

INFORMAÇÃO E TOMADA DE DECISÃO EM ORGANIZAÇÕES COMPLEXAS

Dissertação apresentada à
Universidade de Évora,
para obtenção do grau de
Doutor em
Gestão de Empresas



Orientação do Professor Catedrático 104 340
Doutor José Carlos das Dores Zorrinho

Évora
2000

*Em memória de
José Luís Lacerda.*

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	XI
RESUMO	XIII
ABSTRACT	XV
INTRODUÇÃO	3

PRIMEIRA PARTE GERIR EM TURBULÊNCIA

1. ORIGENS DA VIDA E MODELOS ORGANIZACIONAIS	17
1.1. O Aparecimento de Formas Vivas	17
1.2 Geração Espontânea ou Panspermia	18
1.3 Primeiras Formas de Vida – Princípios Organizacionais	21
1.4 Síntese do Capítulo	26
2. A VARIÁVEL INFORMAÇÃO NA CRIAÇÃO, MANUTENÇÃO E PERPETUAÇÃO DAS ORGANIZAÇÕES	27
2.1 Organização e Teoria dos Sistemas	27
2.2 Ordem, Desordem e Complexidade	31
2.3 Informação, Entropia e Neguentropia	37
2.3.1 Aspectos históricos da Teoria da Informação	40
2.3.2. Segundo Princípio da Termodinâmica, entropia e complexidade	45
2.3.3. Organização neguentrópica	50
2.3.4. Informação e neguentropia	55
2.4. Conceito de Organização Biológica	59
2.4.1. A lógica do vivo	61
2.5. Síntese do Capítulo	69
3. A INFORMAÇÃO NAS ORGANIZAÇÕES HUMANAS	73
3.1. O <i>Homo sapiens</i>	76
3.2. Origens Pré-Científicas	85
3.3 Nascimento da Astronomia e da Matemática	96
3.4. Homem, a Perpetuação e a Transmissão de Informação	90
3.5. Cultura, Sociedade e Conhecimento	101
3.6. Síntese do Capítulo	104

4. A MEDIDA DA INFORMAÇÃO	107
4.1. Um Pouco de História	108
4.2. Definição da Quantidade de Informação: Fórmula de Shannon	111
4.2.1. Quantidade de informação de uma mensagem	115
4.2.2. Alfabeto de 2 símbolos: definição de unidade bit	118
4.2.3. Informação de Shannon: significado e limitações	120
4.3. Codificação – Teorema da via sem ruído	126
4.4. Transmissão de Informação numa Via com Ruído	128
4.5. A Entropia Revisitada	133
4.6. Síntese do Capítulo	138
5. INFORMAÇÃO, TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO	141
5.1. O Conhecimento da Tecnologia	144
5.2. O Desafio Empresarial das Tecnologias de Informação	146
5.3. A Evolução dos Sistemas de Informação nas Organizações	151
5.3.1 As organizações empresariais	152
5.3.1.1. Precursores da Administração Científica	152
5.3.1.2. Abordagem clássica da Administração	154
5.3.1.3. O aparecimento das ciências comportamentais	156
5.3.1.4 A Teoria de sistemas	159
5.3.1.5. Teoria geral dos sistemas e abordagem contingencial	162
5.4. Dinheiro – o Bem Virtual por Excelência	164
5.5. Síntese do Capítulo	169
6. O PAPEL DA INFORMAÇÃO NOS PROCESSOS DE TOMADA DE DECISÃO	173
6.1. Informação de Suporte à Decisão	175
6.2. Estratégia Empresarial e Estratégia Informacional	179
6.3. Novas Perspectivas de Pensamento Estratégico	181
6.4. Síntese do Capítulo	185
7. CONCLUSÃO DA PRIMEIRA PARTE: GERIR EM TURBULÊNCIA	189

SEGUNDA PARTE	
DO CAOS À ORDEM, DA ORDEM AO CAOS	
8. A EVOLUÇÃO DO PENSAMENTO E AS TEORIAS CIENTÍFICAS	201
8.1. Os Filósofos de Mileto – Os Precursores	206
8.2. Platão e a Orientação Pitagórica	212
8.3. Sistematização Dedutiva	214
8.3.1. O Método Indutivo-Dedutivo de Aristóteles	215
8.3.2. Os modelos matemáticos de Ptolomeu	219
8.4. O declínio da Escola de Alexandria e a Ascensão do Império Muçulmanos	222
8.5. O despertar da Europa	223
8.6. Os primórdios da emancipação da ciência	225
8.7. A refutação à Filosofia Aristotélica	228
8.7.1. Os compromissos pitagóricos de Copérnico e Kepler	229
8.8. O Ataque à Filosofia Aristotélica	236
8.9. Síntese do Capítulo	242
9. A CONCEPÇÃO MECANICISTA – A era Newtoniana	247
9.1. As Leis Científicas Gerais de Descartes	249
9.2. Sistema do Mundo Segundo Newton	252
9.3. Poincaré não Gostava de Newton ?	266
9.4. Três Séculos Após Newton	270
9.5. Síntese do Capítulo	274
10. OS NOVOS PARADIGMAS DA FÍSICA	277
10.1. As Grandes Teorias da Unificação	278
10.2. Universo Quântico	279
10.3 Teoria Quântica dos Átomos	283
10.4. Teoria das Supercordas	284
10.5. Síntese do Capítulo	290
11. IRREVERSIBILIDADE E INSTABILIDADE DOS SISTEMAS COMPLEXOS	293
11.1. Os primórdios dos sistemas dinâmicos	294
11.2. Paradigmas da Ciência e uma Nova Visão do Mundo	312
11.3. A Irreversibilidade do Tempo	319
11.4. Estruturas Dissipativas	327
11.5. Do simples ao Complexo	331

11.6. Síntese do Capítulo	337
12. O CAOS E A GEOMETRIA FRACTAL	343
12.1. Benoit Mandelbrot e o Nascimento da Geometria Fractal	344
12.2. Quanto Mede a Costa da Bretanha?	353
12.2.1. O conjunto de Mandelbrot	356
12.3. A “Galeria dos Monstros” de Poincaré	359
12.4. A Equação Logística	361
12.5. Objecto e Estrutura Matemática Fractal	371
12.5.1. Dimensão Fractal de Conteúdo	374
12.6. Alguns Exemplos de Conjuntos Fractais	375
12.6.1. Conjunto Triádico de Cantor	376
12.6.2. A curva de Von Koch	378
12.6.3. A Curva original de Peano	381
12.6.4. Tapete de Spierpinski	385
12.7 O Movimento Browniano	387
12.7.1. O Expoente de Hurst	391
12.7.2. A natureza fractal do Expoente de Hurst	395
12.8. Sistemas de Pequena Dimensão com Equações Conhecidas	399
12.8.1. o mapa de Henon	399
12.8.2. A equação logística de retardamento	401
12.8.3. Expoentes de Lyapunov	402
12.9. Síntese do Capítulo	407
13. CONCLUSÃO DA SEGUNDA PARTE: DO CAOS À ORDEM, DA ORDEM AO CAOS	411
Referências Bibliográficas	413

