou-se mais um foco de questionamento ambiental dentro do setor químico. O ponto central de polêmica diz respeito a possíveis impactos da utilização da engenharia genética em plantas (Monsanto) ou para a produção de insulina humana (Hoechst), (Green e Yoxen, 1990). Nesses casos, estamos num universo de caráter controverso, nos quais as empresas e a sociedade precisam tomar suas decisões. Como a química sintética orgânica no século passado, a biotecnologia aumenta a capacidade do homem de manipular a estrutura de elementos do seu ambiente e, da mesma forma, traz consigo riscos que precisam ser avaliados e regulados.

2.2.7 Comentário Final

A perda de dinamismo tecnológico na indústria química a partir dos anos setenta aumentou naturalmente as dificuldades para a geração de inovações ambientalmente amigáveis. Isso seria mais grave no campo de *commodities* químicas, especialmente caracterizado por altas escalas de produção e grande investimento de capital, mas afetaria também os outros tipos de produtos à medida que há uma diminuição da P&D a longo prazo, e a preponderância de inovações incrementais. Devem ser levados em conta também os efeitos de *lock-in* em tecnologias convencionais, sendo que a viabilidade das inovações de produto na indústria química vai depender também dos incentivos ou barreiras colocados por seus usuários nos diversos setores industriais.

Esse quadro restritivo, entretanto, tem seu contraponto em algumas oportunidades identificadas na união entre estímulos de ordem econômica e quesitos de ordem ambiental. Resumidamente,

²⁶ De ser citado, porém, que alguns processos que utilizam enzimas ou microorganismos para degradação de resíduos químicos têm sido usadas como tecnologia de final-de-linha (Green e Yoxen, 1990).

- 1) Estratégias de diferenciação de produtos convencionais e criação de especialidades químicas tendo em vista os requerimentos do mercado por produtos de melhor *performance* ambiental.
- 2) Busca de processos mais eficientes, com menos gasto de energia e menor geração de resíduos.
- 3) Novos campos tecnológicos que ainda são capazes de renovar de forma mais ou menos abrangente o setor químico, sem perder de vista, os riscos ambientais que novas tecnologias podem trazer.

Neste capítulo, além de explorar essas perspectivas, foram propostas algumas hipóteses de viés negativo em que se supõem as seguintes tendências: a) diferenciações incrementais de produto e manutenção das trajetórias tecnológicas correntes; 2) retornos decrescentes por inovações incrementais de processo; 3) inibições de inovações radicais para minimizar as adaptações necessárias pelos usuários dos produtos químicos. Foram trabalhadas também as perspectivas específicas dos tipos de empresas principais no setor químico.

Não está no escopo desta tese a avaliação empírica desses tópicos de análise e hipóteses em relação à indústria química em geral. Tais elementos constituem indicativos e linhas de investigação gerais para o processo de incorporação da variável ambiental na dinâmica de inovação do setor químico, cuja discussão realizada neste capítulo faz parte do primeiro objetivo proposto desta tese. Passando para o segundo objetivo, será explorado o exemplo concreto dos CFCs no capítulo seguinte, buscando um enriquecimento mútuo entre os elementos analíticos e as informações vindas de um caso concreto.

CAPÍTULO 3

O EXEMPLO DA SUBSTITUIÇÃO DOS CFCs

Neste capítulo vamos explorar o processo de substituição de CFCs com o objetivo de avaliar as respostas da indústria química nos termos de análise discutidos no capítulo anterior. Em uma iniciativa regulatória de caráter inédito, o Protocolo de Montreal (1987) e as suas emendas estabeleceram o fim da produção dos CFCs nos países desenvolvidos em 1º de janeiro de 1996. Como se tratavam de produtos de ampla aplicação comercial, o processo de sua substituição é um exemplo especial de mudança técnica ligada a uma restrição relacionada ao meio ambiente.

A primeira seção do capítulo serve como uma introdução histórica até a assinatura do Protocolo de Montreal. Primeiramente, é descrito o desenvolvimento dos CFCs como produtos comerciais, cujo sucesso esteve ligado às suas características inertes e, assim, de utilização segura. Num segundo momento, é sumariado o debate dos CFCs como depletors da camada de ozônio e as estratégias da indústria sobre o tema até a assinatura do Protocolo em 1987.

Na segunda seção, será focalizada efetivamente a introdução das alternativas aos CFCs entre 1987 e 1996. Com base na cobertura das publicações setoriais Chemical Week e Chemical Engineering, será caracterizado ano a ano o processo de substituição dos CFCs, salientando-se: mudanças nas regulamentações, novidades científicas sobre a crise do ozônio, alternativas técnicas dispostas pelo setor químico e investimentos em plantas de produção.

A terceira seção discute as informações obtidas a partir da construção da trajetória de substituição dos CFCs face às hipóteses e tópicos de análises presentes nos capítulos anteriores.

3.1 A Evolução da Crise Ambiental dos CFCs até o Protocolo de Montreal (1988)

3.1.1 Os CFCs como Produtos Químicos Seguros²⁷

O desenvolvimento dos clorofluorcarbonos como um produto comercial no final dos anos 20 foi motivado pela necessidade de uma alternativa segura para fluidos usados na crescente indústria de refrigeração mecânica. Nos EUA, as vendas anuais de geladeiras domésticas cresceram dez vezes entre 1925 e 1929 chegando a 730.000 unidades, enquanto se desenvolvia também o mercado para refrigeração comercial e para climatização de ambientes, como hospitais. Entretanto, havia ainda um gargalo técnico relacionado à toxicidade e inflamabilidade dos fluidos de refrigeração, os quais, eventualmente, poderiam vazar dos aparelhos. O produto então mais utilizado, o dióxido de enxofre não era somente tóxico mas também corrosivo, favorecendo a ocorrência de vazamentos. De fato, por problemas desse tipo estavam ocorrendo acidentes com vítimas fatais nos EUA.

A General Motors possuía uma divisão de aparelhos de refrigeração (Frigidaire) e ao fim de 1928, encarregou o engenheiro mecânico T. Midgley da tarefa de encontrar uma substância não tóxica, não inflamável e que tivesse propriedades termodinâmicas adequadas.²⁸ Com o apoio do químico belga A. Henne, Midgley selecionou o dicloro-difluor-metano (CCl_2F_2 , CFC-12) como uma substância que preenchia todos os requisitos. O CFC-12 havia sido sintetizado pela primeira vez em 1890 por F. Swarts, outro químico belga, e faz parte da classe dos compostos fluorcarbonos. Midgley e Henne passaram então a trabalhar em modificações da rota de síntese original tendo em vista o processo em grande escala.²⁹

Tal desenvolvimento foi completado pela Du Pont, a qual tinha ligações estreitas com a GM e já estava no mercado de fluidos refrigerantes. A reação básica do processo

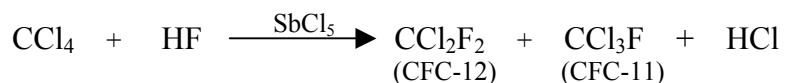
²⁷ Toda essa seção baseia-se em Litfin (1994), Sheridan (2004) e Hounshell e Smith Jr. (1998)

²⁸ Curiosamente, Midgley já havia desenvolvido para a GM o chumbo de tetra-etila como um antidetonante de gasolina, produto que já causara sérios problemas de contaminação ocupacional durante os anos 20 e que, décadas mais tarde, teria seu uso restringido em vários países devido a questões de toxidade e poluição urbana.

²⁹ A nomenclatura dos CFCs foi desenvolvida pela própria Du Pont. O primeiro dígito à direita representa o número de átomos de flúor, o dígito do meio representa o número de átomos de hidrogênio mais 1 e o último dígito calcula-se pelo número de átomos de carbono menos 1 (omitido se zero).

comercial parte de um organoclorado, como tetracloreto de carbono, e usa o ácido fluorídrico anidro na presença do pentacloreto de antimônio como catalisador (ver fig 3.1).

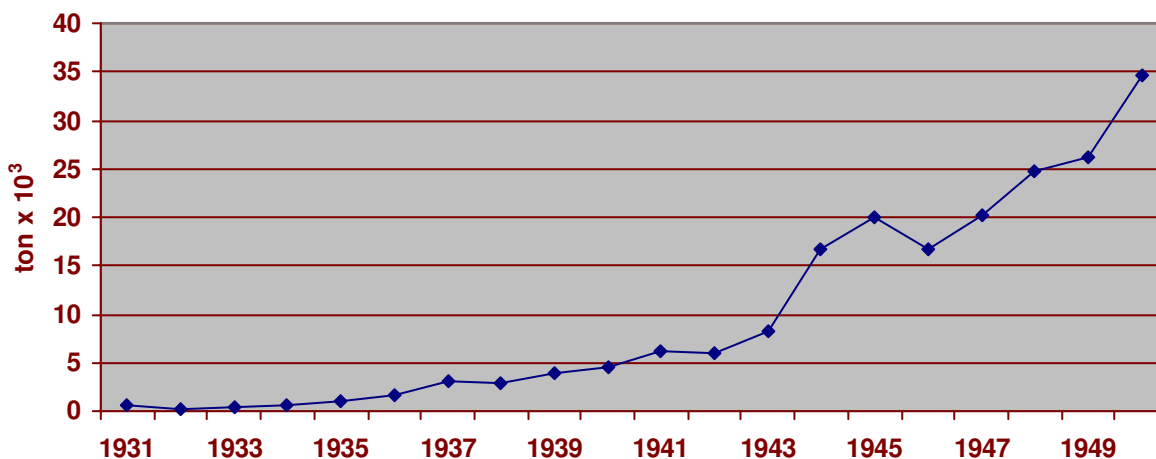
Fig. 3.1 Reação de Síntese do CFC-12



Fonte: Adaptado de Manzer (1990)

Em 1930, era formada uma *joint venture* entre a Du Pont e GM denominada Kinetic Chemicals e uma planta com capacidade de 3.000 lb/dia, cerca de 500 ton/ano, era finalizada em Deepwater (New Jersey) para colocar o CFC-12 no mercado. Uma primeira polêmica teve que ser vencida em torno dos riscos do CFC-12, caso esse vazasse em um ambiente com alguma chama aberta (cozinhas, por exemplo). Entretanto, após testes técnicos terem ajudado a Kinetic a resolver favoravelmente esse impasse, o CFC-12 foi progressivamente dominando o mercado de fluidos de refrigerantes por suas características de segurança. Como reflexo, a sua produção cresceu mais de 8 vezes entre 1931 e 1940.

Graf. 3.1: Produção de CFC-12 (1931-1950)



Fonte: adaptado de CMA (1981)

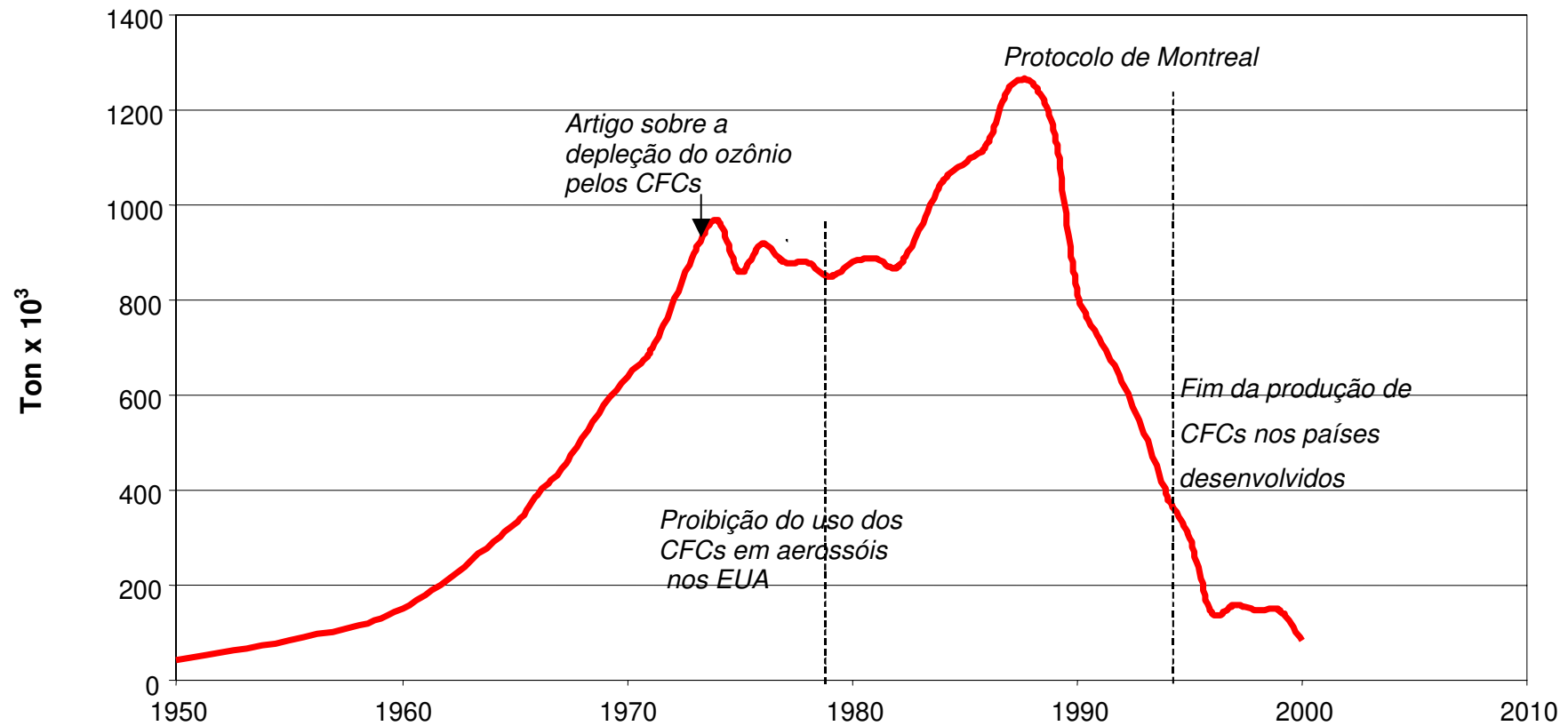
A partir da década de 30, a Du Pont e a GM desenvolveriam outras substâncias a partir de modificações em torno da reação de síntese do CFC-12. Assim, eram criados compostos com propriedades adequadas para diferentes temperaturas de refrigeração e equipamentos. Citam-se:

- 1) Novos CFCs, entre eles o CFC-114 e CFC-115.
- 2) Os hidroclorofluorcarbonos (HCFC), os quais possuem ligações entre carbono-hidrogênio, mais fracas em relação às ligações Cl-C e F-Cl. Entre eles, o HCFC-22 (CHClF_2) encontrou aplicação na refrigeração de temperaturas mais baixas.
- 3) Os hidrofluorcarbonos (HFCs), em que não há mais a presença do cloro. Substâncias desse tipo — como HFC-134a ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$), sintetizado em 1936 — foram consideradas sem interesse comercial até a crise do ozônio.³⁰

Nas décadas de 40 e 50, o mercado dos CFCs continuou a se expandir pelas aplicações desenvolvidas por diversos tipos de usuários. Ainda no campo da refrigeração, têm-se, por exemplo, o desenvolvimento de aparelhos de ar-condicionado para casas e automóveis. Por iniciativa do governo americano, foram desenvolvidas latas de inseticidas em que os CFCs 11 e 12 eram usados como propelentes. A demanda de CFCs nessa aplicação foi inicialmente garantida pelo uso dos dispositivos de inseticidas pelas tropas americanas e, no pós-guerra, pela explosão do mercado civil para aerossóis. Novamente, as características de não-toxicidade e não-inflamabilidade eram essenciais para o sucesso técnico-comercial dos CFCs. No setor de materiais sintéticos, o CFC-11 passava a ser utilizado como agente expensor na fabricação de espumas de poliuretano. As espumas rígidas de poliuretano são usadas em isolamento térmico, enquanto que as flexíveis têm aplicação variada na indústria de móveis, carpetes e automobilística.

³⁰ O Teflon foi descoberto em 1938 na Du Pont durante pesquisas sobre a síntese de CFCs. Um intermediário de reação, o tetrafluoroetileno, polimerizou-se acidentalmente dando origem a um sólido com grande capacidade de resistência ao calor e a ataques químicos. O Teflon viria a ser desenvolvido como produto comercial pela Du Pont nas duas décadas seguintes junto a outros polímeros de fluorcarbonos.

Graf. 3.2: Produção Mundial de CFCs (1950-2000)



Fonte: adaptado de Ozone Secretariat (2003)

Seja por licenciamento ou pela expiração de patentes, entravam à época novos produtores no mercado de CFCs, tais como ICI, Pennwalt, Allied Chemical e Union Carbide. A Du Pont, que havia comprado a parte da GM no negócio em 1949, estava, portanto, em um novo tipo de ambiente competitivo. O crescimento da economia mundial e do mercado de massa para as facilidades de refrigeração, aerossóis e materiais sintéticos sustentavam o crescimento na demanda de CFCs, cuja produção cresceu mais de 30 vezes entre 1950 e 1970 (ver graf. 3.2). Como um estímulo a mais, o CFC-113 começou a ser utilizado nos setenta como agente de limpeza em lavagem a seco e na manufatura de circuitos eletrônicos.

Em 1971, um artigo publicado na *Nature* (Lovelock, 1971)⁵ levantou indiretamente preocupações sobre os efeitos dos CFCs no ambiente. No artigo, J. Lovelock, pesquisador britânico, relatava medições de concentrações de CFCs na atmosfera e constatava que pelo caráter inerte de seus compostos, eles podiam ser usados como gás traçador de movimentos atmosféricos. O artigo colocava ainda que não havia um sumidouro claro de CFCs no meio e que possivelmente eles estavam se acumulando desde o início de sua produção nos anos 30. O texto de Lovelock chamou a atenção dos produtores de CFCs, os quais, por iniciativa da Du Pont, realizaram um seminário intitulado “A ecologia dos fluorcarbonos” em 1972. No mesmo ano, a Chemical Manufacturers Association (CMA) estabeleceu um programa de pesquisa sobre tema, o “Fluorcarbon Program Panel” (FPP), com o apoio de 19 companhias.

A Du Pont começa em 1973 a integrar a sua capacidade instalada de CFCs em uma única unidade em Corpus Christi (Texas), buscando ganhar competitividade através de escala e integração produtiva a jusante. Apesar da variedade de aplicações, a diversidade de CFCs no mercado era pequena (ver tab. 3.1) e suas propriedades eram homogêneas entre os produtores. A busca de reduções de custos se fazia necessária num mercado cada vez mais competitivo. De qualquer forma, como veremos na seção seguinte, um outro artigo na *Nature* (Molina e Rowland, 1974)⁶ mudaria profundamente as condições no mercado de CFCs.

⁵ Atmospheric fluorine compounds as indicators of air movements.

⁶ Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone.

Quadro 3.1: CFCs e HCFCs no Mercado (em torno de 1973)

Produto	Aplicações Principais
CFC-11	Agente expensor, propelente, refrigerante
CFC-12	Refrigeração doméstica/automotiva, agente expensor, propelente
CFC-113	Agente de Limpeza
CFC-114	Em resfriadores por compressão centrífuga, agente expensor
CFC-115 e HCFC-22	Refrigeração de baixa temperatura (ambientes, supermercados)

Fonte: adaptado de Sheridan (2004)

3.1.2 Os CFCs como Depletors da Camada de Ozônio

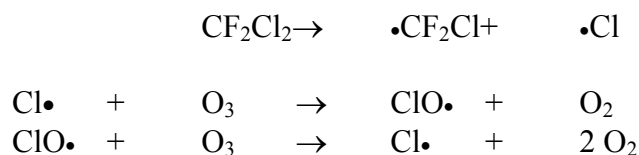
A camada de gás ozônio (O_3) na estratosfera é considerada uma barreira para a incidência de luz ultravioleta na superfície terrestre. Reações fotoquímicas a partir do oxigênio são as grandes responsáveis pela geração de ozônio nessa faixa de altitude. As moléculas de O_3 , por sua vez, também se decompõem na estratosfera ao absorver raios de luz em comprimentos de onda considerados perigosos aos seres vivos. O ozônio pode se decompor também por reação com outras espécies químicas (óxidos de enxofre, radicais H, OH). Além desses mecanismos de geração e decomposição, são determinantes para os níveis de concentração do ozônio as condições atmosféricas gerais como temperatura, ventos, incluindo variações sazonais (Brasseur, 1987).

O primeiro alerta sobre a possível influência do homem na camada de ozônio surgiu em torno do desenvolvimento dos jatos supersônicos. Em 1970, alguns cientistas levantaram a tese de que a emissão de óxidos de nitrogênio por esses jatos causaria uma diminuição relevante nos níveis de concentração de ozônio. Essa informação levou o congresso americano a extinguir os fundos para a pesquisa nesse tipo de avião em 1971. A França e o Reino Unido recusaram-se a seguir a iniciativa americana, configurando um conflito de ordem diplomática e econômica. De qualquer modo, em 1973, um programa de avaliação científica capitaneado pelo governo americano minimizou os possíveis impactos dos jatos supersônicos (Faucheux e Noël, 1990; Litfin, 1994). Ainda nesse ano, uma nova polêmica surgiu em razão da nave espacial então em desenvolvimento na NASA. Dois pesquisadores, R. Stolarski e R. Cicerone, consideravam que as emissões de ácido clorídrico dessa nave teriam um efeito destruidor significativo na camada de ozônio devido

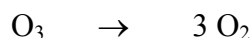
ao grande poder reativo dos radicais de cloro que seriam formados na estratosfera (Kowalok, 1993).

Em 1974, o problema da intervenção humana na camada de ozônio ganharia uma nova dimensão. Em um artigo publicado em junho na Nature, M. Molina e F. Rowland defendiam a tese de que apesar dos CFCs serem inertes na troposfera, eles sofreriam uma fotodissociação na estratosfera, liberando radicais de cloro. Esses radicais deflagrariam uma série de reações em que as moléculas de ozônio seriam decompostas e os radicais de cloro seriam novamente formados. Haveria assim um efeito de catálise, fazendo com que um radical cloro pudesse destruir várias moléculas de ozônio (ver fig. 3.2).

Fig. 3.2 Reações de Decomposição do CFC-12 e do Ozônio



Resultado líquido de ozônio:



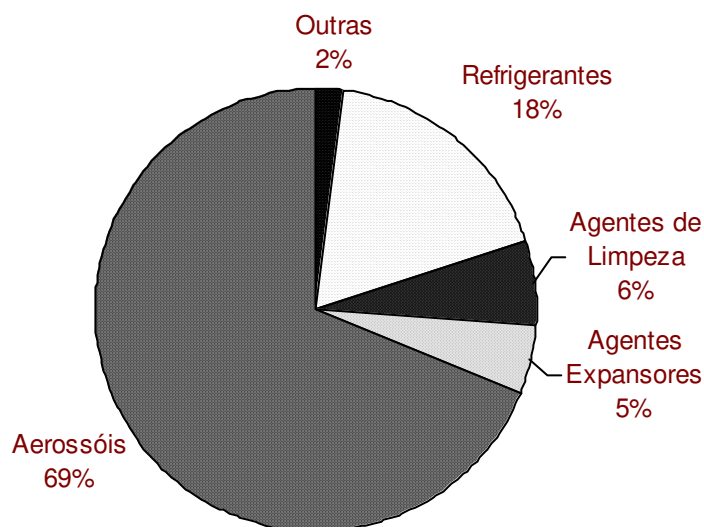
Fonte: Adaptado de Molina e Rowland (1974)

Duas questões presentes no texto de Molina e Rowland serão centrais no subsequente debate sobre os CFCs e a camada de ozônio:

- 1) A dimensão temporal. Como são inertes em condições normais, os CFCs teriam tempo de vida entre 40 e 150 anos. Assim sendo, qualquer ação em relação à emissão desses compostos teria efeitos práticos apenas em longo prazo.
- 2) A incerteza científica. O estudo da química da estratosfera é peculiarmente complexo pelo número de reações possíveis, pela difusão e movimentação dos compostos e pela dificuldade de mensurações empíricas, entre outros fatores. Os radicais cloros, por exemplo, podem reagir com outras espécies químicas (metano, nitrogenados). Os cálculos das taxas efetivas de depleção do ozônio causadas pelos CFCs passavam por grandes simplificações de modelagem.

O impacto do artigo de Molina e Rowland foi imediato no mercado mundial dos CFCs, causando uma quebra na trajetória ascendente de produção (ver graf. 3.2). Em 1974, o principal consumo desses compostos era na forma de agentes propelentes em aerossóis (ver graf. 3.3) e é justamente essa aplicação que seria a mais questionada, uma vez que era responsável por lançar grandes quantidades de CFCs diretamente na atmosfera. Houve regulamentações sobre o tema em alguns estados americanos (New York, Oregon) e alguns grandes produtores de aerossóis decidiram voluntariamente boicotar os CFCs. Esse processo culminou na proibição legal do uso dos CFCs como propelentes na Suécia (1977) nos EUA (1978), Noruega (1979) e Canadá (1980). Apesar da pressão americana, a Comunidade Econômica Européia (CEE) não adotou medidas semelhantes. Os hidrocarbonetos foram os principais substituintes utilizados, apesar da inconveniência de serem infamáveis (Litfin, 1994; Maxwell e Briscoe, 1997, Noel, 1993).⁷

Graf. 3.3: Consumo de CFCs por Aplicação (1974)



Fonte: Glas (1989)

⁷ Um novo propelente desenvolvido como alternativa pela Du Pont foi barrado por testes toxicológicos da própria empresa (Hounshell e Smith Jr., 1998).

A crise ambiental do ozônio possuía uma forte mediação científica. Relatórios de pesquisa coletiva capitaneados pela National Research Council (NRC, EUA) e, posteriormente, pela World Meteorological Organization (WMO) e NASA tinham uma repercussão forte na mídia e entre grupos ambientais e reguladores. As estimativas sobre os efeitos dos CFCs na depleção de ozônio variavam bastante segundo as formas de modelagem utilizadas em cada relatório (ver quadro 3.2). E mesmo se radicais de cloro estivessem afetando a camada de ozônio, a sua fonte poderia ser erupções vulcânicas e não os CFCs. Apesar dos esforços de pesquisa tentarem avançar em seus métodos de previsão, a incerteza inerente em seus resultados acabava servindo de argumento para partes conflituosas no debate sobre a necessidade de controles. Para alguns, a incerteza sobre os efeitos dos CFCs na camada de ozônio deslegitimava qualquer tipo de medida, para outros, a incerteza determinava a necessidade de ações de caráter preventivo, já que poderia ser muito tarde para agir caso os danos ambientais se confirmassem (Litfin, 1994).

Quadro 3.2 Estimativas de Depleção de Ozônio
(ao fim do séc. XX, mantendo-se constante a produção de CFCs)

Instituição Responsável	Ano	Estimativa	Observações
National Research Council	1976	2-20% (7% mais prov.)	* A depleção na parte superior da estratosfera seria mais grave: 50%
National Research Council	1979	16,5%	*Recomenda ações imediatas * Analisa melhor dos danos possíveis: mudanças climáticas, câncer de pele, perturbações às plantações e à vida marinha
World Meteorological Organization	1981	5-9%	* Refinação dos modelos * Nenhuma perda de ozônio empiricamente detectada
National Research Council	1984	2-4%	* Enfatiza os problemas dos CFCs como um poderoso gás estufa
World Meteorological Organization/ NASA	1986	5-6%	* Estima uma depleção significativa caso houvesse aumento na produção de CFCs * O buraco na camada de ozônio é citado marginalmente

Fonte: Adaptado de Litfin (1994) e Glas (1989)

Desde a publicação do artigo de Molina e Rowland, a incerteza científica era o principal motivo usado pela indústria química para se opor fortemente a qualquer tipo de regulação sobre os CFCs. Segundo a ótica da indústria, não seria razoável banir um produto economicamente importante, do qual dependiam diversos tipos de usuários, por uma

ameaça ambiental não comprovada.⁸ Em contrapartida, os fundos do programa científico sobre o tema organizado pelo setor (FFP) foram aumentados (Litfin, 1994; Glas, 1989).

Ao mesmo tempo em que se opunham à instituição de controles aos CFCs, empresas como Du Pont e ICI pesquisavam sobre os seus substituintes comerciais, concentrando-se em HCFCs e HFCs (Sheridan, 2004; Araújo e Harrison, 2000). Esses fluorcarbonos possuem menos moléculas de cloro que os CFCs, porém ainda guardam com estes semelhanças físico-químicas. Dessa forma, haveria a possibilidade de criar alternativas com menor ou nenhum potencial de depleção da camada de ozônio e, ao mesmo, com requisitos mínimos de adaptação por parte dos usuários. O HFC-134a era visto como um substituto promissor ao CFC-12 em refrigeração por suas semelhanças físico-químicas: os pontos de ebulição dessas substâncias, por exemplo, distanciam-se apenas por 2,4 °C e as suas curvas de pressão de vapor, com exceção das faixas de temperaturas mais extremas, possuem comportamento semelhante (Powell, 2002; Manzer, 1990). Como foi colocado, o HFC-134a já era conhecido desde 1936, não configurando assim novidade em termos de produto, porém, as suas rotas de síntese são mais complexas em relação à do CFC-12 envolvendo formação de subprodutos indesejados, problemas de rendimento e mais passos na cadeia de reações químicas (Manzer, 1990). Esse maior grau de complexidade implicava que esse tipo de substituinte seria mais caro que o produto convencional. Além dos gargalos em relação ao processo, outra questão técnica existia em relação à toxicidade: como as ligações H-C são mais frágeis que as ligações Cl-C, os HFCs tenderiam a não ser tão inertes como os CFCs. Dessa forma, acurados testes toxicológicos precisariam ser feitos, demandando tempo e investimentos.