TERCEIRA PARTE EQUILÍBRIO OU TURBULÊNCIA

14. A INFLUÊNCIA NEWTONIANA NO DESENVOLVIMENTO DA CIÊNCIA ECONÓMICA	419
14.1. Os Conceitos Newtonianos nos Fundamentos Epistemológicos da Economia	421
14.2. As influências Mecanicistas na Economia	434
14.3. Os Fundamentos da Complexidade dos Sistemas Económicos	436
14.4. As Concepções Evolucionistas	438
14.4.1. A Meca dos Economistas	440
14.4.2. O sistema económico como um sistema complexo adaptativo	443
14.4.3. Institucionalismo e modelação de	448

padrões	
14.5. Inovação, ciclos de negócio e capitalismo	451
14.5.1. Na perspectiva de Scumpeter	451
14.5.2. Na perspectiva de Keynes	461
14.6. Síntese do capítulo	472
15. ECONOMIA DA INFORMAÇÃO	477
15.1. Comunicação entre Potenciais Adversários	479
15.2. Assimetria de Informação	482
15.3. Escolha em Contexto de Incerteza	484
15.4. Modelos Comportamentais	490
15.4.1. Função de Valor Assimétrica	491
15.4.2. Racionalidade e Decisão	493
15.5. Síntese do Capítulo	498
16. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DOS MERCADOS FINANCEIROS	501
16.1. Mercados e Intermediários Financeiros	503
16.2. Regulamentação	510
16.3. Desregulamentação	515
16.4. Inovação Financeira	519
16.5. Síntese do Capítulo	528
17. EQUILÍBRIO, EFICIÊNCIA E CAOS NOS MERCADOS FINANCEIROS	531
17.1. Dinâmica não Linear e Complexidade	533
17.2. A Hipótese de Eficiência de Mercado	535
17.3. Teoria das Carteiras	547
17.4. Novos Modelos Adaptados às Novas Situações de Desequilibrium	552
17.4.1. A análise R/S nos Mercados de Capitais	553
17.4.2. Distribuição (Fractais) de Pareto	556
17.5. Mandelbrot e os Mercados Especulativos	562
17.6. Caos e Turbulência nos Mercados de Capitais	566
17.6.1. Dados sem inflação	567
17.7. Síntese do Capítulo	570
18. CONCLUSÃO DA TERCEIRA PARTE: EQUILÍBRIO OU TURBULÊNCIA	577
Referências Bibliográficas	581

QUARTA PARTE TURBULÊNCIA, INFORMAÇÃO E DECISÃO

19. O NOVO PARADIGMA	587
I. Evolução do pensamento científico	588
II. Organizações complexas	598

III. Modelo de decisão	606
CONCLUSÕES E SUGESTÕES	615
Bibliografia Consultada	631

AGRADECIMENTOS

Na hora da conclusão desta dissertação não poderia deixar de prestar o meu reconhecimento a todos aqueles que de uma forma ou de outra me acompanharam e apoiaram neste projecto de longo curso.

Assim e em primeiro lugar expresso o meu agradecimento aos alunos com quem tive o prazer de conviver e me ensinaram que o conhecimento é evolutivo e constroi-se no dia a dia.

Ao meu orientador Professor Doutor Carlos Zorrinho, pelo estímulo, colaboração e sugestões mantendo a habitual cláusula de desresponsabilização, sendo a autora responsável por todos os erros e omissões ocorridos ao longo do texto.

Ao Professor Doutor Francisco Louçã pela amabilidade no envio de diversos artigos sobre complexidade.

Ao Professor Doutor Amílcar Serrão pelo apoio, confiança e amizade demonstrada.

À Professora Doutora Ausenda Balbino pela grande amizade, acompanhamento e incentivos prestados.

Ao Presidente do Conselho de Departamento de Gestão de Empresas, Professor Doutor António Serrano pela dedicação sempre demonstrada.

Ao Professor Doutor Simões da Fonseca por todo o apoio e acompanhamento prestado.

Ao Professor Doutor Jacinto Vidigal e Dr.^a Elizabete Felix pelo aligeiramento de tarefas na parte final deste trabalho.

Aos meus colegas de Doutoramento Internacional Dr. António Sousa, Dr. José Ventura e Dr.^a Marta Silvério por toda a solidariedade existente ao longo do curso.

Aos meus irmãos Maria Helena e Nuno pela paciência demonstrada e apoio na composição do texto. Uma palavra de profunda gratidão para um grupo de amigos muito especiais, Marius, Analide e Sofia, Ana e António Miguel e João Assunção.

Aos Serviços de Reprografia e Publicações da Universidade de Évora, particularmente na pessoa do seu Responsável, Sr. Eng. Silva Carvalho, o meu sincero agradecimento, extensível a duas colaboradoras e amigas D.^a Fátima Zacarias e D.^a Maria Ana Duarte Silva.

Por fim, a meu marido, companheiro da curta caminhada da vida, e a meus Pais a quem dedico este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho visa propor um modelo teórico de apoio à tomada de decisão, em organizações complexas, no quadro do paradigma, caracterizado pela globalização e pela turbulência.

Encontra-se estruturado em quatro partes, sendo a primeira consagrada ao estudo das organizações complexas, por forma a evidenciar o paralelismo que existe, numa abordagem termodinâmica, entre os seres vivos e as organizações criadas pelo homem. Procura-se ainda destacar o papel da informação, no delineamento estratégico e na tomada de decisão.

Na segunda parte é abordada a conceptualização das grandes teorias científicas, desde os precursores até às mais recentes correntes do pensamento científico.

Na terceira parte é analisada a influência das metáforas newtonianas nos grandes paradigmas da ciência económica.

Na Quarta parte , caracteriza-se o paradigma actual e apresenta-se a proposta de modelo de tomada de decisão, enfatizando o papel que cabe à Teoria do Caos e à Geometria Fractal como instrumentos de apoio à previsão e à decisão

Finalmente, sugerem-se quatro linhas de investigação, a desenvolver a partir do estudo realizado.

ABSTRACT

This paper aims to suggest a theoretical model to support decision-making process, in complex organizations, within the scene of the new model characterized by globalization and turbulence.

It is structured in four different sections. Section I is dedicated to the study of complex organizations in order to show clearly the existing parallelism between living creatures and bodies created by men, in a thermodynamic approach. In addition, I intended to highlight the role of information in strategical planning and decision-making.

In Section II, the conceptualisation of the great scientific theories is approached. Theories developed since their precursors until the most recent streams of thought.

The influence of newtonian metaphors in the great models of economic science is analysed in Section III.

In Section IV, there is description of the current model and I present a proposal for a new model of decision-making, emphasizing the role of Chaos theory and fractal geometry as instruments of support for prediction and decision.

At last, I suggest four courses of investigation to be developed starting from the present study.

“Sendo me aperceber, encalhurei-me no pequeno ghetto das ciências humanas e, sempre que me aproxima-va do problema central, ficava muito afastado, pelas limitações dos meus conhecimentos e pela mesquinhice da minha cultura.

Com esta tomada de consciência, resolvi continuar a desaprender e a reprender tudo de novo e assim rever a base do meu sistema de pensamento. Desde então, autodidacta incorrigível, escarafunho às apalpadelas.”

Edgar Morin

Introdução

INTRODUÇÃO

O sistema económico é, por excelência, exemplo de um sistema complexo adaptativo, do mesmo modo que o sistema nervoso central, os sistemas imunitários, os organismos multicelulares. Esta concepção proporciona uma visão substancialmente diferente da economia tradicional. A teoria clássica assenta em agentes com uma racionalidade perfeita que operam num ambiente linear, estático e estatisticamente previsível. Pelo contrário, os sistemas complexos adaptativos consubstanciam interacções sucessivas não lineares entre um grande número de agentes de mudança. Estas interacções caracterizam-se por uma racionalidade limitada, adaptação (aprendizagem) e retornos crescentes. Como exemplos característicos podem enunciarse, a entrada de especuladores nos mercados de capitais, a antecipação de faltas e excedentes, a aprendizagem dos efeitos da alta tecnologia e a criação de nichos de mercado, em que uma inovação de sucesso cria uma teia de suporte e aumento das actividades económicas.

O cenário de actuação do sistema económico caracteriza-se por uma multiplicidade de nichos que podem ser explorados por adaptações particulares. Não existe nenhum super competidor universal que possa ocupar a globalidade dos nichos. Estes são continuamente criados por novos pro-

mento de novos nichos. Na natureza, processos como o parasitismo, a simbiose, a exclusão competitiva, etc., surgem sequencialmente. Pelo facto de serem vários os nichos de mercado e novos nichos serem continuamente criados, a economia opera longe de um óptimo (ou de um atrator global). Ou, dito de outro modo, os melhoramentos são sempre possíveis e, de facto, ocorrem regularmente

Os sistemas económicos contemplam múltiplos níveis de organização e interacção. As unidades económicas, em qualquer nível, actuam como *blocos de construção* de desenvolvimento de novas unidades para o nível superior seguinte. A globalidade da organização é mais do que hierárquica, dado o tipo de interacções complexas que se estabelecem entre os níveis (associações, canais de comunicação, etc.). Com a acumulação de experiência, os *blocos de construção* são combinados e revistos continuamente.

A informação é a fonte de ordem, uma ordem que todavia o homem não impôs. Esta ordem, oriunda da transmissão e permuta de informação, encontra-se nomeadamente nas células que constituem os corpos dos seres vivos, nos operários de uma fábrica, ou nos mercados. Em sistemas complexos, a informação é sempre incompleta, embora redutora de incerteza. Assim, tirar conclusões acerca da informação, obriga à utilização e recriação de padrões. A relação entre os conceitos de informação e de conhecimento, tem sido objecto de uma intensa reflexão. Do início ao fim de qualquer processo é utilizada informação, resultando da sua acumulação, isto é aquisição de conhecimento, a possibilidade e novas utilizações em processos idênticos, com menores níveis de incerteza. O conhecimento é então uma forma particular de informação armazenada.

Os processos de tomada de decisão procuram encontrar o melhor caminho de compreensão e previsão das opções individuais. A gestão empresarial caracteriza-se por ser um processo de decisão/ação: decisões certas... decisões rápidas... decisões que satisfaçam simultaneamente empresa/detentores do capital e clientes... decisões restritivas, sequenciais, interligadas. Tomar a decisão certa sobre como e quando actuar, é a variável chave de um problema, em que a parte essencial é o custo de obtenção, tratamento e utilização da informação.

Problema

O problema, objecto do presente estudo, consiste na inadequação dos modelos actuais, deterministas e mecanicistas, herdeiros de uma perspectiva newtoniana do mundo, face ao ambiente de turbulência em que gravitam as organizações complexas, e ao desenvolvimento acelerado das tecnologias de informação e de comunicação (TIC).

Nos mercados financeiros, o valor dos activos é fixado por antecipações de compra e venda emanadas do conjunto dos investidores. Estas tomadas de decisão têm por base os níveis de rendibilidade esperada e o risco dos activos em circulação no mercado, bem como a atitude do investidor em relação ao risco e ainda a taxa de juro dos títulos com rendimento certo no referido mercado. Assumindo os pressupostos básicos da teoria da utilidade, da homogeneidade e da racionalidade dos investidores, todos os participantes no mercado de capitais concordam acerca dos níveis de rendibilidade e risco de um activo e a decisão de aquisição dependerá apenas do comportamento em relação ao risco .

A análise do mercado denota no entanto uma grande diversidade de opinião entre investidores, assinalando a presença de outros factores que influenciam o funcionamento dos mercados e consequentemente, a decisão de investimento. As expectativas de cada agente económico dependem do nível e da qualidade de informação a que acedem. Pelos sinais evidenciados na informação disponível, o investidor elabora planos previsionais que evidenciam oportunidades alternativas de consumo, que terão reflexos nos níveis de preço dos activos em circulação, os quais irão depender dos sistemas de informação adoptados.

Em presença de um mercado perfeito toda a informação é instantânea, gratuitamente disponível e idêntica para todos os intervenientes no mercado, o que permite aos potenciais investidores analisar os níveis de rendibilidade futuros até um completo acordo sobre as distribuições de probabilidade desses níveis de rendibilidade. Todavia, os estudos empíricos de validação da consistência do modelo, evidenciam a violação da hipótese de informação perfeita. Com efeito, verifica-se que a selecção, recolha e tratamento de informação não é gratuita e a completa incorporação da informação disponível, não é instantânea. Por outro lado, as expectativas dos intervenientes no mercado não são homogéneas porque existem diferentes apreciações subjectivas dos níveis de rendibilidade para um mesmo período de antecipação.

Assim, a ocorrência de divergências entre compradores e vendedores conduz às seguintes questões: Como adquirir informação sobre os níveis de rendibilidade futura? Que quantidade de informação deve ser adquirida? Como tratar a informação recolhida de modo a obter ganhos competitivos?

vos? De que modo a produção de informação eficiente altera o valor dos activos no mercado?

A análise da intensidade do reflexo da informação identifica o grau de eficiência do mercado, o qual é determinado por referência à hipótese de informação perfeita. Demonstra-se (Fama, 1970) que, funcionando o mercado em condições de eficiência, toda a informação disponível é incorporada no preço dos títulos. Esta situação restringe as oportunidades dos investidores de traçarem uma estratégia de compra e venda e inviabiliza a possibilidade daqueles realizarem ganhos sistemáticos no mercado de capitais. Numa situação de mercado eficiente, nenhum investidor pode esperar ganhos monopolísticos ou adicionais resultantes da pesquisa e negociação da informação.

A diferença entre preço e valor é indicativa do grau de eficiência do mercado. Nos mercados financeiros em que os participantes são de tal modo numerosos que nenhum deles de *per si* tem poder suficiente para influenciar as cotações dos títulos, pode considerar-se que a eficiência do mercado se encontra garantida. As diferenças entre preço e valor são detectadas pelos analistas pressionando os activos para a alta ou para a baixa consoante o sinal dos desvios.

A eficácia do mecanismo de fixação de preços dos produtos financeiros baseada na teoria da eficiência dos mercados é hoje, todavia, posta em causa. A análise econométrica clássica assume que o sistema é consistente na ausência de influências externas ou exógenas, mantendo-se em equilíbrio os factores internos ou endógenos. A consistência do modelo baseia-se na hipótese de que a oferta iguala a procura, processando-se o

jogo num mercado eficiente. No entanto, factores endógenos e exógenos podem deslocar o modelo para longe das condições de equilíbrio. Como o mercado reage, este afasta-se das condições de estabilidade associadas à ordem e à meticulosidade Para Holland, um mercado baseado em agentes adaptativos, agentes de racionalidade limitada em lugar de agentes de racionalidade perfeita, contemplará maiores potencialidades de evidenciar a dinâmica “natural” dos sistemas.

O contexto actual, caracterizado por mudanças rápidas e elevados níveis de incerteza, a atenção é centrada em termos de informação recente, em detrimento das análises das médias de longo prazo e das previsões estatísticas, obrigando à necessidade de agir e pensar estrategicamente. O comportamento dos mercados é praticamente imprevisível; em simultâneo emanam características de ordem e de extrema desordem Os mercados são influenciados por diversos factores, muitos dos quais com interligações profundas entre si, pelo que, na prática não é possível prever o que irá acontecer no futuro. No entanto, a pesquisa, recolha e processamento da informação podem influenciar de modo positivo o processo de tomada de decisão.

Assim sendo, mudanças mais importantes, transformações completas dos sistemas de referência, inovações reais, não podem ser concebidas em termos de especificações a longo prazo. O resultado a longo prazo é imprevisível, pelo que devem ser analisadas as condições dentro das quais uma determinada mudança de fundo é uma possibilidade. A interpretação e utilização dos dados e as próprias técnicas de tomada de decisão e modelação têm de ser concebidas e analisadas de modo a antecipadamente prever situações de caos ou colapso.

O ambiente turbulento ou caótico que caracteriza o mundo dos negócios, associado ao comportamento dinâmico dos mercados de capitais e monetários, obriga à pesquisa e inovação de novos modelos capazes de representar, sem simplificações indevidas, sistemas complexos que se movem segundo formas e princípios. A complexidade e dinâmica dos mercados financeiros, conjugadas com uma irracionalidade aparente de comportamento dos intervenientes no mercado, evidenciam a pouca segurança e ineficácia dos modelos tradicionais de previsão de resultados, baseados nas tendências passadas do comportamento dos resultados, distribuição de dividendos e outras variáveis estruturais clássicas.