Em 1979, estimativas científicas pela NRC de danos graves à camada de ozônio (ver quadro 3.2) aumentaram as perspectivas de restrições mais fortes aos CFCs, especialmente nos EUA. Nesse contexto, produtores e usuários industriais de CFCs formaram em 1980 a “Alliance for Responsible CFC Policy” (ARCP). Ainda no mesmo ano, a ARCP combateu a proposta pública da EPA de regulamentar todas aplicações dos CFCs e, eventualmente, banir o uso desses produtos. Novamente, levantava-se a

⁸ A Du Pont declarava publicamente que cessaria a produção de CFCs caso houvesse evidência científica confiável que determinasse ameaça à saúde humana (Glas, 1989).

precariedade do conhecimento científico envolvido e, ainda, a insuficiência de ações localizadas nacionalmente, já que a produção em larga de escala dos CFCs se manteria no resto do mundo (Glas, 1989)

Esse cenário mudou completamente com o início do governo Reagan em janeiro de 1981, devido ao seu viés anti-regulatório. Além disso, previsões menos alarmantes sobre a camada de ozônio contribuíram para diminuir a atenção sobre o problema dos CFCs. A Du Pont, assim, decidiu abandonar a sua pesquisa sobre os substituintes, na qual já havia investido US\$ 15 milhões⁹ (Litfin, 1994; Glas, 1989). A ICI seguiu o mesmo caminho (Araújo e Harrison, 2000).

A partir de 1982, o debate sobre a crise do ozônio encontrou um canal diplomático importante sob os auspícios do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Além de procurar coordenar a mobilização científica sobre a questão do ozônio, o PNUMA cuidava das reuniões de um grupo de trabalho multilateral em torno de possíveis controles sobre os CFCs. Na mesa de negociação, os conflitos tendiam a se polarizar entre os países do grupo de Toronto – Canadá, EUA, Finlândia, Suécia e o grupo formado pela CEE (com a liderança da França e Reino Unido), União Soviética e Japão. O grupo de Toronto tendia ser mais favorável às regulamentações do que o segundo, mas os conflitos também se davam sobre a natureza desses controles, os quais tinham impactos diferenciados entre os países. Aqueles que já haviam banido os CFCs em aerossóis, por exemplo, pressionavam por medidas severas nesse sentido. Por outro lado, cortes gerais na produção de CFCs eram defendidos por países com capacidade produtiva ociosa. O nível de desacordo fez que a convenção internacional resultante desses encontros acabasse por não incluir nenhuma proposta de medidas práticas de controle. Em suma, a Convenção de Viena (1985) conclamava a cooperação multilateral e a contínua avaliação do problema do ozônio. Apesar de suas limitações, a Convenção de Viena sedimentou uma estrutura de negociação diplomática que levaria dois anos mais tarde ao Protocolo de Montreal.

⁹ Para se ter um ponto de comparação com esse valor, o investimento anual em P&D da Du Pont esteve na casa de US\$ 410 milhões entre 1975 e 1980, cerca de 4,1 % do faturamento (Hounshell e Smith, 1988). Assim sendo, a pesquisa em substituintes de CFCs estava consumindo aproximadamente 0,6% do investimento anual em P&D. Esse valor dever ser ponderado pelo fato de ainda se tratar de uma pesquisa pré-competitiva e também pela extensa linha comercial da Du Pont, configurando 20 áreas principais além dos CFCs e centenas de produtos.

Meses após à assinatura da Convenção de Viena, um novo fato científico viria a aumentar as preocupações sobre os CFCs. O pesquisador britânico J. Farman e equipe relataram a descoberta de um decréscimo acentuado e progressivo nas concentrações de ozônio sobre a Antártica durante a primavera. Esse comportamento foi confirmado por uma série histórica de dados de satélites da NASA, dados esses que haviam sido antes desconsiderados justamente pelo seu caráter anômalo. Novamente, uma polêmica surgiu questionando se os CFCs eram os responsáveis pelo problema. Alguns cientistas, por exemplo, defendiam que a causa seriam fenômenos atmosféricos naturais (Brasseur, 1987). De qualquer forma, o impacto do “buraco na camada de ozônio” foi grande, servindo para configurar a percepção de uma crise ambiental grave, a qual os modelos científicos anteriores não haviam previsto (Litfin, 1994).

O ano de 1986 foi marcado por uma mudança na postura da indústria. A Du Pont em conjunto com a ARCP anunciaram apoio a um acordo mundial para a redução das emissões de CFCs na atmosfera. O principal motivo alegado era que haviam surgido evidências científicas claras e suficientes a partir do relatório da WMO e NASA, o qual apontava uma tendência de queda significativa nas concentrações de ozônio caso houvesse um aumento na produção dos CFCs. Desde 1983/1984, a produção de CFCs havia retomado uma trajetória de crescimento (ver graf. 3.2) sustentada pelo aumento na demanda em aplicações “não-propelente” (Glas, 1989). A Du Pont garantia que era possível colocar alternativas no mercado em 5 a 7 anos, com a clara percepção de que, por serem menos efetivos em termos de custo-benefício, os substituintes só poderiam ser bem-sucedidos com uma legislação que garantisse o seu mercado (Litfin, 1994; Maxwell e Briscoe, 1997).

A nova posição da indústria integrou um contexto pró-regulatório que marcou o início das rodadas de negociação em torno de um protocolo multilateral sobre os CFCs em dezembro de 1986. Mais uma vez, houve conflitos sobre a natureza dos controles a serem tomados. Pode ser citado, como exemplo, o interesse do Japão em não se restringir o CFC-113, usado indústria na micro-eletrônica, ou a posição da Argentina, cujo território estava próximo do buraco do ozônio, em usar o princípio do poluidor-pagador. Ao contrário do caso da Convenção de Viena, entretanto, chegou-se a um acordo sobre a introdução de regulamentações efetivas, e o Protocolo de Montreal foi assinado em setembro de 1987 por 24 países mais a CEE. Em suma, o documento previa o congelamento do consumo dos

CFCs (11, 12, 113, 114, 115) nos níveis de 1986 e, ainda, um corte de 20% desse nível em 1993 e de 50% em 1998; os países em desenvolvimento ganharam um prazo dez anos maior.¹⁰ Para entrar em vigor, o protocolo teria que ser posteriormente ratificado por países que respondessem por, no mínimo, 2/3 do consumo de CFCs. Mesmo antes do processo de ratificação (1989), a produção mundial de CFCs já começava a decair (ver graf. 3.2). Uma das razões principais era o uso de alternativas em aplicações em que os CFCs já eram essenciais, como aerossóis novamente ou material para embalagem de alimentos (Litfin, 1994; Noel, 1993).

Semanas após a assinatura inicial do protocolo, a NASA anuncia ter achado evidências empíricas de que o cloro vindo dos CFCs estava causando o buraco de ozônio. Revisões periódicas do acordo eram previstas e tal mecanismo foi efetivamente usado, como será visto na seção seguinte, até se chegar ao fim da produção de CFCs em janeiro de 1996.

¹⁰ Por motivos de escopo e simplificação, não vamos tratar aqui dos halons e outros compostos controlados pelo Protocolo de Montreal e suas emendas.

3.2 Reconstrução da Trajetória de Substituição de CFCs a partir de Periódicos Setoriais (1987-1996)

Nesta seção, será analisado o processo de substituição dos CFCs desde a assinatura do Protocolo Montreal até o fim da produção desses produtos (set. de 1987 até jan. de 1996). Apesar das ações das empresas em relação a essa questão já terem se iniciado na década de 70, será efetivamente nesse período em que as alternativas técnicas aos CFCs deveriam ser introduzidas no mercado, configurando uma inovação tecnológica no sentido schumpeteriano (Schumpeter, 1997). O objetivo desta seção é tentar reconstruir a trajetória dinâmica da substituição dos CFCs, tendo em vista: mudanças nas regulamentações, novidades científicas sobre a crise do ozônio, alternativas técnicas dispostas pelo setor químico e investimentos em plantas de produção.

Optou-se por usar como base de informação a cobertura dos periódicos setoriais Chemical Week e Chemical Engineering (mensal) pelas seguintes razões:

- 1) Por esses periódicos oferecem informações sobre aspectos econômicos, tecnológicos e de estratégia industrial.
- 2) Pela proximidade que a cobertura desses periódicos tinham do *staff* gerencial das empresas químicas.
- 3) Pela possibilidade de acompanhar progressivamente o processo de substituição dos CFCs, estando incorporada a incerteza sobre o estágio seguinte.

Foram levantados cerca de 170 artigos relativos aos CFCs no período estudado. A seguir, será feito um sumário ano a ano das principais informações contidas nessa cobertura. Já a análise do conjunto dessas informações, especialmente no contexto das discussões realizadas nos capítulos anteriores, será realizada na seção 3.3.

1987/1988

¹¹ O HCFC-22 já era usado para refrigeração comercial (supermercados, freezers) e em equipamentos de ar - condicionado; no processo de substituição estavam sendo estudadas ampliações para o seu uso.

Uma nota lançada dias após a assinatura do Protocolo de Montreal (CE, 28 de set., 1987, p. 9) já indicava que a indústria química iria substituir os CFCs com moléculas de estrutura parecida (HFCs e HCFCs), mas, a despeito dessa semelhança, ainda havia um longo trabalho a ser feito em engenharia de processo, toxicologia e estudos de *marketing*.

Uma reportagem em janeiro do ano seguinte (CE, 18 de jan., 1988, p. 22-24) completava o quadro do processo de substituição em curso. O mercado de CFCs estava estimado em US\$ 750 milhões. Cerca de 1 milhão de toneladas desses compostos são produzidas anualmente, com os EUA sendo responsáveis por 30% e a Europa Ocidental, 45%. Em termos de produtos substituintes, a principal dificuldade está em encontrar alternativas para o CFC-113, agente de limpeza. Para os CFCs 11 e 12 já haviam candidatos sendo testados para refrigeração e expansão de espumas: HFC-134a, HCFC-123, HCFC-141b, HCFC-142b, HCFC-22 (ver quadro 3.3).¹¹ A Pennwalt¹² já oferece um *blend* de HCFC-22 e HCFC-142b para refrigeração, o qual era moderadamente inflamável. Em abril, a empresa já considera que a indústria de refrigeração não se disporia a fazer as modificações necessárias para o uso do seu *blend*, o qual, então, seria vendido como propelente para perfumes (CW, 6 de abr., p. 7).¹³

Quadro 3.3 Principais Substituintes dos CFCs(da classe dos fluorcarbonos)

Composto*	Aplicações Principais;	CFC original
HFC-134a	Refrigeração automotiva e doméstica, propelente	CFC-12
HCFC-123	Agente expensor, propelente, refrigeração comercial	CFC-11
HCFC-141b	Agente Expensor (poliuretano)	CFC-11
HCFC-142b	Agente expensor (em plásticos isolantes)	CFC-12
HFC-125	Refrigeração comercial/ Ar-condicionado	CFC-115
HCFC-124	Refrigeração comercial	CFC-114
HFC-32	Refrigeração comercial/ Ar-condicionado	HCFC-22
HFC-152a	Propelente, agente expensor	CFC-12
HFC 143a	Refrigeração comercial/ Ar-condicionado	HCFC-22/ CFC-115

¹² A Pennwalt, empresa originalmente americana sofrerá em 1989 um processo de fusão com a francesa Atochem, “braço químico” da Elf Aquitaine. Porém, essas empresas serão consideradas pelos seus nomes originais por CW e CE até 1991, quando há uma troca de nome para Elf Atochem. Hoje esta firma transformou-se através de outros processos de fusão para Atofina Chemicals (Atofina, 2004)

¹³ Para evitar redundância e dar mais limpeza ao texto, será omitida a referência implícita do ano.

HFC-356	Agente expansor	CFC-11
*Na ordem de aparição da cobertura dos periódicos (apoio à leitura) Fonte: adaptado de CW e CE (vários anos)		

Empresas como Du Pont e Allied (EUA) já estão trabalhando em plantas-piloto de HFCs. O principal gargalo técnico diz respeito ao rendimento dos processos e à disposição de subprodutos. Segundo um gerente da Atochem (França), a própria termodinâmica da reação de síntese do HFC-134a prevê apenas 20% de rendimento. Desse modo, operações de separação e purificação precisam ser feitas, o que implica na formação de resíduos. Nesse contexto, a pesquisa em catálise revela-se crucial. Espera-se que os substituintes custem até 5 vezes mais que os CFCs originais. Já a síntese dos HCFCs é mais próxima dos processos convencionais, sendo que algumas plantas de CFCs podem ser convertidas para os substituintes (CW, 6 de abr., p. 7).

Além de apoiar o desenvolvimento de processos, a produção em plantas-piloto servia para fornecer amostras de testes para os usuários e para avaliações toxicológicas. Em janeiro, 19 produtores de CFCs fundam o “Program for Alternative Fluorocarbon Toxicity Testing” (PAFT), buscando compartilhar custos e reduzir tempo nos testes toxicológicos. Testes para os principais substituintes estão em andamento (CW, 14 de set., p. 38). Outro exemplo de arranjos interfirmas é a *joint venture* entre a Atochem e Pennwalt para a pesquisa e comercialização das alternativas aos CFCs (CW, 25 de abr., p. 37-38).

No caso da manufatura eletro-eletrônica, é favoravelmente testado pela AT&T um composto orgânico vindo da casca de citros. A empresa responsável pelo produto é a Petrochem, dedicada a especialidades químicas. O composto apresentou um bom resultado, mas não seria um substituinte em todos os usos do CFC-113; além disso, ele causou problemas de dermatite. (CW, 20 de jan., p. 9).