Indissociável da denominação que se atribui à era actual, de sociedade da informação, encontra-se o progresso tecnológico, o qual alterou de modo determinante a metodologia de investigação científica. A disponibilidade das novas tecnologias, aceleraram e melhoraram os processos de selecção, processamento, controlo e transmissão de dados e mudou significativamente não só a forma, como o conteúdo da ciência moderna, surgiendo como resultado uma terceira via de investigação, situada entre a teoria e a experiência, a simulação computacional da Natureza. Os novos instrumentos de investigação – com particular incidência para as tecnologias de informação – desconhecidas dos grandes nomes que ficaram na história das ciências como Aristóteles, Copérnico, Kepler, Bruno, Galileu, Newton, Poincaré e tantos outros – vieram permitir imitar a Natureza e recriar a complexidade dos factos na simplicidade de um algoritmo.

A perfeição de simulações informáticas de fenómenos da natureza adquiriu uma similitude entre as experiências tradicionais e as experiências

computacionais apenas distinguíveis porque, nas primeiras, manipula-se e interroga-se uma porção de matéria, ao passo que nas segundas, se inquire uma dada porção de matéria – o computador –, cujas partes se reuniram com um certo propósito. Nas experiências tradicionais age-se sobre a Natureza, em princípio desconhecida, e observa-se e quantifica-se a sua resposta, ao passo que nas simulações computacionais introduzem-se dados codificados e analisam-se os resultados para compreender todas as implicações deles resultantes; experiência que se pode repetir quantas vezes se desejar. Cria-se assim, um universo virtual que permite novas interpretações da realidade.

Na última década, os cientistas tentaram compreender fenómenos como o caos, a complexidade e a mudança, e as organizações tentaram sobreviver a elas. Ambos, cientistas e empresários chegaram à mesma conclusão: caos, complexidade e mudança estão em toda a parte; controlá-los exige novas formas de ver e de pensar.

As ciências da complexidade e em particular a Teoria do Caos, proporcionam informação sobre as dinâmicas de mudança nas quais as decisões são tomadas, ou seja o mundo real. Esta nova postura de olhar a ciência, permite a descrição ordenada de comportamentos complexos e imprevisíveis de sistemas não lineares, sistemas onde vivem e trabalham todos os seres, incluindo os humanos. No âmago desta nova perspectiva de ciência, está a descoberta de que, sob o que aparenta ser desordem, há ordem – um tipo de modelo de auto-organização, forma ou estrutura que emerge através de uma teia entrelaçada, de conexões e de inter-relações no sistema em análise – e o que mais motiva a investigação é o relacionamento entre dinâmicas, ou os “*como?*”, de qualquer sistema em análise.

O conceito básico sublinhado é de que o mundo não é ordenado, qualquer pequena alteração ou incerteza nas condições de um ponto de partida tornarão as previsões sobre o comportamento, senão impossíveis, pelo menos extremamente difíceis.

O desenvolvimento científico actual evidencia que os sistemas naturais e humanos são caracterizados por descontinuidades ou seja, o tipo de dependência sensitiva às condições iniciais, tem vindo a alterar o modo de análise e abordagem de diferentes situações, mudanças descontínuas exigem um tipo de pensamento descontínuo. Nesta forma de abordagem dos problemas, nada deve ser omitido no período de transição da estabilidade para o caos – e vice-versa – porque conduzem frequentemente a desequilíbrios, mesmo que apenas pontuais.

Os critérios enunciados aplicam-se a qualquer sistema vivo e permitem, em muitas situações, antecipar como responder ou influenciar a uma crise emergente antes que ela ocorra. Sabe-se que na maior parte das análises, a disponibilidade de dados é insuficiente para compreender de modo claro o presente; mais insuficiente é ainda, para prever situações futuras. Contudo nesta nova perspectiva de ciência, o futuro acontece hoje, ou o presente é o futuro no seu estado mais criativo.

Objectivo

O presente trabalho prossegue o objectivo geral de delineamento de um modelo teórico de tomada de decisão, em organizações comple-

xas e em ambiente de turbulência que confira, não só maior eficácia de decisão mas também uma melhor previsibilidade do futuro.

O processo de concretização deste objectivo geral desdobra-se nos seguintes objectivos intercalares:

1. evidenciar a importância da informação como factor determinante do comportamento das organizações complexas adaptativas;
2. evidenciar a importância da Teoria do Caos e da Geometria Fractal, como instrumentos estratégicos de apoio à tomada de decisão; e ,
3. focalizar a aplicação da Teoria do Caos e da Geometria Fractal, no processo de tomada de decisão no caso específico dos mercados de capitais

Método

Para atingir os objectivos enunciados, segue-se, como metodologia sequencial: (i) o estudo das organizações complexas e o papel que nestas exerce a informação, (ii) a procura de integração do conhecimento actual emergente em diversos domínios da ciência, para a compreensão das condicionantes que actuam sobre as organizações complexas, (iii) a análise da evolução do pensamento e das teorias científicas, e a influência que as mesmas tiveram na ciência económica., e, finalmente, (iv) a formulação de um modelo teórico de tomada de decisão.

Estrutura

O trabalho que se apresenta, encontra-se estruturado em quatro partes.

Na primeira parte são analisadas as organizações e a complexificação que estas registam à medida que evoluem. Neste contexto, é feita uma análise das organizações artificiais, criadas pelo homem, tendo como contraponto a própria evolução das organizações naturais. Reconhecida a importância da informação no funcionamento e na homeostasia das organizações, é analisada neste ponto assim como os suportes tecnológicos que conferem valor à informação. Ainda nesta parte, é analisado o papel da informação nos processos de tomada de decisão.

Na segunda parte é abordada a epistemologia científica e a conceptualização das grandes teorias científicas, desde os precursores até às mais recentes correntes do pensamento e do desenvolvimento científico.

Na terceira parte, é analisada a influência das metáforas newtonianas nos grandes paradigmas da ciência económica. Ainda nesta parte, são analisados os mercados financeiros e, em particular, o mercado de capitais, na perspectiva do seu modo de organização e funcionamento. São ainda estudados o modo de comportamento do investidor no mercado de capitais à luz da teoria tradicional e identificadas as causas de ruptura dos modelos tradicionais, no processo de tomada de decisão. Analisam-se ainda os modelos propostos, baseados na teoria do caos e na geometria fractal, que se encontram ainda em fase embrionária, a nível da ciência económica.

Na quarta parte, sintetizam-se os aspectos tratados nas partes anteriores, com destaque para a influência que exerceu e exerce o pensamento científico na ciéncia económica, e com relevância para a compreensão das condicionantes que actuam na homeostase das organizações complexas e no processo de tomada de decisão.

Tendo em conta o regime de turbulênciа, a complexidade tendencialmente crescente e o elevado grau de imprevisibilidade em que operam as organizações complexas, entre as quais se enquadra o próprio mercado de capitais, apresenta-se uma proposta de meta-modelo de tomada de decisão e apontam-se as perspectivas de um novo paradigma, construído numa perspectiva transdisciplinar, que integra não só, como no passado, os vectores "objectivos" mas também toda a impresisibilidade que resulta da própria natureza humana.

PRIMEIRA PARTE

GERIR EM TURBULÊNCIA

“Todos os anos, num dia de Primavera, ao entrar no jardim, sinto o mesmo choque, a mesma estupefação. Todos os anos é a mesma admiração pelos rebentos que nascem e começam a desabrochar, pelas folhinhas, renda verde que decora os ramos e treme sob a brisa, como se receasse falhar o seu número de magia. Mas o mais admirável é que nunca falha. O sistema funciona mais uma vez. Uma vez mais os dias vão ser longos, a luz e o calor vão voltar. As folhas vão formar-se, depois as flores e as sementes. Animais e plantas vão transbordar de vida e de crescimento. Nem o menor salto nem a menor hesitação. O programa é inviolável. Indiferente aos assuntos dos homens, a grande máquina do Universo continua a girar inexorável e discreta. Mais do que o oceano e as sua tempestades, mais do que a montanha e os seus glaciares, do que a abóbada celeste e as sua galáxias, o regresso dessa tremura verde que percorre as árvores e nos surpreende numa manhã de Primavera dá-me, com a força da evidência, a impressão de assistir a um espectáculo grandioso que agita, há cerca de 12 mil milhões de anos, o grande palco Universo”.

François Jacob

1. ORIGENS DA VIDA E MODELOS ORGANIZACIONAIS

1.1. O Aparecimento de Formas Vivas

A história do Universo é composta de uma sequência de simetrias irregulares e de imperfeições controladas. Esta imperfeição na perfeição propiciou o aparecimento da vida, expressa na multiplicidade de seres que povoam o planeta e que resultam da conjugação, em última análise, de quatro forças principais: gravidade, nuclear forte, electro-magnética e nuclear fraca.

No decurso da evolução do universo, a matéria agrupou-se em galáxias e depois em estrelas e planetas, incluindo a Terra. Desde o momento da sua formação, esses corpos manifestavam já três características: complexidade, diversidade e individualidade. Porém, essas propriedades tomaram novos significados com a emergência dos sistemas complexos adaptativos. Na Terra essa emergência esteve associada à origem da vida terrestre e ao processo de evolução biológica. Neste processo de evolução, continua a ser de difícil compreensão a via pela qual as células vivas se desenvolveram a partir da matéria inerte e deram origem à complexidade e diversidade de formas vivas que pululam por toda a Terra. Para Thuan

(1998), uma conclusão é todavia verosímil: os seres vivos não parecem poder ser explicados, em termos reducionistas, como conjuntos de partículas que interagem localmente. Um princípio de organização holística aplicável à escala global de todo o organismo, parece ser exigido (THUAN, 1998).

Sabe-se que a atmosfera da Terra e as condições ambientais actuais são completamente distintas das que imperavam há cerca de 4,6 biliões de anos, quando ocorreu a condensação do sistema solar a partir de uma nuvem de gazes e poeiras. Estas condições, ainda que muito diferentes das actuais, potencializavam, em princípio, o aparecimento de formas vivas, dado o posicionamento favorável que a Terra desfrutava na órbita solar. Tal como afirma Rosnay (1996): *Todo o planeta que possui água e se encontra a uma distância óptima de uma estrela quente tem possibilidade de acumular moléculas complexas em pequenos glóbulos que permutterão substâncias com o próprio meio em que se encontram. De necessidade em necessidade, a evolução química resultará em seres vivos rudimentares* (ROSNAY, 1996). A origem da vida na Terra ou a sua inoculação por seres extraterrestres terá ocorrido no período entre 3,9 e 2,5 biliões de anos, conhecido por período Arqueano, mas o mistério de como e onde surgiu a primeira forma de vida continua por desvendar.

1.2. Geração Espontânea ou Panspermia

Como a matéria inanimada deu origem a matéria viva tem sido fruto de múltiplas teorias e especulações. Para Hoyle (1993), não existe qualquer prova objectiva que sustente a hipótese de que a vida tenha tido início num *caldo orgânico* na Terra. Para este autor, considerar a Terra como centro biológico do Universo é uma postura quase idêntica à adoptada, antes de Copérnico, em que se considerava a Terra como o centro geo-

métrico e físico do Universo. A Terra pode ser considerada uma *linha de montagem*, com vantagens comparativas relativamente a outros locais, desg nadamente pela presença de água líquida por quase todo o lado, à sua superfície. Tal facto, potencia o desenvolvimento da vida, em particular, no que respeita ao aumento da complexidade, no qual assenta o *processo de evolução* (HOYLE, 1993).

As teorias ou as especulações sobre a origem da matéria viva, ainda não encontraram consenso entre os cientistas, confrontando-se, no essencial, duas grandes correntes de pensamento: i) a vida surgiu da matéria, por geração espontânea; e, ii) a vida veio do espaço transportada, por exemplo, por meteoritos.

A teoria da geração espontânea idealizada por Platão e formulada como teoria científica por Aristóteles, encontra as suas origens em importantes centros civilizacionais do antigo Egipto, China, Índia e Babilónia. Segundo esta teoria, que viria a ser a base da cultura científica medieval e formatou a mentalidade dos homens até meados do século XIX, *a vida ter-se-ia originado do nada e a matéria não conteria vida, antes, seria infundida com ela*. A partir desta corrente filosófica, a Igreja Católica desenvolveu a sua concepção mística da origem da vida. Santo Agostinho viu na geração espontânea uma manifestação divina – a animação da matéria inerte - e São Tomás de Aquino desenvolveu-a de acordo com o ensino da Igreja Católica.

A refutação da teoria da geração espontânea dá-se definitivamente com Thomas Huxley e Louis Pasteur. A Huxley deve-se a primeira explicação clara de que a vida tem uma base física comum: protoplasma, funcional, formal e substancialmente o mesmo em toda a extensão de seres vi-

vos. Em actividade, todos os organismos revelam *movimento, crescimento, metabolismo e reprodução*. Nas suas formas, são compostos de células nucleadas; e, na substância, todos são compostos por proteínas. Por sua vez, para Pasteur, a vida só poderia surgir da própria vida. Através de experiências demonstrou que germes microscópicos existem em toda a parte e que as gerações espontâneas de microorganismos resultam, na realidade, da contaminação dos meios de cultura por germes vindos do exterior, isto é, originários de outras formas de vida preexistentes (THUAN, 1998).

Provado e demonstrado que a vida não poderia ocorrer espontaneamente, desenvolveu-se uma nova teoria – teoria da panspermia¹ -, segundo a qual a Terra teria sido inseminada por organismos vivos oriundos de outros planetas, ou mesmo de outros sistemas solares, propagados por esporos e veiculados por meteoritos, ou poeiras cósmicas (ROSNAY, 1996). Esta teoria, inicialmente, defendida por Arrhenius, difere substancialmente do conceito original sobre a origem da vida na Terra, uma vez que panspermia, significa “sementes por toda a parte” (CRICK, 1988).

A evidência contraria, no entanto, esta teoria, pois a existência de raios ultra violetas no espaço, destruiria rapidamente qualquer esporo bacteriano. Contudo, a teoria da panspermia continuou a ser objecto de investigação e a receber novos contributos, concretamente através de Francis Crick e Leslie Orgel. Estes autores sugeriram que a fim de evitar lesões, os microrganismos pudesse ter sido transportados numa nave espacial sem tripulação enviada para a Terra por uma outra civilização superior, a qual se teria desenvolvido a alguns milhares de anos atrás. Esta nave espacial não tinha tripulantes, para que o seu raio de acção fosse o

¹ Desenvolvida pelo químico sueco Svante Arrhenius, nos começos do ano de 1907, no seu livro “Worlds in the Making”.

mais longe possível. A vida teria começado na Terra por ser o raio de ação, mais longe possível de atingir. Crick e Orgel designaram esta nova teoria por *panspermia dirigida*, a qual foi publicada discretamente no *Icarus*, um jornal sobre o espaço, editado por Carl Sagan.

Mas apoиando uma passagem de Francis Crick (1988) reforça-se que, *mais do que resolver o problema da origem da vida na Terra, pretendemos é estabelecer uma base sobre a qual qualquer solução se possa apoiar. E que base essa! Da diminuta dimensão dos átomos e das moléculas até ao vasto panorama do universo inteiro; desde os acontecimentos que têm lugar numa fração infinitesimal do segundo até à duração inteira da própria vida, desde o Big Bang ao presente; desde a interacção complicada das próprias moléculas orgânicas à infinita complexidade das civilizações superiores e da alta tecnologia ao vasto panorâmico do universo inteiro* (CRICK, 1988).