Em março de 1988, a Du Pont segue uma atitude isolada em relação ao setor e anuncia que vai cessar progressiva e completamente a sua produção de CFCs. Evidências científicas recentes da NASA são o motivo declarado (CW, 30 de mar., p. 32). Por outro lado, a ARCF diz que não é possível retirar os CFCs do mercado até 2000 sem prejudiciais rupturas no mercado (CW, 20 de jul., p. 26). Em termos de gastos no desenvolvimento de substituintes, a Du Pont declara um investimento de US\$ 30 milhões em 1988 (CW, 31 de ago., p. 30). No final do ano, a empresa anuncia a construção de uma planta de HFC-134a

em Corpus Christi (Texas). A planta ficará pronta em 1990, com um custo de US\$ 25 milhões e uma capacidade anual de cerca de 500 mil toneladas (CE, nov., p. 23). ICI também anuncia a construção de duas plantas do mesmo produto para 1991 (Reino Unido) e 1992 (EUA) a um custo de US\$ 50 milhões cada. Na empresa, foram destinados US\$ 85 milhões para o desenvolvimento de substituintes (CW, 30 de nov., p. 34).

Uma conferência mundial sobre o clima no Canadá em julho coloca os CFCs como o terceiro maior causador do efeito estufa (CW, 20 de jul., p. 26). Em outubro a EPA propõe a restrição total aos CFCs (CW, 5 de out.).

1989

O Protocolo de Montreal entra em vigor em janeiro, com a ratificação de 29 países mais a CEE. Independentemente, o congresso americano e os ministros do meio ambiente da CEE discutem o banimento dos CFCS por volta de 1996. Grandes concentrações de cloro são encontradas no pólo ártico (CW, 1 de mar., p. 16, 1989; CW, 15 de mar., p. 13).

A Atochem compra a divisão de CFCs da Dow, com o objetivo de fortalecer a sua posição no mercado americano (CW, 18 de jan., p. 20). A Du Pont anuncia o lançamento de um *blend* de HCFC-141b e HCFC-123 como agente de limpeza, e a Allied também lança um produto semelhante (CE, abr., p. 25).

A indústria automobilística aponta que o HFC-134a não é um “substituto automático” para os sistemas de ar-condicionado de veículos. Além de ser menos eficiente em termos de energia, o composto demanda mudanças no compressor e no lubrificante.¹⁴ O caso mais incerto continuava a ser o do CFC-113; mesmo assim a IBM e a AT&T colocam como meta cessar o uso do composto em 1993. Nesse sentido, progressos haviam sido feitos no aumento de eficiência no uso do CFC-113 e na sua substituição por água e sabão em algumas fases de operação (CW, 30 de ago., p. 22)

¹⁴ Posteriormente, o HFC-134a não seria mais considerado menos eficiente em termos energéticos que o CFC-12, porém seria confirmada a sua baixa solubilidade nos tipos de lubrificantes de refrigerantes então mais utilizados. Para solucionar o problema, foram desenvolvidos lubrificantes de poliol-esters (Powell, 2002).

O encontro de produtores de espumas de poliuretano (CW, 18 de out., p. 64) revela que os compostos HCFC-141b, HCFC-123 também não são “substituintes automáticos” e que vários ajuste técnicos precisariam ser desenvolvidos. A substituição direta estaria, em alguns casos, comprometendo a qualidade das espumas. Algumas empresas (Arco, Union Carbide) já estavam desenvolvendo técnicas alternativas ao fluorcarbonos, usando gás carbônico, água, ou aditivos químicos próprios. No caso da espuma de poliestireno e polietileno, a Dow reporta que não teve maiores problemas técnicos em usar o HCFC-142b para substituir o CFC-12 e o CFC-113, apesar de que investimentos consideráveis seriam necessários para uma transição completa. (CW, 30 de ago., p. 23).

A Du Pont prevê que, em 2000, os HFCs e HCFCs satisfariam apenas da 41% da demanda original dos CFCs; 30% do mercado seria coberto por alternativas diferentes dos fluorcarbonos e os 29% restantes corresponderiam à reciclagem dos CFCs originais. Muitos usuários estão fazendo esforços para um melhor aproveitamento dos CFCs em uso (CW, 30 de ago. p. 23).

A EPA faz ressalvas ao PAFT, que estaria simplificando os testes toxicológicos. Os custos destes testes são estimados em US\$ 1 milhão por produto substituinte (CW, 1 de dez., p. 10-11).

1990

A Allied começa a construir a primeira planta de HCFC-141b a um custo de US\$ 50 milhões com previsão de operar no fim de 1990 (CE, jan., p. 64). O HFC-134a já está incorporado nos investimentos da Atochem, Rhodia (França), Hoechst, Showa Denko (Japão), além da Du Pont e ICI. A Atochem planeja investimentos industriais de US\$ 140 milhões nos substituintes, incluindo o HCFC-142b (CE, jan., p. 64; CW, 18 de abr., p. 41; CW, 5 de dez., p. 24). A ICI está estudando o HFC-125 para substituir o CFC-115 (refrigerante para instalações comerciais, baixa temperatura).

Com investimentos em curso, os HCFCs e HFCs começam a ser questionados em termos ambientais. Em junho, ocorre a revisão do Protocolo de Montreal e alguns países sugerem controles sobre os HCFCs, já que eles ainda têm capacidade de atacar a camada de

ozônio. A indústria argumenta que esse potencial é muito baixo e que os HCFCs são necessários como produtos de transição tendo em vista as adaptações dos usuários. Nenhum controle sobre os HCFCs é efetivamente aprovado. Já sobre os CFCs, aprova-se um término completo da produção e consumo para o ano de 2000, com um corte de 50% já para 1995 nos níveis de consumo relativos a 1986 (emendas de Londres), (CW, 04/11 de jul., p. 12). Por sua vez, os HFCs são questionados por grupos ambientalistas por se tratar de um gás estufa. A Du Pont decide desacelerar os investimentos em HCFCs (CW, 5 de dez., p. 34).

A diminuição nos níveis de produção exigirão um esforço de racionalização produtiva no conjunto da indústria européia de CFCs, já que as plantas têm um nível mínimo para serem viáveis economicamente. (CW, 18 de jul., p. 10).

Alternativas ao uso de fluorcarbonos continuam a ser desenvolvidas: processo de fabricação de espuma com poliéster-poliol pela Sanyo e refrigerante baseado em silicone pela Dow (CE, jan., p. 19; CE, out., p. 21). Este refrigerante, contudo, apresenta menor capacidade de troca de calor (30%).

1991

Em janeiro, o conselho do meio ambiente da CEE decidiu adiantar o fim da produção e consumo de CFCs para 1997 (CW, jan., p. 6). Em alguns meses, a Alemanha decidia trazer a data-limite para 1995 (CE, maio, p. 27). Os controles mais rígidos na Alemanha, os quais incluem restrições ao HCFCs, trazem um ambiente normativo diferenciado para a Hoechst, a qual já é produtora de HCFC-22. A empresa alemã decide agora investir diretamente nos HFCs (CW, 16 de out., p. 10). Um painel de especialistas organizado pelo PNUMA revelou medições de depleção da camada de ozônio maiores que as esperadas. Em resposta, a ICI, Du Pont e Elf Atochem prometem acelerar o fim da produção dos CFCs para antes das datas previstas.

Os HCFCs passam a serem vistos como produtos que devem ser aceitos como última opção: a EPA, por exemplo, não vê necessidade do HCFC-141b como agente expensor (CW, 30 de out., p. 9). O HCFC-123 encontra problemas nos testes de toxicologia

da PAFT (porém, ainda poderia ser comercializado em aplicações com baixa exposição ao homem) (CW, 3 10 de jul., p. 10).

A Du Pont anuncia em janeiro a disponibilidade comercial da linha de refrigerantes denominada Suva, composta pelos HCFCs 123 e 124 e HFCs 134a e 125, isolados ou em *blends* (CW, 30 de jan., p. 34). Em agosto, a empresa anuncia a construção de uma planta de grande escala para HFC-134a/HCFC-124, a um custo de US\$ 110 milhões e com uma capacidade total de 32 mil ton/ano. Novas plantas são planejadas no Japão e Holanda, sendo que os investimentos totais na substituição dos CFCs durante os próximos dez anos são estimados pela empresa em US\$ 1 bilhão.¹⁵ O HCFC-124 é um novo substituinte para a refrigeração comercial, substituindo o CFC-114 (CW, 28 de ago., p. 8).

A ICI inicia a construção de uma planta nos EUA com capacidade de produzir 10 mil ton/ano de HFC-134a usando uma rota alternativa. Enquanto os processos dos competidores partiriam de organoclorados e obteriam HCFCs como subprodutos, muitas vezes sem mercado, a ICI diz ter desenvolvido uma rota mais direta para HFC-134a, partindo de etileno. O HCFC-133a ainda seria usado como intermediário, porém o subproduto principal seria apenas HCl. O processo utilizaria fase-vapor e catálise baseada em cromo. A recuperação e tratamento do catalisador seriam essenciais sob o ponto de vista ambiental. Essa nova tecnologia seria aplicada também em novas plantas planejadas no Japão e faz parte da estratégia da ICI de evitar o mercado dos HCFCs (CW, 17 de abr., p. 8).

A Daikin inicia a produção do HFC-134a no Japão (CW, 9 de out., p. 31).

1992

A substituição dos CFCs é acelerada mais uma vez, relatórios científicos indicam uma taxa de depleção maior da camada de ozônio e surge um fato novo: grandes concentrações de óxidos de cloro no hemisfério norte, incluindo áreas da Europa e

¹⁵ Não se obteve dados de investimento total da Du Pont para se fazer uma comparação direta, entretanto alguns valores podem dar uma noção de grandeza: a despesa de capital projetada pela Du Pont para 1992 era em torno de US\$ 900 milhões, sendo que a companhia estava se propondo a manter um investimento em P&D na ordem de US\$ 1,3 bilhões anuais (CW, 4, de mar; 21 de out., 1992).

América. O governo americano decide adiantar a data-limite para os CFCs para final de 1995. Os produtores dizem estarem adiantados nos cortes de produção (CW, 19 de fev., p. 9).

Com uma eliminação progressiva também sendo planejada para os HCFCs nos EUA, os principais afetados seriam os usuários ainda não cobertos por alternativas. Um exemplo é o setor de ar-condicionado, dependente do HCFC-22 (CW, 26 de fev., p. 26). Um substituinte possível seria um *blend* de HFC-32/134a; Alguns representantes do setor químico apontam que estaria havendo atraso de adaptação técnica por parte dos usuários, os quais esperariam ainda por “substituintes automáticos”. Isso explicaria, inclusive, o excesso de capacidade produtiva que o setor químico já teria em substituintes dos CFCs. O HFC-134a está estabilizado como uma escolha para o sistema de ar-condicionado dos novos automóveis, porém a indústria automobilística está insatisfeita com um *blend* oferecido pela Du Pont para recarregar os sistemas já existentes. O HFC-134a também está sendo testado como agente expensor no lugar do HCFC-141b. No caso de agentes de limpeza/solventes, o mercado estaria sendo fragmentado em nichos (CW, 7 de out., p. 12).

Com duas plantas com capacidade total de 70 mil ton/ano, a Elf Atochem se posiciona como a maior produtora de HCFCs 141b e 142b. Uma nova planta de HFC-134a nos EUA vai se somar à sua capacidade doméstica do produto, chegando a 30 mil ton/ano. (CW, 29 de abr., p. 20). A Allied vai expandir a sua capacidade em HFCs em nova planta de 10 mil ton/ano, ao custo de US\$ 40 milhões (CE, nov., p. 52).

A Degussa desenvolve um painel de isolamento a partir de pó de sílica que dispensa fluorcarbonos (CE, out., p. 25). Outra técnica desenvolvida por ??? dispensa o uso de fluorcarbonos ou qualquer solvente orgânico na limpeza de peças mecânicas, usando dióxido de carbono (CE, dez., p. 84).

Em novembro, realizam-se negociações em Copenhague para a revisão do Protocolo de Montreal. As emendas aprovadas trazem para 1º de jan. de 1996 o fim da produção e consumo dos CFCs. Os HCFCs passam a ser controlados a partir do seu potencial de depleção, com a sua saída do mercado prevista para 2030.

1993

A EPA proíbe uso não-essencial dos CFCs (CW, 6 de jan., p. 56) e propõe uma política de restrição aos HCFCs. (CW, 5 de maio, p. 14). A ARCP muda o seu nome para “Alliance for Responsible Atmospheric Policy” (ARAP) devido à pressão crescente dos reguladores e ambientalistas sobre os HCFCs e HFCs. O Greenpeace, por exemplo, não aceita os HFCs por serem um tipo de gás estufa e estão promovendo tecnologias de refrigeração baseadas em amônia e hidrocarbonetos (CW, 27 de out., p. 12). A Du Pont e a Hoechst planejam cessar a produção de CFCs no ano seguinte (CW, 17 de mar., p. 12; CW, 18 de ago., p. 16).

Novos substituintes são desenvolvidos pelas empresas químicas devido às restrições ao HCFC-141b. A Allied estuda os isômeros do HCF-245 e o HFC-356. Este último é considerado promissor também pela Bayer, Elf Atochem e BASF (CW, 20 de out., p. 52; CW, 3 de nov., p. 10). Ao mesmo tempo, uma nova empresa, INKO (EUA), anuncia os flúor-iodo-carbonos (FICs) como substituintes gerais para os CFCs. (CW, 17 de mar., p. 12; CW, 18 de ago., p. 16.).

A Union Carbide e a Witco (EUA) lançam lubrificantes para o uso do HFC-134a em refrigeração (CW, 6 de jan., p. 56; CW, 3 de mar., p. 29). A capacidade de produção desse produto aumenta com o início de operação da planta da Du Pont em Corpus Christi, a maior do mundo (cerca de 50 mil ton/ano), e também com os planos de expansão da Allied, Daikin e Elf Atochem. Entretanto, os mercados americano e europeu não haviam ainda “decolado”, levando a uma sobre capacidade que o setor químico espera ser passageira (CW, 17 de fev., p. 23; CW, 6 de out., p. 8).

Em relação a outros substitutos, novas expansões são previstas pela Allied em plantas de HFC-125, HCFC-141b e HCFC-142b (CW, 3 de fev., p. 10) e pela LaRoche em HCFC-141b (CW, 10 de fev., p. 5).

Para as aplicações de refrigeração comercial, as quais usavam o CFC-114, HCFC-22 e CFC-115, as empresas aumentam a oferta de *blends* próprios de HFCs e HCFCs com soluções para atender as especificidades de cada tipo demanda (CW, 22 de dez., p. 17).