1.3. Primeiras Formas de Vida – Princípios Organizacionais

O conhecimento científico actual afasta definitivamente a hipótese de a vida se ter gerado espontaneamente, por acaso. Deste modo, considera-se o postulado da existência de um ou numerosos princípios de organização subjacentes à evolução que ocorreu desde as moléculas dispersas no *caldo primitivo* até às complexas hélices entrelaçadas do ADN², suporte de informação genética.

Assumindo, então, a hipótese da origem da vida ter tido início no *caldo primitivo* terrestre, ou em qualquer outra circunstância, terá ocorrido uma série de bifurcações abruptas que conduziram, nível após nível, pata-

² Ácido desoxirribonucleico, adiante designado ADN.

mar por patamar, a estados de organização mais e mais complexos, até à emergência de uma estrutura capaz de se replicar e depois, finalmente, à vida. Que formas assumem estes princípios de organização? Como nos sistemas abertos afastados do equilíbrio, a matéria pode auto organizar-se e conduzir o sistema para situações portadoras de complexidade e organização (THUAN, 1998). Trata-se da denominada teoria da complexidade e da auto-organização, formulada por Henri Atlan, segundo a qual, sob os efeitos do acaso e do “ruído”, a vida seria capaz de assumir formas cada vez mais complexas.

Para Atlan, o “ruído” habitualmente destrói; no entanto, em algumas circunstâncias particulares, e precisamente quando se está perante sistemas auto-organizados, este “ruído” pode, simultaneamente, destruir e construir (DUPUY, 1993³). Sendo os sistemas biológicos, sistemas abertos que interagem com o meio envolvente, podem passar por pontos de bifurcação que os projectam de forma abrupta para estados mais organizados. Pelo que, não é inverosímil admitir que a evolução biológica se tenha desenrolado deste modo. Em vez de ser impelida pelo acaso das mutações genéticas e pela selecção natural, pode ter progredido de bifurcação em bifurcação, de auto-organização em mais auto-organização, elevando-se progressivamente na escala da complexidade (THUAN, 1998).

Não é fácil arranjar uma definição concisa para o princípio “vida”. Talvez a melhor via de abordar o problema seja a de descrever tudo o que se conhece sobre os processos básicos da vida e generalizar a partir daí. Esta análise permite verificar o elevadíssimo grau de complexidade organizada que cada um dos níveis encerra, em particular ao nível molecular, visto ser pacífica a afirmação de que as estruturas que facilmente se vêem

a olho nu, tal como as que apenas são visíveis ao nível do microscópio, são, todas elas, formadas por complexas interacções dos seus componentes moleculares.

Deste modo, pode então descrever-se a história da vida como uma evolução de baixo para cima, uma progressão a partir de formas extremamente rudimentares e simples até organismos de uma complexidade e de uma sofisticação indescritível. A evolução da vida é comparável à formação de uma escala de organização, ou à ascensão de uma pirâmide de complexidade, onde, numa concepção antropocêntrica, o homem é normalmente colocado no ponto mais elevado da escala ou da pirâmide e considerado o destino final da longa viagem da vida. Não obstante, é inequívoco – os numerosos estudos paleontológicos demonstram-no – que, durante 3,5 biliões de anos da história da Terra, não parou a evolução do simples ao complexo, progredindo do pouco organizado ao supremamente sofisticado.

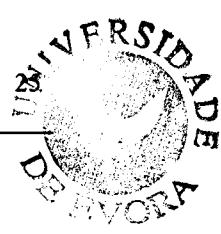
Como pode o acaso ser o único responsável por esta marcha incessante para a complexidade? Instintivamente sabe-se, e as leis da termodinâmica confirmam-no, que o acaso actuando, por si só, tende a desfazer mais do que a construir, a semear a desordem mais do que a instaurar a ordem. Quanto mais complexo é um sistema, mais sujeito à degradação, ao disfuncionamento e à deterioração se encontra. Deixe-se completamente ao acaso uma qualquer estrutura; se essa estrutura constituir um sistema complexo, deteriorar-se-á muito mais rapidamente do que uma estrutura simples. Qualquer erro introduzido pelo acaso terá consequências mais graves num sistema altamente estruturado do que num sistema simples.

³ Baseado na entrevista concedida por Jean Pierre Dupuy a Guita Pessis-Pasternak.

Despido das suas múltiplas complexidades, o mecanismo de base de evolução é simples. Este mecanismo foi sugerido por Darwin e Wallace, cada um deles, tendo-o concebido após a leitura do *Ensaio sobre o Princípio da População*, de Malthus, publicado em 1796. Em resumo, os organismos vivos devem necessariamente competir para alcançar alimentos, acasalar e obter espaço para viver, e fá-lo-ão com outros elementos das suas próprias espécies. Devem evitar os predadores, assim como outros perigos. Neste contexto, alguns, mais aptos, deixarão mais descendentes que outros, e são as características genéticas de tais procriadores que irão passando preferencialmente às gerações que sucedem. Em termos mais técnicos, se um gene confere “adequabilidade” aumentada ao seu possuidor, a probabilidade desse gene ser encontrado num conjunto de genes na geração seguinte é superior. Trata-se do fundamento da denominada selecção natural. À primeira vista, quase parece uma tautologia; contudo, não são as palavras que interessam, mas os mecanismos subjacentes.

Em termos muito abstractos, pode analisar-se como devem ser esses mecanismos. A propensão dos sistemas complexos para se desconcertarem mais rapidamente, explica-se pelo facto de haverem muito mais sistemas complexos do que sistemas simples. Além de que, entre todos os estados possíveis, existem muito mais estados desordenados do que ordenados. Deste modo, se o acaso só dita o reajuste dos genes responsáveis pelas mutações genéticas, pode-se esperar uma desordem crescente que degradará os seres vivos mais do que uma ordem crescente que os tornará cada vez mais estruturados e adaptados. Este problema pode também ser formulado em termos de conteúdo de informações. *A informação necessária para construir um organismo vivo está*

contido nos seus genes. Um organismo que cresce em complexidade exige maior quantidade de informação. Quanto mais sofisticados se tornam os organismos, maior é a necessidade de a molécula de ADN encerrar informação. Esta situação é demonstrada pela teoria da informação, pela análise de que as perturbações aleatórias que sobrevêm ao acaso – denominadas *ruido* – tendem a reduzir o conteúdo da informação ao invés de a aumentar.



1.4. Síntese do Capítulo

1. ORIGENS DA VIDA E MODELOS ORGANIZACIONAIS

- 1.1. O Aparecimento de Formas Vivas
- 1.2. Geração Espontânea ou Panspermia
- 1.3. Primeiras Formas de Vida – Princípios Organizacionais

Das galáxias aos átomos, a matéria tende a organizar-se em entidades às quais se reconhecem como características, a complexidade, a diversidade e a individualidade.

Com a emergência da vida, outras organizações surgiram, necessariamente complexas, que evidenciam como características suplementares, a auto-replicação e a adaptabilidade. Estas duas características confluem para uma terceira: a capacidade para evoluírem em direção a formas diferentes, certamente mais complexas.

Diversas foram e são ainda, as teorias que procuram explicar a origem da vida. Todavia, mais importante do que resolver este problema, é a necessidade de estabelecer bases universais sobre as quais qualquer solução se possa apoiar, para auxiliar a compreender os fenómenos.

Estas bases gerais encontram expressão nas leis da complexidade as quais decorrem, em última análise dos Princípios da Termodinâmica. Como se pode ver nos capítulos seguintes, quanto maior for a complexidade, maior o volume de informação necessário.

2. A VARIÁVEL INFORMAÇÃO NA CRIAÇÃO, MANUTENÇÃO E PERPETUAÇÃO DAS ORGANIZAÇÕES

2.1. Organização e Teoria dos Sistemas

A organização é a maravilha do mundo físico. Como é que a partir dumha deflagração incandescente, de uma massa de fotões, electrões, protões e neutrões se puderam organizar pelo menos 10^{73} átomos, que para lá de milhões de milhões de sóis fervilham nos 500 milhões de galáxias assinaladas (e para lá de dois a três biliões de anos-luz, já não ouvimos grande coisa)? Como é que, a partir do fogo, puderam surgir estes biliões de máquinas de fogo? E, é claro, como pôde surgir a vida? (MORIN, 1997).