Digital e HP estão trocando o CFC-113 por solventes baseados em água (CW, 2 de jun., p. 40). O problema desses solventes, contudo, é a quantidade de efluentes de resíduos gerados (CW, 12 de maio, p.63). A Du Pont prevê que os fluorcarbonos alternativos ficarão apenas com 26% do mercado original dos CFCs. A empresa declara já ter investido US\$ 500 milhões em investimentos na substituição dos CFCs, e a ICI estima a mesma quantia no seu caso (CW, 27 de out., p. 40).

A National Oceanic and Atmospheric Administration mede um recorde negativo no nível da camada de ozônio na Antártida (CW, 27 de out., p. 44).

1994

A EPA solicita que a Du Pont utilize toda a sua cota de produção de CFC-12 para evitar escassez na manutenção dos sistemas de ar-condicionado de veículos. Enquanto a produção de novos automóveis está adiantada no uso do HFC-134a, os usuários buscam evitar a conversão dos carros atuais, a qual teria um custo entre US\$ 300 e US\$ 1000 (CW, 5 de jan., p. 16). A manutenção dos equipamentos atuais é vista como a principal lacuna no processo de substituição. Ao mesmo tempo, a EPA proíbe o uso “não-essencial” dos HCFCs (CE, fev., p. 27) e combate a importação ilegal de CFCs que despontava nos EUA (CE, nov., p. 29).

A Comissão Européia aprova um aumento nas cotas de importação de CFCs, contrariando os produtores domésticos (CW, 2 de mar., p. 16). De qualquer modo, o fim da produção dos CFCs na CEE mantém-se para o fim do ano.

A Allied expande a sua produção de HCFC-124 (CW, 22 de jun., p. 9). A empresa aponta que um dos principais obstáculos técnicos vencidos no processo de substituição foi construir plantas novas em 17 meses, enquanto que o tempo usual seria de 2 a 3 anos. A ICI aumenta a sua capacidade de HCF-134a nos EUA e inaugura um planta de 10 mil -ton/ano no Japão, em uma *joint venture* com a Teijin (CW, 22 de jun., p. 42).

A Hoechst teve a sua planta de HFC-134a avariada seriamente por um acidente com explosão. Ambientalistas ressaltam o vazamento de 1,5 ton do produto, que é um gás estufa. As causas são desconhecidas, levantando a questão dos riscos antes ignorados no

processo (CW, 30 de mar., p. 15). No fim do ano, Solvay e Hoechst decidem unificar a produção de alternativas aos CFCs. Especialistas identificam os motivos na sobre capacidade do mercado e na necessidade de altos investimentos. Ambas as empresas produzem HCFC-22: a Hoechst havia acabado de retomar a sua produção de HFC-134a na planta antes avariada e a Solvay já tinha plantas semi-industriais de HFCs 143a e 152a (CW, 14 de dez., p. 5)

Concentrando-se em especialidades e nichos de mercado, a 3M anuncia a sua entrada no mercado dos substitutos dos CFCs (CW, 17 de ago., p. 10). Igualmente na área de especialidades químicas, a Petrochem continua no mercado de alternativas ao CFC-113 (agente de limpeza) e mostra-se como um exemplo bem-sucedido de pequena empresa no setor químico (CW, 21 de dez., p. 19).

1995

No começo do ano, a NASA anuncia que recentes medições por satélite confirmam os CFCs como os depletors do ozônio. A descoberta de flúor na estratosfera indica que a fonte de cloro naquela altitude são os compostos químicos CFCs, e não as erupções vulcânicas (CW, 11 de jan., p. 56). Ainda no campo científico, um artigo da Nature aponta preocupações sobre a cumulatividade do ácido trifluoracético, o qual poderia ser formado pela decomposição dos HFCs. A pesquisa teve apoio financeiro de programas da própria indústria química (CW, 2 de ago., p. 33). Em outubro, os químicos Molina e Rowland, autores da teoria sobre a depleção da camada de ozônio pelos CFCs ganham o prêmio Nobel (CW, 18 de out., p. 19).

Aproximando-se a data-limite do fim da produção de CFCs, as empresas químicas anunciam expansões na capacidade produtiva e lançamento de novos *blends*. A ICI, por exemplo, vai triplicar a sua capacidade em HFC-134a (CE, jan, p. 65). Já a Du Pont vai construir uma segunda planta de HFC-152a que começar a produzir em 1996 (CE, outubro, p. 55). A Allied está licenciando da Bayer os HFCs 356 e 252 e coloca mais 4 *blends* no mercado.

Entretanto, o problema de sobrecapacidade corrente está sendo agravado pelo aumento de contrabando de CFCs ilegais vindo de países como Rússia, Índia e China. Empresas como a Atochem declaram estar perdendo dinheiro com HFC-134a (CE, jan, p. 65; CW, 1 de nov., p. 18).

A Bosch declara na conferência sobre alternativas aos CFCs que 80% da produção alemã de refrigeradores está usando hidrocarbonetos como fluidos refrigerantes. Nos EUA, os produtores de equipamentos preocupam-se com a questão da inflamabilidade, enquanto que a EPA havia rejeitado os hidrocarbonetos como substituintes aos CFCs (CW, 1 de nov., p. 11).

A 3M anuncia bons resultados com os hidro-fluor-ésteres (HFE) como agentes de limpeza/solventes, e anuncia acordos com a Allied para a produção de solventes especiais (CW, 8 de nov., p. 58).

Após 1995 (comentários)

O dia de 1 de janeiro de 1996 constituía a data-limite para a produção dos CFCs nos países desenvolvidos. A discussão a que esta se propõe concentra-se principalmente nos anos mais críticos da substituição (1987-1995), quando as alternativas aos CFCs deveriam ser efetivadas como produtos comerciais, tendo como desafio evitar rupturas nos mercados relativos às tecnologias ligadas aos CFCs. Além da importância especial desse período, outra justificativa para esse recorte temporal refere-se a questões de escopo, considerando que a partir de 1996 a cobertura de CE e CW sobre a substituição dos CFCs torna-se mais pontual, não configurando mais uma fonte de informações adequada.

De qualquer modo, podem ser salientados alguns fatos importantes após 1995. Sobre a depleção da camada de ozônio, a dimensão temporal do fenômeno dificulta a avaliação dos efeitos concretos do Protocolo de Montreal num curto prazo. Em termos práticos, a concentração de cloro na estratosfera aparentemente atingiu o seu auge em 1997. Já o buraco na camada de ozônio, como era esperado, continua a crescer, sendo que a sua reversão é esperada em torno de 2050 (Powell, 2002; Ozone Secretariat, 2003).

Em relação às alternativas tecnológicas, os principais produtores químicos como Du Pont e ICI investiram mais em *blends* próprios com os HFCs já desenvolvidos do que na criação de novas moléculas (Powell, 2002, tab 4). Outra área de desenvolvimento foi o uso dos HFCs em aplicações especiais, como, por exemplo, o HFC-134a como propelente em inaladores farmacêuticos (Du Pont, 2004). Em 1999, tanto a Du Pont e a ICI decidiram por expandir a sua capacidade produtiva de HFC-134a, o que refletia o crescimento do mercado em mais de 10% ao ano e o fim do período de sobre capacidade desse produto (Du Pont, 1999; Chemical Market Reporter, 1999 e 2000). Essa mudança nas condições de mercado, possibilitou que o HFC-134a deixasse de ser comercializado a um preço próximo do CFC-12 entre 1980-1985 (US\$ 1,4) para chegar a um valor 3 vezes maior em 2000, mais condizente com a complexidade do seu processo de produção (CW, 27 de out., 1993; Maxwell e Briscoe, 1997; Chemical Market Reporter, 2000). Em relação aos HCFCs, as expectativas do estabelecimento de controles ainda mais rígidos não se confirmaram, levando a ICI a julgar como prematura a sua estratégia de partir mais diretamente para a produção de HFCs, em detrimento dos HCFCs (Araújo e Harrison, 2000). O HCFC-141b, por exemplo, estabeleceu-se como a alternativa ao CFC-11 para expansão de espumas (Chemical Market Reporter, 2000).

O questionamento em relação dos HFCs devido ao seu potencial de contribuição para o efeito estufa continuou, sendo que essas substâncias foram incorporadas na lista de controle de emissões do Protocolo de Kyoto (1997). Essa lista indica uma gama variada de compostos, cujas emissões em seu conjunto deveriam ser controladas por cada país. O Greenpeace estabeleceu-se como um crítico dos HFCs, promovendo os hidrocarbonetos como refrigerantes (Greenpeace, 2004). Na Europa Ocidental, as geladeiras com hidrocarbonetos representaram 35% do mercado em 1997 (CE, nov. de 1997, p.63). Empresas como a britânica Calor tentaram expandir esse mercado para além da refrigeração doméstica, utilizando os hidrocarbonetos para aparelhos automotivos de ar-condicionado e refrigeração comercial. Entretanto, restrições em relação à inflamabilidade desses produtos inibiram ou mesmo impediram a sua utilização em vários países, especialmente nos EUA (Glynn, 2002).

Os defensores dos HFCs colocam que o potencial de aquecimento global desses compostos não deve ser avaliado por uma simples comparação “molécula a molécula” com

o CO₂. Nesse tipo de comparação, o HFC-134a, por exemplo, aparece com um fator potencial de aquecimento 4 mil vezes maior que o do CO₂. Mais propriamente, deveria ser levado em conta o impacto geral do uso prático dos HFCs como refrigerantes. Uma forma de calcular esse impacto seria dentro de uma perspectiva de ciclo de vida, conforme é feito pelo TEWI (traduzindo, equivalente total de aquecimento global). Segundos alguns cálculos de TEWI, o qual pressupõe estimativas sobre vazamento, fontes de energia e eficiência de seu uso, o impacto da utilização dos HFCs seria negligenciável. Ações de prevenção deveriam ser feitas em relação a manuseio e uso de equipamentos, de forma a evitar o vazamento de refrigerante (Powell, 2002). Por fim, deve-se comentar que esses cálculos de TEIW são contestados pelos defensores dos hidrocarbonetos. De qualquer modo, o crescimento do mercado de HFC-134a indica um grau de estabilização razoável dessa opção técnica.

Limitações no Uso dos Periódicos Chemical Week e Chemical Engineering

Um primeiro problema do uso da cobertura dos periódicos CW e CE conforme feito neste tese é bastante direta: uma limitação a apenas duas linha editoriais, incorporando um ponto-de-vista bastante restrito. Essa especificidade agrava-se também pelo fato de serem dois periódicos americanos, sendo natural que as informações sejam mais representativas das ações das empresas nos EUA. Além disso, por se tratarem de periódicos setoriais, tem-se uma perspectiva bastante próxima dos produtores químicos e não dos usuários de suas tecnologias. Como o estudo dos efeitos de *lock-in*, por exemplo, pede uma análise das relações produtor-usuário, tem-se aqui um desequilíbrio importante na fonte de informações. E mesmo considerando apenas as empresas químicas, sente também a falta de informações econômicas mais completas e comparáveis nos diversos anos em relação a investimentos, mercado geral dos substituintes e parcelas de mercado de cada empresa.

Tendo essas limitações reconhecidas, é possível retirar da cobertura de CW e CE informações essenciais, ano a ano, sobre quais alternativas estavam sendo colocadas no mercado e o contexto relativo aos principais fatos científicos e mudanças na regulação. É salutar igualmente o fornecimento de dados técnicos, tal como sobre os processos de produção dos HFCs. A partir de 1996, junto com a perda de prioritária jornalística, tem-se

um esperado declínio da cobertura da implementação de alternativas aos CFCs. De qualquer modo, considera-se que a trajetória de substituição desses compostos foi suficiente descrita para municiar uma discussão geral sobre o processo de substituição dos CFCs, presente na seção seguinte.

3.3 Discussão Geral sobre a Substituição dos CFCs

Nesta seção, será discutida a trajetória de substituição dos CFCs a partir dos elementos históricos e analíticos vistos nos capítulos e seções anteriores. Essa discussão será ancorada pelos seguintes temas: a problemática ambiental da indústria química e seu histórico, universo em controvérsia ou estabilidade, a tendência do predomínio das inovações incrementais, a adaptação dos usuários e os *trade-offs* nas soluções ambientais. Como principal objetivo, esta seção pretende apontar os aspectos essenciais do processo de substituição dos CFCs dentro de uma perspectiva analítica sugerida pela discussão realizada nos capítulos anteriores sobre a incorporação da variável ambiental na dinâmica de inovação da indústria química.

3.3.1 Os CFCs e a Problemática Ambiental da Indústria Química

Os fluorcarbonos foram primeiramente sintetizados no fim do séc. XIX dentro do contexto de experimentação da química orgânica. As ligações F-C são consideradas raras na natureza (Roche, 2004) e a sua síntese artificial trouxe um composto de qualidades únicas, especialmente de uma grande estabilidade química. A introdução dos CFCs no mercado em 1930 deveu-se à capacidade que a indústria química adquiriu de aproveitar as características especiais dos compostos sintéticos, desenvolvendo usos comerciais para esse tipo de substância e viabilizando os seus processos de produção. A massificação da indústria e do consumo teve um papel determinante na dimensão dos problemas futuramente relacionados aos CFCs: entre 1930-1940, a produção desses compostos estava na ordem de 5 mil ton/ano, já nos anos 60 o valor já estava na casa das 300 mil ton/ano. Assim, uma quantidade enorme de CFCs era lançada no meio ambiente, sem haver nenhum motivo de preocupação aparente.

Entretanto, algumas características únicas dos compostos sintéticos podem trazer problemas ao meio ambiente e à saúde humana. Em um aparente paradoxo, os CFCs ganharam mercado por suas características de segurança, porém, como foi colocado na

década de 70, esses compostos possuíam graves problemas ao se levar em conta a sua cumulatividade no meio dentro de um horizonte temporal longo.

Assim como no caso de outras questões ambientais do setor químico, pode-se considerar que a crise do ozônio está relacionada a uma exploração ambientalmente despreocupada de uma grande capacidade de manipulação da matéria, junto a um processo de massificação da economia em geral que elevou a dimensão dos danos potenciais dos produtos químicos. Conforme foi colocado no cap. 2, mudanças tecnológicas importantes colocam desafios ambientais novos, e isso é exemplificado claramente pelo caso dos produtos químicos sintéticos e, em nível mais específico, pelos problema dos CFCs e a camada de ozônio. Entretanto, a sinalização de um problema ambiental desse tipo pode não se dar imediatamente no ambiente de seleção econômica. No caso dos CFCs, a discussão sobre os seus impactos na camada de ozônio só foi se iniciar em 1974, mais de 4 décadas após o início da produção desses compostos, quando seu mercado estava consolidado e com características de *commodity*.

3.3.2 Controvérsia e Estabilização dos Universos de Percepção

Entre a publicação do artigo de Molina e Rowland na revista *Nature* em 1974 e a assinatura do Processo de Montreal passaram-se 13 anos. A dinâmica do debate sobre os CFCs e a camada de ozônio era extremamente mediada por um conhecimento científico em formação e a incerteza envolvida nesse conhecimento era um elemento de discussão central para as partes contra e a favor de regulamentações.

Considerando especificamente a postura do setor químico, essa incerteza foi usada na maior parte do período para deslegitimar o problema. No caso do ozônio, é relevante ressaltar que o setor não aceitava o princípio da precaução, já que ele passou a aceitar controles sobre os CFCs apenas em 1986 quando considerou haver evidências científicas suficientes. De qualquer forma, essa mudança da posição do setor foi importante por ter vindo junto com a indicação que as alternativas técnicas poderiam estar disponíveis em 5 a 7 anos, dando maior tranquilidade para a implementação das regulamentações aos CFCs.

A assinatura do Protocolo de Montreal em 1987 pode ser considerada como um sinal da estabilização de um longo debate. Após essa estabilização, empresas como Du Pont, ICI e Hoechst apresentaram estratégias de caráter mais espontâneo e pró-ativo, optando por adiantar o fim da produção dos CFCs e evitando o mercado de HCFCs.

Por outro lado, considerando o marco regulatório, deve-se notar o cenário volátil em que as empresas químicas tomavam as suas decisões: em 1989, quando da ratificação do protocolo, a previsão era de um corte na metade da produção/consumo de CFCs para o ano de 1998. Já em 1992, com as emendas de Copenhague, colocava-se um corte total de produção/consumo para início de 1996. Os HCFCs também foram sendo progressivamente regulados até ser instituída também uma data-limite de produção/ consumo para 2020. Ao mesmo tempo, controvérsias eram inauguradas em relação aos HFCs, a principal aposta do setor químico, devido a seu potencial de aquecimento global. Nota-se aqui um quadro de incerteza em que nunca há uma estabilização completa das percepções dos problemas e dos parâmetros para a tomada de decisões.

3.3.3 A Introdução de Inovações Incrementais pelos Produtores Químicos

Pode-se dizer que os HCFCs e HFCs são inovações de caráter incremental, ou de menor porte, pelo motivo de que essas substâncias foram desenvolvidas ainda na década de 30 por variações em torno da reação de síntese dos CFCs-11 e 12, com os quais guardam semelhanças em estrutura e propriedades. Não haveria, portanto, nenhum elemento de ruptura tecnológica. Porém, mesmo caracterizando esses produtos como inovações menores, não se deve perder de vista a complexidade e os esforços envolvidos no processo de substituição dos CFCs. Da ótica do setor químico, devem ser considerados principalmente:

- 1) O maior grau de complexidade no processo de fabricação dos HFCs: tais processos envolvem mais passos de reação, menores rendimentos e desenvolvimentos em catálise. Acrescenta-se que mudanças na rota de síntese foram armas de competição no mercado de HFC-134a.

- 2) Os investimentos envolvidos: pesquisa, plantas-piloto, testes de toxicologia, construção de novas plantas comerciais, *marketing*. A Du Pont declarou ter gastado, até 1995, US\$ 500 milhões nesse conjunto de ações.
- 3) A incerteza sobre o mercado de HCFCs: tais compostos são mais próximos dos CFCs, inclusive, algumas plantas podiam ser convertidas diretamente para a fabricação desses substituintes. Porém, por ainda terem cloro na sua estrutura, o uso dos HCFCs foi sendo progressivamente restrito.
- 4) O encolhimento do mercado: os esforços de reciclagem e o uso de algumas solução técnicas “não-fluorcarbonos”, como sistemas aquosas para limpeza, determinam uma redução do mercado original dos CFCs aproximadamente em 70%, segundo estimativas da Du Pont.

Tão importante quanto avaliar o caráter inovativo dos HCFCs e HFCs *per se*, é sublinhar que esses substituintes não teriam condições de competir com os CFCs originais em termos de custo-benefício, sem levar em conta os aspectos ambientais. Ou seja, a indústria química não conseguiu oferecer alternativas que fossem melhor ou que pelo menos se equiparassem em termos de desempenho ou custo aos produtos convencionais. Por exemplo, em 2003, o HFC-134a era vendido pela Du Pont a um preço (US\$ 5,5/kg) cerca de 3 vezes maior do que o preço médio do CFC-12 entre 1980 e 1985.¹⁶ Mesmo considerando a possibilidade de futuras reduções de preço por maior competição, aumento de escala e melhorias técnicas, os processos de produção de HFCs possuem uma maior complexidade de etapas e também um menor rendimento químico, o que dificulta que seus preços cheguem aos níveis originais dos CFCs.

Em termos gerais, pode-se dizer que o processo de substituição seguiu as trajetórias correntes no setor que buscam agregar valor por meio de produtos diferenciados. Nos anos setenta/oitenta, os CFCs tinham características de *commodity*, já que esses produtos eram homogêneos entre os produtores e tinham uma grande escala de produção.¹⁷ Os CFCs

¹⁶ Comparação já descontando a inflação pelo PPI (production price index). Fonte de preço 2003: Du Pont (site oficial, preço para set. de 2003). Fonte de preço 1980-1985: US International Trade Commission *apud* Maxwell e Briscoe (1991).

¹⁷ Uma exceção pode ser feita ao CFC-113, o qual era mais caro e produzido em menor quantidade, contudo a sua especificação era homogênea entre os produtores.

usados comercialmente eram apenas de 5 tipos, mais um *blend* específico formado entre um deles e o HCFC-22 (R-502). No processo de substituição, o mercado tornou-se mais complexo, incluindo linhas próprias de *blends* de cada companhia, visando soluções específicas para a refrigeração comercial. Mesmo considerando o CFC-12, produto de maior tonelagem produzida em sua classe, constata-se o lançamento de 3 substituintes diretos: HFC-134a, HCFC-142b e HFC-152a. Maxwell e Briscoe (1991) afirmam que a possibilidade de transformar um mercado de *commodity* em um mercado de produtos mais sofisticados foi a principal motivação da Du Pont para, a partir de 1986, aceitar os controles sobre os CFCs.

Deve-se notar lançamento de substitutos alternativos aos HCFCs e HFCs também por empresas químicas, como os agentes de limpeza desenvolvidos pela Petrochem e 3M (em sua divisão química). Deve-se salientar, contudo, que as soluções técnicas dessas empresas não cobriam todo o mercado do CFC-113, constituindo-se especialidades químicas para nichos restritos.

Em suma, ao se considerar a introdução de alternativas técnicas aos CFCs pela indústria química, percebe-se a exploração das trajetórias “gerais” correntes do setor, as quais buscam agregar valor através de inovações incrementais no produto ou por desenvolvimentos de novas especialidades restritas a nichos de mercado.

3.3.4 A Adaptação dos Usuários

As diversas aplicações comerciais dos CFCs foram desenvolvidas ao longo de 5 décadas por produtores e usuários. Inclusive, no caso de algumas aplicações como aerossóis e agentes de expansão de espumas, os usuários tiveram o papel determinante. Com o Protocolo de Montreal e suas emendas, foram disponibilizados cerca de 7 anos para que a estrutura técnica baseada nos CFCs fosse adaptada a novos produtos.

Nesse contexto, os HFCs e HCFCs foram a aposta principal da indústria química pela sua semelhança com os CFCs e, assim, pela possibilidade que abriam de se encontrar alternativas com propriedades semelhantes aos produtos convencionais mas que não ameaçassem a camada de ozônio. No caso da refrigeração, um parâmetro essencial de

seleção era a semelhança nas propriedades termodinâmicas, tal como era observada entre o CFC-12 e o HFC-134a (Manzer, 1990; Powell, 2002).

Considerando isso, pode-se dizer que os objetivos de minimizar as adaptações necessárias dos usuários foi um fator-chave no processo de substituição dos CFCs, favorecendo inovações de caráter incremental. Porém, essa caracterização é simplificadora se não se levar em conta a inexistência de “substituintes automáticos”. Assim, ajustes técnicos e investimentos tiveram que ser feitos pelos diversos tipos de usuários dos CFCs.

O exemplo do HFC-134a, que concentrou os investimentos iniciais em produção, é significativo: o composto demandou o desenvolvimento de lubrificantes e mudanças de *design* nos novos aparelhos. Além disso, o HFC-134a não servia para substituir diretamente o CFC-12 nos equipamentos já existentes, os quais, caso precisassem de recarga de fluido refrigerante, precisariam passar por uma conversão técnica de custos não negligenciáveis. Deve-se considerar também que os produtores de CFCs não conseguiram um substituinte satisfatório para o CFC-113, cujo mercado ficou fragmentado por diversos produtos alternativos aos HCFCs e HFCs.

Vale ressaltar, finalmente, o fato de que os usuários tiveram que arcar com os custos de substituintes 2 a 5 vezes mais caros do que os produtos convencionais. Pode-se dizer que embora o desenvolvimento de alternativas visasse um esforço mínimo de adaptação técnica, o processo de substituição dos CFCs não foi trivial para os seus usuários, os quais tiveram que proceder mudanças técnicas e investimentos.

3.3.5 *Trade-offs* nas soluções ambientais

O processo de substituição dos CFCs evidencia que freqüentemente não se encontram soluções plenas para os problemas ambientais, e que prós e contras devem ser avaliados caso a caso.

O HFC-134a, por exemplo, não tem potencial de depleção da camada de ozônio, porém o seu processo de fabricação tem menor rendimento e gera mais resíduos do que o do CFC-12 e, além disso, trata-se de um gás estufa. Já os hidrocarbonetos, que são promovidos como fluidos refrigerantes pelo Greenpeace, têm o inconveniente de serem

perigosos por sua inflamabilidade e de serem questionadas de eficiência energética (Glynn, 2002). Outro exemplo são sistemas aquosos para a substituição do CFC-113 como agente de limpeza/ solventes. Esses sistemas acabam por gerar maiores quantidades de efluentes, as quais precisam ser devidamente tratadas.

Enfim, pode-se dizer que os CFCs foram, em determinado momento, caracterizado como uma tecnologia “suja”, cuja substituição foi considerada prioritária. As suas alternativas técnicas, entretanto, não podem ser consideradas tecnologias simplesmente “limpas”, sendo que vantagens e desvantagens precisam ser continuamente avaliadas. Esse quadro exemplifica a idéia de “alvo móvel” expressa por Corazza (2001).

Como **comentário final**, deve ressaltar que a crise de ozônio é um exemplo de como um problema de ordem ambiental pode colocar em xeque uma tecnologia estável e de ampla aplicação, tal como os CFCs nos anos 70. Os produtores químicos tiveram um papel importante em contribuir para que essa crise ambiental não se transformasse em “crise tecnológica”, começando a colocar no mercado produtos substituintes cerca de 4 anos após o Protocolo de Montreal. Os HCFCs e HFCs, principais substituintes promovidos pela indústria química, não conseguiram cobrir todos o espectro original de aplicação dos CFCs, servindo melhor ao mercado de refrigeração e, em menor medida, ao de agente expansor para espumas. Além disso, deve-se ressaltar que essas alternativas técnicas são mais caras que os CFCs, não apresentando nenhuma vantagem técnica além de ter nenhum ou pouco potencial de depleção da camada de ozônio. Ou seja, a renovação do mercado antes ligado aos CFCs não serviu, de forma geral, para abrir espaços para inovações mais profundas por parte dos grandes produtores químicos. De qualquer modo, mesmo se tratando de inovações incrementais que procuravam minimizar os problemas de adaptação técnicas, o processo de implementação dos HCFCs e HFCs foi complexo e colocou diversos desafios para produtores e usuários, entre eles: processos de produção mais complexos, *redesign* dos refrigeradores, conversão de equipamentos antigos. Em suma, não houve nenhum “substituto automático”. Por fim, deve-se notar que essa substituição tecnológica se deu em um cenário de constante mudança do marco regulatório e rico em controvérsias, como a questão da contribuição dos HFCs para o aquecimento global.

DISCUSSÃO FINAL

Nesta parte final, serão recuperados os principais pontos de discussão vistos nos três capítulos da tese, dando ênfase em suas interfaces. Também serão levantadas indagações que já se colocam fora do escopo proposto, mas servem como questionamentos de fundo e como sugestões para futuros estudos.

Esta tese tem como motivação inicial a problemática ambiental especialmente crítica do setor químico. Ao se reconstruir a evolução dessa indústria no cap. 1, foi possível relacionar mudanças importantes em sua base tecnológica ao surgimento de novos danos potenciais ao meio ambiente. Desde o séc. XIX, já eram relevantes os problemas relacionados à emissão de resíduos. Por outro lado, o melhor uso de materiais constituía já se uma arma de competição importante, o que é ilustrado pela concorrência entre os processos Leblanc e Solvay. No fim do séc. XIX, a química orgânica sintética e os laboratórios industriais de P&D trouxeram uma capacidade inédita de manipulação da matéria e, conjuntamente, trouxeram os problemas potenciais de mutagenia e cumulatividade relacionados aos produtos químicos sintéticos. No séc. XX, tal capacidade de experimentação com a matéria foi ainda mais explorada, especialmente com os materiais sintéticos e, não menos importante, a indústria química teve a sua base transformada em direção aos processos contínuos ligados à petroquímica. Essa mudança não significou apenas um abandono do carvão como matéria-prima principal mas sim a inserção do setor químico num processo de massificação de produção e consumo, baseado no petróleo como fonte de matéria-prima e energia e na exploração de economias de escala. A massificação de produção e consumo consolidada no pós-guerra não podia deixar de amplificar os danos potenciais da indústria química e trouxe ainda a questão do risco dos grandes complexos químicos.

O aparecimento de problemas ambientais novos ligados às mudanças na base tecnológica coaduna-se com a idéia da economia evolucionista de “externalidade dinâmica”, conforme colocada no cap 2. Ainda nos termos da economia evolucionista, é importante observar que os desenvolvimentos tecnológicos fundamentais da indústria química ocorreram sem que a variável ecológica estivesse incorporada de forma

significativa no ambiente de seleção econômica. Tal incorporação só foi ocorrer no final da década de 60, quando a indústria química havia perdido uma parte importante do seu dinamismo tecnológico e econômico, apresentando sinais de maturidade em alguns subsetores. Deve-se acrescentar que essa incorporação tardia não se deu apenas com a indústria química, sendo compartilhada pelos integrantes do *boom* econômico do pós-guerra. A própria emergência do ambientalismo dos anos 60 pode ser vista, pelo menos em parte, como uma resposta aos efeitos diretos desse *boom*. A partir desse ponto, a variável ecológica se fez mais presente no gosto de consumidores, nas regulamentações governamentais e na agenda da sociedade civil. Uma questão geral que pode ser colocada é se essa incorporação “tardia” do tema ambiental e a sua materialização dentro da atividade econômica tende a ser suficiente para lidar com os problemas apontados pelo próprio ambientalismo, tais como exaustão dos recursos naturais e poluição do meio ambiente.