Quem não olhou um dia o céu estrelado? Um amontoado de estrelas dispersas ao acaso; noite após noite num universo aparentemente imperturbável, desde sempre e para sempre, cada estrela no seu lugar, muitas delas ligadas por linhas imaginárias, dando lugar a figuras também elas imaginárias, e cada planeta realizando o seu ciclo impecável. Neste olhar atento, e sob um céu sereno, surgem, por vezes, estrelas cadentes,

meteoro luminosos dando a impressão que se soltam e caem da abóbada celeste, no mesmo momento que estrelas nascem, explodem e morrem. A ordem e a desordem combinam-se harmoniosamente num universo que se organiza, desintegrando-se.

O objectivo da Física clássica consistia na resolução de problemas relacionados com fenómenos naturais, a partir de um conjunto de unidades elementares, com base em leis “cegas” da natureza. Esta era a concepção *laplaciana* segundo a qual, a partir da posição inicial e da cinética das partículas, se pode prever, no limite, a posição de um átomo em qualquer instante. Esta visão mecanicista foi reforçada quando as leis determinísticas da Física foram aditadas pelas leis estatísticas. Em contraste com a visão mecanicista, surgiram novos problemas da Física, problemas de globalidade, interacção dinâmica e organização, para os quais as leis existentes se tornaram insuficientes para dar uma resposta consistente.

Sabe-se actualmente que tudo quanto a Física concebia como elemento simples, possui uma organização: o átomo e a molécula, assim como a vida e a sociedade. Mas até à referida época, ignorava-se totalmente o conceito de “organização”, embora estivesse subjacente em tudo o que constitui o núcleo central da *physis*, isto é, tudo o que é dotado de existência. Pelo contrário, a ordem era um conceito omnipresente e esmagador. Com o reconhecimento da existência da desordem e dos primeiros refluxos da ordem, a interacção torna-se a ideia central da Física moderna, actuando como uma placa giratória onde se confrontam as ideias de desordem, de ordem, de transformação e, finalmente, a de organização (MORIN, 1997).

Mas o que é uma organização? Segundo Morin, numa primeira definição, *a organização é a disposição de relações entre componentes ou indivíduos, que produz uma unidade complexa ou sistema, dotada de qualidades desconhecidas ao nível dos componentes ou indivíduos. A organização liga, de modo inter-relacional, elementos, acontecimentos ou indivíduos diversos que, a partir daí, se tornam os componentes de um todo. Garante solidariedade e solidez relativa a estas ligações, e portanto assegura ao sistema uma certa possibilidade de duração apesar das perturbações aleatórias. Portanto a organização: transforma, produz, liga, mantém* (MORIN, 1997).

Do conceito de organização, proposto por Morin, emerge um outro conceito, ainda não abordado, o de unidade complexa ou sistema. Todos os objectos-chave da Física, da Biologia, da Sociologia, da Astronomia, sejam eles átomos, moléculas, células, organismos, sociedades, astros e galáxias, constituem sistemas. Fora dos sistemas só existe a dispersão particular. Este conceito impõe-se actualmente na grande maioria dos campos científicos; mas desde Galileu até meados do nosso século, não foi estudado nem reflectido, surgindo apenas como uma noção de apoio. Este facto é explicável pela dupla e exclusiva atenção dada simultaneamente aos elementos constitutivos dos objectos e às leis gerais que os regem, o que impedia toda a emergência da ideia de sistema face à heterogeneidade dos constituintes e aos princípios de organização.

Deste modo, os sistemas encontravam-se, como se encontram, por toda a parte, mas a nível científico não detinham ainda um campo próprio. A noção de sistema estava afastada do seu princípio de unidade, implícita ou explícita, não conseguindo alcançar um nível teórico.

Durante a década de 50, Von Bertalanffy elaborou a *Teoria Geral dos Sistemas*, que instaura finalmente a problemática sistémica. A divulgação

desta teoria (VON BERTALANFY, 1998) encontrou vários êxitos em diversos campos científicos. No entanto, embora comporte aspectos radicalmente inovadores, a Teoria Geral dos Sistemas nunca abordou o *sistema*; omitiu aprofundar o seu próprio fundamento e reflectir sobre o conceito de sistema.

Le Moigne (1977) aborda numa perspectiva sistémica, o conceito de organização, definindo-o como toda a estrutura que possui capacidade de transformar, produzir, ligar e manter (LE MOIGNE, 1996). Assim, todo o sistema é uno e múltiplo. A multiplicidade pode respeitar apenas a constituintes semelhantes, como um átomo, um cristal, ou uma molécula, e distintos, como os átomos de um conjunto cristalino. Esta diferença é suficiente para que se constitua uma organização com imposições próprias – a disposição de cada átomo por exemplo, e produza emergências, como as propriedades cristalinas. Todavia, tais sistemas são pobres em relação aos sistemas que, dos átomos aos sóis, das células às sociedades, são organizações de sistemas complexos, pela diversidade dos constituintes. Estes sistemas não são apenas unos e múltiplos, mas também unos e diversos. A diversidade é tão necessária para a sua própria unidade, como a unidade para a sua diversidade.

Para Von Bertalanfy (1969), o que caracteriza uma organização, independentemente da forma que assume, são as noções particulares de globalidade, de crescimento, de diferenciação, de hierarquia, de ordem, de dominância, de controlo, de competição, etc. Estas noções não habitam a Física clássica. A teoria dos sistemas tem, no entanto, capacidade para interactuar com este tipo de problemáticas, através do desenvolvimento de modelos matemáticos ajustados ao sistema em análise. Em alguns casos,

podem ser desenvolvidas teorias específicas a partir da dedução de hipóteses gerais ou de casos particulares (VON BERTALANFY, 1998).

A função integradora da Teoria Geral dos Sistemas, de Von Bertalanfy pode ser sintetizada afirmando que: (i) até ao desenvolvimento da referida teoria, a unidade da ciência foi encarada na perspectiva de redução de todas as leis científicas às leis gerais da Física, pelo que a resolução de qualquer fenómeno, teria de ser encarada no quadro de acontecimentos físicos; (ii) uma concepção unitária do mundo não pode basear-se na esperança de reduzir todos os níveis da realidade ao nível físico, mas antes no isomorfismo das leis nos diferentes campos, o que significa que existem uniformidades de esquemas aplicáveis; (iii) em oposição com o reducionismo, emerge o holismo (conceito em que o todo é fundamental), sendo que um fenómeno não pode ser deduzido a partir dos seus componentes, pois o todo é muitas vezes maior que a soma dos respectivos componentes (VON BERTALANFY, 1998).

2.2. Ordem, Desordem e Complexidade

O desenvolvimento de todas as ciências naturais ocorre a partir de meados do século XIX, através do questionamento do antigo determinismo e no confronto da relação entre *ordem* e *desordem*. No entanto, é impossível reduzir a visão nos domínios de conhecimento do mundo natural, histórico ou social, em termos de ordem e desordem. Com efeito, os termos ordem e desordem são as noções derivadas ou consequentes, por um lado, do determinismo (ligação entre uma ordem simples e uma causalidade simples) e da necessidade (onde o carácter de imposição inelutável é posto em relevo); por outro lado, do indeterminismo (noção puramente

privativa), do acaso (noção que põe em relevo a imprevisibilidade) e da liberdade (possibilidade de decisão e de escolha) (MORIN, 1997).

O problema da relação ordem/desordem é de nível *radical* e paradigmático. Porque a definição de uma relação deste tipo interfere em todas as teorias, em todos os discursos, em toda a *praxis* e até, em toda a política. A ideia de ordem e a ideia de desordem opõem-se e negam-se, repelem-se mutuamente e toda a colisão provoca a desintegração de uma pela outra. Segundo Morin, a partir da catástrofe, a desordem e a ordem nascem quase em simultâneo, desde os primeiros momentos do universo. O que é “único real”, é a conjunção da ordem e da desordem (MORIN, 1997).