O caso dos CFCs é um exemplo crítico de incorporação ambiental tardia. Como foi visto no cap. 3, a problematização dos CFCs em termos ambientais deu-se mais de 40 anos após o seu lançamento como produto comercial, cujo sucesso, ironicamente, vinha de suas características de inércia química. Através de dois artigos na revista *Nature* (Lovelock, 1971; Molina e Rowland, 1974), foi proposto que tal inércia resultaria num acúmulo geral dos CFCs no meio ambiente, e, numa última etapa, em uma dissociação que ameaçaria a camada de ozônio estratosférica, essencial para a vida na terra. A controvérsia surgida sobre a existência desse mecanismo de associação, mediada fortemente pelo conhecimento científico, foi estabilizada mais de dez anos mais tarde com a assinatura do Protocolo Montreal (1987). Teve-se assim um caso em que apenas um acordo multilateral poderia lidar com a escala da crise ecológica causada pelo uso extensivo de um produto químico sintético.

O primeiro objetivo proposto nesta tese foi identificar oportunidades e restrições em um nível geral para a incorporação da variável ambiental no processo de inovação do setor químico. Quanto à base teórica utilizada para esse fim, percebe-se que os textos que se dedicam à questão de inovação e meio ambiente dentro do marco teórico evolucionista/neoschumpeteriano surgem principalmente a partir do início da década de 90, constituindo um campo relativamente novo e naturalmente demandante de maiores desenvolvimentos. A partir de uma revisão teórica de caráter funcional, foram identificadas algumas barreiras e

oportunidades gerais para inovações mais limpas: efeitos de *lock-in*, oportunidades vindos da confluência entre estímulos de ordem econômica e de melhor *performance* ambiental e, por fim, oportunidades vindas com o paradigma técnico-econômico da informação. Acrescenta-se ainda uma idéia de co-evolução complexa entre: novas tecnologias e novos paradigmas técnico-econômicos, danos ambientais potenciais, percepção dos problemas ecológicos e parâmetros de avaliação, ambiente de seleção sócio-econômico, ações de busca e estratégica das firmas, e, por fim, soluções técnicas específicas.

No caso da indústria química propriamente, tem-se como primeiro elemento a ser considerado os sinais de maturidade que se fazem presentes de forma heterogênea dentro do setor. Assim sendo, oportunidades e barreiras vão se manifestar segundo o tipo de produto (*commodities*, especialidades, etc.), o tipo de empresa (megaempresa, orientada para a produção) e rede técnica, as quais podem ser mais ou menos propícias para a introdução de inovações (efeitos de *lock-in*). De qualquer modo, foram apontadas algumas oportunidades em que inovações ambientalmente amigáveis são estimuladas pela sua confluência com requisitos de cunho econômico:

- 1) Estratégias de diferenciação de produtos convencionais e criação de especialidades químicas tendo em vista os requerimentos do mercado por produtos de melhor *performance* ambiental. Essas estratégias devem ser encontradas mais encontradas nas áreas de *pseudocommodities* e especialidades químicas.
- 2) Busca de processos mais eficientes, com menor gasto de energia e menor geração de resíduos, especialmente importante no mercado de produtos homogêneos (*comodities*, química fina).
- 3) Novos campos tecnológicos que ainda são capazes de renovar de forma mais ou menos abrangente o setor químico, como as tecnologias da informação e biotecnologia. Não se deve perder de vista, contudo, os riscos ambientais que as novas tecnologias podem trazer.

Apesar de apresentar uma problemática ambiental especialmente crítica, o setor químico ainda não possui trabalhos compreensivos que permitiram avaliar de que forma está sendo incorporando a variável ambiental na sua base tecnológica e quais são

efetivamente as oportunidades e barreiras mais importantes para essa incorporação. Há, portanto, um grande campo de pesquisa ainda ser explorado. No caso dos produtos, por exemplo, seria interessante estudar quais os produtos químicos lançados que se diferenciam por sua *performance* ambiental, em que grau eles se distanciam tecnicamente dos produtos convencionais (inovação incremental/radical), o diferencial de preço e de desempenho técnico, o aparecimento de outros tipos de problemas ambientais (*trade-offs*), a parcela conquistada no mercado e a importância no faturamento da empresa. No caso dos processos, alguns governos e firmas mantêm dados sobre emissão de resíduos, os quais precisariam ser comparados e, na medida do possível, harmonizados. Alguns desses dados apresentados no cap. 2 apontam progressos significativos na redução de emissão de vários poluentes e da demanda de energia. É necessário obter um melhor entendimento de como esse progresso está sendo obtido — tecnologias de fim-de-linha, mudança organizacionais, novos processos, exploração da catálise — e se esse mesmo progresso pode ser sustentando adiante tendo em vista um possível comportamento de “retornos decrescentes.”

Segundo a perspectiva de Kemp e Soete, a incorporação da variável ambiental tenderia a se dar por inovações incrementais. Essa tendência implica que se deve procurar inicialmente nas trajetórias tecnológicas correntes, ligadas aos produtos convencionais, para se entender como surgirão provavelmente as alternativas técnicas para resolver problemas ambientais específicos. No caso da substituição dos CFCs, cuja melhor compreensão consistia o segundo objetivo desta tese, as principais alternativas colocadas pela indústria química (HCFCs, HFCs) vinham justamente de uma trajetória de desenvolvimento de produto inaugurada com o CFC-12 ainda década de 30. No lançamento por cada empresa de seus próprios *blends* de HCFCs e HFCs para refrigeração, pode-se reconhecer igualmente a continuidade de uma trajetória “geral” da indústria química, a qual consiste na diferenciação de produtos antes homogêneos entre produtores por inovações incrementais. O objetivo de minimizar os requisitos de adaptação foi também determinante na seleção das alternativas, como demonstra a escolha do HFC-134a e os critérios de formação dos *blends*, baseados principalmente na similaridade termodinâmica com os CFCs originais.

Apesar do papel preponderante das inovações incrementais, um olhar mais detalhado sobre a trajetória de substituição dos CFCs revela um processo complexo e dinâmico, marcado pela incerteza e volatilidade no marco regulatório e também pela

demanda de esforços não negligenciáveis por parte de produtores e usuários. Da perspectiva dos principais produtores químicos, pode-se destacar: os processos mais complexos de produção dos HCFCs e, especialmente, HFCs; o desafio de construir plantas de produção e desenvolver alternativas, incluindo testes toxicológicos, em um período de tempo relativamente curto; a controvérsia em torno das alternativas; e, por fim, a dificuldade de previsão da demanda, levando a um quadro de supercapacidade nos primeiros anos. Mais especificamente do lado do usuário, ressalta-se que não houve nenhum “substituto automático” e, assim, foram necessárias, por exemplo, mudanças de *design* nos novos refrigeradores e ainda conversões do equipamento antigo. Além disso, observa-se que os HFCs são mais caros que CFCs originais e não apresentam nenhuma vantagem de desempenho técnico para o usuário.

Um outro fator de complexidade é o aparecimento de substituintes alternativos também aos HCFCs e HFCs como os hidrocarbonetos para refrigeração, os agentes de limpeza orgânicos e os HFEs. Essas alternativas geralmente vieram de fora do círculo original dos produtores dos CFCs, seja por empresas voltadas a especialidades químicas (Petrochem, 3M) ou até mesmo por uma ONG, o Greenpeace, que ajudou no desenvolvimento e promoveu um refrigerador com hidrocarbonetos. Deve-se ser notar que o mercado de agentes de limpeza foi, na realidade, fragmentado em diversos tipos de soluções técnicas, incluindo “antigos” sistemas aquosos, e que o mercado de refrigeração, com a exceção de poucos países como a Alemanha, foi dominado pelos HCFCs e HFCs. Mesmo assim, as alternativas diferentes a estes compostos ilustram os desdobramentos possíveis de uma substituição motivada por um problema ambiental, mesmo que ela seja principalmente materializada por inovações próximas aos produtos convencionais.

Por fim, deve-se colocar que o entendimento da complexidade do processo de substituição dos CFCs é relevante para se pensar em como gerenciar e regular outras mudanças técnicas que porventura sejam postas como necessárias ou recomendáveis, de forma mais ou menos absoluta do que no caso dos CFCs. Uma indicação clara é que a interface entre produtores-usuários é fundamental para se entender a distribuição dos custos e responsabilidades envolvidas, como também para se conhecer as alternativas técnicas de mais fácil adoção tendo em vista a adaptabilidade os usuários.. Outra indicação, já citada, é a necessidade de se entender as trajetórias das tecnologias envolvidas, através das quais é

bem provável que surgirão as alternativas técnicas mais imediatas. Não se deve descartar o surgimento de alternativas menos convencionais, por vezes vindas de empresas menos estabelecidas no mercado corrente. Em geral, um entendimento das peculiaridades setoriais do processo de inovação é necessário, inclusive em um nível mais detalhado do que foi esboçado aqui no caso da indústria química. Pela sua importância econômica e pelo seu histórico ambiental, a indústria química merece ser objeto de estudos mais profundos sobre os seus impactos ecológicos correntes e potenciais e também sobre a sua capacidade em incorporar a variável ambiental em sua base tecnológica.

BIBLIOGRAFIA

- ACHILADELIS, B., SCHWARZKOPF, A., CINES, M. The dynamics of technological innovation: the case of the chemical industry. **Research Policy**, v. 19, p 1-34, 1990.
- ANDERSEN, B, WALSH, V. **Co-Evolution of Technological Systems, Blurring of Industry Boundaries and Broadening of Competencies in the Chemical Industry**. *Mimeo*, 1998. 53p.
- ARAÚJO, L.; HARRISON, D. **Technological Trajectories and Path Dependence**. IPM 2000 Paper, *mimeo*, 2000. Disponível em http://www.bath.ac.uk/imp/pdf/18_AraujoHarrison.pdf, Acessado em 20 de jan. de 2004.
- ARORA, A, GAMBARDELLA, A. Chemicals. In: Mowery, D. C. (ed.). **US Industry in 2000: Studies in Competitive Performance**. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999. p. 45-74.
- ARORA, A., LANDAU, R., ROSENBERG, N. (eds.). **Chemicals and Long-term Economic Growth – Insights from the Chemical Industry**. New York: John Wiley & Sons, 1998. 564p.
- ARTHUR, W. B. Competing technologies, increasing returns and lock-in by historical events. **Economic Journal**, v. 99, p. 116-131, 1989.
- ATOFINA. **Our History**. Disponível em <http://www.atofinachemicals.com/company/comp-history.cfm>, acessado em 10 de fev. 2004.
- BARAM, M., DILLON, P. Corporate management of chemical accident risks. In: Fischer, K., Schot, J. **Environmental Strategies for Industry – International Perspectives on Research Needs and Policy Implications**. Washington: Island Press, 1993. p. 227-241.
- BELLIA, V. **Introdução à Economia do Meio Ambiente**. Brasília: IBAMA, 1996. 262p.

- BERNARDINI, O., GALLI, R. Dematerialization: long-term trends in the intensity of use of materials and energy. **Futures**, v. 25, n. 4, p. 431-448, 1993.
- BRASSEUR, G. The endangered ozone layer. **Environment**, v. 29, n. 1, p. 6-11, 39-45, 1987.
- BRUNO, M. Tecnologia e estratégia das empresas do setor químico: conceitos e tendências. **Revista da Administração**, v. 30, n. 2, abr-jun, p. 5-17, 1995.
- CEFIC. **Facts And Figures: The European Chemical Industry in a Worldwide Perspective**, november. 2000. Arquivo em formato *Acrobat*, disponível em www.cefic.be acessado em 15 de agosto de 2003.
- CEFIC. **Facts And Figures: The European Chemical Industry in a Worldwide Perspective**, july. 2003a. Arquivo em formato *PowerPoint*, disponível em www.cefic.be acessado em 15 de agosto de 2003.
- CEFIC. **Facts And Figures: The European Chemical Industry in a Worldwide Perspective**, november. 2003b. Arquivo em formato *Excel*, disponível em www.cefic.be, acessado em 15 de agosto de 2003.
- CHAKRABARTI, A. Innovation and productivity: an analysis of the chemical, textiles and machine tool industries in the U.S. **Research Policy**, vol. 19, p. 257-269, 1990
- CHANDLER, A., D., JR., HIKINO, T, MOWERY, D. The evolution of corporate capability and corporate strategy and structure within the world's largest chemical firms: the twentieth century in perspective. In: Arora, A., Landau, R., Rosenberg, N. (eds.). **Chemicals and Long-term Economic Growth – Insights from the Chemical Industry**. New York: John Wiley & Sons, 1998. p. 415-458.
- CHEMICAL MARKET REPORTER. “ICI to Raise Its Global HFC-134a Capacity”. Disponível em http://www.findarticles.com/cf_dls/m0FVP/55_255/54965857/p1/article.jhtml, acessado em 10 de fev. de 2004. “Notícia”, jun. de 1999.

- CHEMICAL MARKET REPORTER. "Fluorocarbon Market Is Poised to Grow." Disponível em http://www.findarticles.com/cf_dls/m0FVP/25_257/63334450/p1/article.jhtml, acessado em 10 de fev. de 2004. "Notícia", jun. de 2000.
- CHENIER, P. **Survey of Industrial Chemistry**. 3^a Ed. New York: Kluwer Academic Publishers/Plenum Press, 2002. 513p.
- CHESNAIS, F., WALSH, V. **Biotechnology and the chemical industry: the relevance of some concepts**. *Mimeo*, 1994. 26p.
- CMA. **World Production and Sales of Fluorocarbons FC-11 and FC-12** UNEP, *mimeo*. 1981.
- COMISSÃO DAS COMUNIDADES EUROPÉIAS. **Livro Branco — Estratégia para a futura política em matéria de substâncias químicas**. 2001. Arquivo em formato *Acrobat*, disponível em <http://europa.eu.int/eur-lex/pt/com/wpr/2001/com20010088pt01.pdf>, acessado em 1/12/2003. 38p.
- COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso Futuro Comum**. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1988. 430p.
- CONDORCET, J. **Esboços de um Quadro Histórico dos Progressos Do Espírito Humano**. Tradução de Carlos Moura. Campinas: Unicamp, 1994. 205p.
- COOK, P. e SHARP, M. The chemical industry. In Freeman, C., Sharp, M., and Walker, W. (eds.). **Technology and the Future of Europe: Global Competition and the Environment in the 1990**. London: Pinter, 1991. p. 198-212.
- CORAZZA, R. **Políticas Públicas para Tecnologias Mais Limpas: Uma Análise das Contribuições da Economia do Meio Ambiente**. Tese de Doutorado. Campinas: UNICAMP, 2001. 291p.
- COUNCIL ON COMPETITIVENESS Sector Study: Chemical. In: (idem). **Endless Frontier, Limited Resources: U.S. R&D Policy for Competitiveness**. 1996.

- Disponível em http://nii.nist.gov/pubs/coc_rd/apdx_chem.html, acessado em 12 de junho de 1997.
- COWAN, R., HULTÉM, S. Escaping lock-in: the case of the electric vehicle. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 53, p. 61-79, 1996.
- DAVID, A. Clio and the economics of QWERTY. **American Economic Review**, v. 75, n. 2, p. 332-337, 1985.
- DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories: a suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. **Research Policy**, v.11, 147-171, 1982.
- DU PONT. “DuPont Increases Capacity for Suva® HFC-134a Refrigerant”. Disponível em <http://www.dupont.com/suva/na/usa/aa/news/pressrel.html>, acessado em 10 de fev. de 2004. *Press relase*, jul. de 1999.
- DUTLY, A. **Geschichte des Índigos**. Disponível em <http://www.dutly.ch/indigohtml/indigo1.html>, acessado em 15 de dezembro de 2003.
- ECIB. **Competitividade do Complexo Químico** (Nota Técnica). Estudo da Competitividade da Indústria Química Brasileira. *Mimeo*, 1993.
- ESTEGHAMAT, K. Structure and performance of the chemical industry under regulation. In: Arora, A., Landau, R., Rosenberg, N. (eds.). **Chemicals and Long-term Economic Growth – Insights from the Chemical Industry**. New York: John Wiley & Sons, 1998. p. 341-378.
- ESSERY, G. Managing environmental improvement within a major chemical complex. In: Smith, D. (Ed.) **Business and the Environment – Implications of the New Environmentalism**. New York: St. Martin, 1993. p. 116-130.
- FAUCHEUX, S., NOËL, J. **Les Menaces Globales sur l’Environnement**. Paris : La Découverte, caps. 11 e 12. 1990. p. 19-63.

- FREEMAN, C. Technical innovation in the world chemical industry and changes for techno-economic paradigm. In: Freeman, C., Soete, L. (eds.). **New Explorations in the Economics of Technical Change**. London: Pinter, 1990. p. 74-91.
- FREEMAN, C. **The Economics of Hope**. London: Pinter, 1992. 249p.
- FREEMAN, C., SOETE, L. **Work for all or Mass Unemployment? Computerized Technical Change into the 21st Century**. London: Pinter, 1994, 193p.
- FREEMAN, C., CLARK, J., SOETE, L (1982), **Unemployment and Technical Innovation: A Study of Long Waves in Economic Development**. London: Pinter, 1982. 214p.
- FREEMAN, C., PEREZ, C. Structural crises of adjustment, business cycles and investment behaviour. In: : Dosi, G. et al. (eds.). **Technical Change and Economic Theory**. London: Pinter, 1988. p. 38-66.
- GLAS, J. Protecting the ozone layer: a perspective from industry. In: Ausubel, J., Sladovich, H. (eds.) **Technology and Environment**. Washington: National Academy Press, 1989. p. 137-158.
- GLYNN, S. Constructing a selection environment: competing expectations for CFC alternatives. **Research Policy**, v. 31, p. 935-946, 2002.
- GODARD, O. Stratégies industrielles et conventions d'environnement: de l'univers stabilisé aux univers controversés. **INSEE — Méthodes "Environnement et Économie**, Paris: CIRED, p. 145-174, 1993.
- GREEN, K., YOXEN, E. The greening of European industry: what role for biotechnology? **Futures**, v. 22, n. 5, p. 475-495, 1990.
- GREENPEACE. No Excuses — A Greenpeace report on ozone and climate friendly technologies for CFC/HCFC/HFC replacement. Disponível em <http://archive.greenpeace.org/ozone/>, acessado em 10 de fev. de 2004..

- GUMPRECHT, W. **Refrigerants for the 21st Century**. Chemcases. Disponível em <http://chemcases.com/fluoro/index.htm>, acessado em 15 de dezembro de 2003.
- HEATON, A. **The Chemical Industry**. 2^a ed. Glasgow: Chapman & Hall, 1994. 384p.
- HERMAN, H. ARDEKANI, S., AUSUBEL, J. Desmaterialization. In: Ausubel, J., Slavodovich, H (eds.). **Technology and Environment**, Washington: National Academy Press, 1989. p. 50-69.
- HIKINO ET AL. The japanese puzzle. In: Arora, A., Landau, R., Rosenberg, N. (eds.). **Chemicals and Long-term Economic Growth – Insights from the Chemical Industry**, New York: John Wiley & Sons, 1998. p. 103-136.
- HOBSBAWN, E. **A Era dos Extremos — O Breve Século XX**. São Paulo: Companhia das Letras, 1995. 598p.
- HOFFMAN, A. Trends in corporate environmentalism — The chemical and petroleum industries: 1960-1993. **Society & Natural Resources**, v. 9, n. 1. p. 47-64, 1996.
- HOUNSHELL, D. A. Continuity and change in the management of industrial research: the Du Pont Company, 1902-1980. In: Dosi, G., Gianneti, R., Tonelli, P. (eds.) **Technology and Enterprise in a Historical Perspective**. Oxford: Clarendon Press, 1993, p. 231-260.
- HOUNSHELL, D., SMITH JR., J., K. **Science and Corporate Strategy — Du Pont R&D, 1902-1980**. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 756p.
- JAFFE *ET AL*. Environmental regulation and the competitiveness of U.S. manufacturing industry: what does the evidence tell us? **Journal of Economic Literature**, vol. 33, março, p. 132-163. 1995.
- KATZ, M. L., SHAPIRO, C. Technological adoption in the presence of network externalities. **Journal of Political Economy**, v. 94, n.4, p. 822-841, 1986.

- KEMP, R. Technology and the transition to environmental sustainability, the problems of technological shifts, **Futures**, v. 26, n. 10, p. 1047-1059, 1994.
- KEMP, R. **Environmental Policy and Technical Change: a Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments**. Cheltenham: Edward Elgar, 1997. 360p.
- KEMP, R., SOETE, L. Inside the green box: on the economics of technological change and environment. In: Freeman, C., Soete, L. (eds.). **New Explorations in the Economics of Technical Change**. London: Pinter, 1990. p. 245-257.
- KEMP, R., SOETE, L. The greening of technological progress, an evolutionary perspective. **Futures**, v. 24, n. 5, p. 437-457, 1992.
- KOWALOK, M. Common threads: Research lessons from acid rain, ozone depletion, and global warming. **Environment**, v. 35, n.6, p. 12-20, 35-38, 1993
- LANDES, D. **The Unbound Prometheus: Technological change and industrial development in Western Europe from 1750 to the present**. Cambridge: Cambridge University Press. 566p.
- LANDAU, R. Economic growth and the chemical industry. **Research Policy**, v. 23, p. 583-599, 1994
- LANDAU, R., ARORA, A. The dynamics of long-term growth: gaining and Losing advantage in the chemical industry. In: Mowery, D. (ed.). **US Industry in 2000: Studies in competitive performance**. Washington, D.C.: National Academy Press, 1999. p. 17-44.
- LANDAU, R., ROSENBERG, N. Successful commercialization in the chemical process industry. In: Rosenberg, N., Landau, R., Mowery, D. (eds.). **Technology and the Wealth of Nations**. Stanford: Stanford University Press, 1992. p. 73-119.
- LITFIN, K. **Ozone Discourses, Science and Politics in Global Environmental Cooperation**. New York: Columbia University Press, 1994. 257p.

- LOVELOCK, J.E., 1971, Atmospheric fluorine compounds as indicators of air movements, **Nature**, v. 230, 9 de abr., p. 379. 1971.
- LUNDVALL, B. A. Innovation as an interactive process: from user-production interaction to national system of innovation. In: Dosi, G. *et al.* (eds.). **Technical Change and Economic Theory**. London: Pinter, 1988. p. 349-369.
- MAGLIA, V., SASSON, C. **Chemical Industry and Regulation**. Research Project “Regulatory reform for the better functioning of market.” 1999. 59p. Arquivo em formato *Acrobat*, disponível em www.federchimica.it/content/files/chemical%20industry%20and%20regulation%20sett99.pdf, acessado em 15 de dezembro de 2003.
- MAHDI, S., NIGHTINGALE, P., BERKHOUT, F. **A Review of the Impact of Regulation on the Chemical Industry**. Final report to the Royal Commission on Environmental Pollution - SPRU. 2002. 45p. Arquivo em formato *Acrobat*, disponível em <http://www.rcep.org.uk/pdf/chin-txt.pdf>, acessado em 15 de dezembro de 2003.
- MANZER, L. E. The CFC-ozone issue: Progress on the development of alternatives to CFCs. **Science**, v. 249, p. 31-35, 1990.
- MARX, K. **O Capital : Crítica da Economia Política**. Trad. de Regis Barbosa e Flávio Kothe. V. 3, t. 1. São Paulo: Abril Cultural, 1984. 353p.
- MAXWELL, J., BRISCOE, F. There’s money in the air: the CFC ban and Du Pont’s regulatory strategy, **Business Strategy and the Environment**, v. 6. p. 276-286. 1997.
- McCORMICK, J. (1992), **Rumo ao Paraíso: A História do Movimento Ambientalista**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 1992. 224p.
- MEADOWS, D. *ET AL.* **Limites do Crescimento: um Relatório para o Projeto do Clube de Roma sobre o Dilema da Humanidade**. São Paulo: Perspectiva. 203p.
- MEADOWS, D., H. MEADOWS, D., L., RANDERS, J. **Beyond the Limits**. London: Earthscan Publications, cap.5, 1992. p. 141-160.

- MOLINA, M., ROWLAND, F. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atomic-catalysed destruction of ozone. **Nature**, v. 249, 28 de jun., p. 810-813, 1974.
- MURMANN, J., LANDAU, R. On the making of competitive advantage: the development of the chemical industries of Britain and Germany since 1850. In: Arora, A., Landau, R., Rosenberg, N. (eds.). **Chemicals and Long-term Economic Growth – Insights from the Chemical Industry**, New York: John Wiley & Sons, 1998. p. 27-70.
- NELSON, R., WINTER, N. In search of an useful theory of innovations. **Research Policy**, v. 6, p. 36-77, 1977.
- NELSON, R., WINTER, N. **An Evolutionary Theory of Economic Change**. Cambridge, Mass: Harvard Univ. Press, 1982. 437p.
- NOBLE, D. **America by Design**. New York: Alfred A. Knopf, 1982. 384p.
- NOËL, J. Les limites du Protocole de Montréal. In: Beaud, C, Bourguerra, M. (org.) **L'Etat de l'Environnement dans le Monde**. Paris : La Decouverte, 1993. p. 337-339.
- OZONE SECRETARIAT – UNEP. **The Ozone Story**. Arquivo em formato *Power Point*, disponível em www.unep.org/ozone/oz-story/ozonestory.ppt, acessado em 15 de dezembro de 2003. 2003
- PAVITT, K. Sectoral patterns of technical change: towards a taxonomy and a theory. **Research Policy**, v. 13, p. 343-373, 1984.
- PELAEZ, V., PONCET, C. **Stratégies industrielles et changement technique: Essai sur la logique de diversification de Monsanto**. Seminaire franco-brésilien de Florianópolis. *Mimeo*, 1998. 15p.
- PENROSE, E. **The Theory of the Growth of the Firm**. New York : Wiley, 1959. 272p.
- PIORE, M. SABEL, C. **The Second Industrial Divide: Possibilities for Prosperity**. New York: Basic Books. 1984. 354p.

- POWELL, R. CFC phase-out: have we met the challenge? **Journal of Fluorine Chemistry**, v. 114, p. 237-250, 2002.
- QUINTELLA, R. **The Strategic Management of Technology in the Chemical and Petrochemical Industries**: London: Pinter, 1993. 200p.
- ROCHE, A. **Fluorocarbons**. Arquivo em formato *Word*, disponível em <http://crab.rutgers.edu/%7Ealroche/fluorocarbons.html>, acessado em 10 de fevereiro de 2004.
- ROSENBERG, N. **Inside the Black Box**. Cambridge: Cambridge University Press, 1982. 304p.
- SALLES-FILHO, S., ROMEIRO, A. Dinâmica de inovações sob restrição ambiental. In: Romeiro, A., Reydon, B., Leonardi, M. (orgs.). **Economia do Meio Ambiente: Teoria, Políticas e Gestão de Espaços Regionais**. Campinas: IE/UNICAMP, 1997. p. 83-122.
- SCHOT, J. Constructive technology assessment and technology dynamics: the case of clean technologies. **Science, Technology and Human Values**, v. 17, n.1, p. 36-56, 1992
- SCHOT, J., HOOGMAN, R., ELZEN, E. Strategies for shifting technological systems: the exemplar of the automobile system. **Futures**, v. 26, p. 1060-1076, 1994.
- SHARP, M., GALIMBERTI, I. **Coherence and diversity: Europe's chemical giants and the assimilation of biotechnology**. *Mimeo*, 1993. 45p.
- SHERIDAN, V. **Seventy Years of Safety, Fluorocarbon Refrigerantes, the History of an Era: 1929-1999**. *Mimeo*. Arquivo em formato *Acrobat*, disponível em www.dupont.com/suva/emea/pdf/ref_history.pdf, acessado em 15 de dezembro de 2003.
- SCHUMPETER, J. **Teoria do Desenvolvimento Econômico**. Trad. de Maria Sílvia Possas. São Paulo: Nova Cultural. 1997. 239p.

TOMBS, S. The chemical industry and the environmental issues. In: Smith, D. (Ed.) **Business and the Environment – Implications of the New Environmentalism**. New York: St. Martin, 1993. p. 131-149.

U.S. CENSUS BUREAU. **Statistical Abstract of the United States**. (Vários anos). Arquivo em formato *Acrobat*, disponível em www.census.gov, acessado em 1 de agosto de 2003.

WALSH, V. Invention and innovation in the chemical industry: demand pull or discovery push? **Research Policy**, v. 13, p. 211-234, 1984.