Com efeito, os termos ordem e desordem controlam noções derivadas ou consequentes. Com a ordem, relaciona-se o conceito de determinismo e de necessidade. No que concerne ao primeiro, trata-se de uma ligação entre uma ordem e uma causalidade simples. Enquanto o segundo conceito coloca em destaque o carácter de imposição inelutável.

A desordem, pelo contrário, evidencia as noções de indeterminismo, de acaso e de liberdade. O acento tónico é assim colocado inicialmente numa noção puramente primitiva: posteriormente, no carácter de imprevisibilidade e finalmente na possibilidade de decidir e seleccionar.

Não é fácil a abordagem do termo ordem, porque esta noção não é simples e monolítica e ultrapassa, pela riqueza e variedade das suas formas, o antigo determinismo que concebia a ordem sob o aspecto único de lei anónima, impessoal e suprema. Nesta lei determinística, a noção de ordem interliga-se com a ideia de determinação, no sentido de coacção. De modo diverso, o actual termo de ordem abandona o aspecto de lei no

sentido de coacção, tendo passado a relacionar-se com as noções de estabilidade, de constância, de regularidade e de repetitividade, ou seja, tem subjacente a ideia de estrutura ou sistema.

A abordagem da ordem contém determinadas singularidades; *a sua própria universalidade é singular porque o nosso universo é, donaíante, concebido como um universo singular, que teve um nascimento e um desenvolvimento singulares; aquilo a que se pode chamar de ordem é o fruto de coacções singulares, próprias deste universo* (MORIN, 1994). Este conceito de ordem aplica-se, de igual modo, no que respeita à matéria viva, porque a ordem viva está ligada a seres vivos singulares, resultando as espécies vivas como produtoras-reprodutoras de singularidades. Portanto, a ordem já não é antinómica da singularidade e esta nova ordem afasta definitivamente a antiga concepção de que só há ciência do geral. Em suma, o conceito de ordem está ligado à ideia de interacção. Com efeito, as grandes leis da natureza tornaram-se leis de interacção, ou seja, não podem operar se não houver corpos que interactuem.

Com o aparecimento da noção de estrutura, a ideia de ordem apela para a definição de um outro conceito, o de organização. Com efeito, a ordem singular de um sistema pode ser concebida como a estrutura que o organiza, sendo o sistema, a outra face da ideia de organização. Assim, uma organização constitui e mantém um conjunto ou “todo” não redutível às partes, porque dispõe de qualidades emergentes e de coacções próprias e comporta retroacção das qualidades emergentes do “todo” sobre as partes. Por isso, as organizações podem estabelecer as suas constâncias próprias, como é o caso das organizações activas, das máquinas, das auto-organizações e dos seres vivos em geral, que estabelecem regularidades e produzem estabilidades. Em síntese, pode afirmar-se que as organizações produzem ordem, sendo co-produzidas por princípios de ordem, para

tudo o que é organizado no universo. Contudo, a organização não pode ser reduzida à ordem, embora comporte e produza ordem. Assim, a complexificação da ordem não só não dissolve a ideia de organização, mas pelo contrário reforça o próprio conceito. Surge, então, uma ideia enriquecida de ordem, que recorre ao conceito de interacção e de organização.

No entanto, o conceito enriquecido de ordem, relativizou-o, porque complexificação e relativização são noções que percorrem o seu caminho lado a lado. A ordem perde, deste modo, no plano biológico, no universo estelar, galáctico e cósmico, o lugar de ordem absoluta, incondicional e eterna. Neste processo de complexificação, a desordem assume também outro plano no campo científico. O conceito de desordem comporta sempre dois pólos, um polo objectivo e um polo subjectivo.

No polo objectivo, cinco tipos de situações estão intrinsecamente ligadas com a desordem: (i) as agitações, dispersões e colisões relacionadas com todo o fenómeno energético; (ii) as irregularidades e as instabilidades; (iii) os desvios que podem perturbar e transformar um determinado processo; (iv) as desorganizações e as desintegrações; e, (v) em linguagem informacional, os *núdos* e os erros. Quanto ao polo subjectivo, a desordem traduz-se pela incerteza em qualquer decisão.

A desordem pode então perspectivar-se como um macroconceito que envolve realidades muito diferentes. Invadiu o Universo, no sentido em que não há qualquer sector do Universo em que não ocorra desordem. A desordem está na energia, no tecido sub-atómico e na origem acidental do Universo, no núcleo chamejante das estrelas. A desordem é, de facto, indissociável da evolução do Universo; omnipresente, e apesar de oposta, mantém uma estranha cooperação com a ordem para gerar organização. A

desordem coopera na geração da ordem organizacional, ao mesmo tempo que a ameaça incessantemente com a desintegração. Esta ameaça pode ser externa – acidente destrutivo – ou interna – aumento da entropia.

Desconhece-se se a incerteza provocada por um fenómeno aparentemente aleatório resulta da insuficiência dos meios de análise ou da própria incapacidade dos recursos do espírito humano. Qual a insuficiência que impede de encontrar a ordem oculta por detrás da desordem aparente? Será o acaso uma desordem objectiva ou simplesmente fruto da ignorância humana?

O acaso enfatiza a problemática da incerteza do espírito humano diante da sua própria realidade. O determinismo do século XIX era uma afirmação ontológica sobre a natureza da realidade; excluía a organização, o ambiente e o observador. *A ordem e a desordem reintroduzem uns e outros. Ambas pedem à ciência que seja menos simplificadora e metafísica. Porque o determinismo era um postulado metafísico, uma afirmação transcendental sobre a realidade do mundo* (MORIN, 1994).

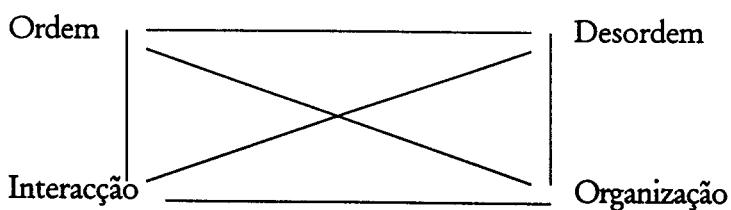
Um Universo estritamente determinista, onde apenas reinasse a ordem seria um Universo sem devir, sem inovação, sem criação. Do mesmo modo, reinando apenas a desordem, esta seria incapaz de conservar a novidade e por conseguinte, a evolução e o desenvolvimento. Um mundo absolutamente determinista ou absolutamente aleatório seria um mundo pobre e mutilado. Porque o primeiro é incapaz de evoluir e o segundo incapaz de nascer.

O mundo resulta então de uma mistura ininteligível dos dois mundos. Para o compreender é necessário algo mais que a ordem e a desor-

dem. É preciso interiorizar que a ordem é relativa e relacional e que a desordem é incerta; que uma e outra podem ser faces de um mesmo fenômeno.

O Universo constituiu-se na e pela desordem, isto é, na e pela catástrofe original e as rupturas que se seguiram, no e pelo desenvolvimento desordenado de calor, nas e pelas turbulências, nas e pelas desigualdades de processos que comandaram toda a materialização, toda a diversificação e toda a organização. Ordem e desordem estão intrinsecamente relacionadas com as duas outras noções, de interacção e de organização, as quais, se interligam complementando-se ou antagonizando-se, sendo representáveis por um tetagrama.

O tetagrama permite conceber que a ordem do Universo se autoproduz ao mesmo tempo que o próprio Universo se autoproduz, através de interacções dialógicas que produzem organização mas também desordem. Este tetagrama é necessário para conceber as morfogéneses, porque foi nas turbulências e na diáspora que se constituíram as partículas, os núcleos e os astros; foi na forja furiosa das estrelas que se constituíram os átomos: e a origem da vida são remoinhos, turbilhões e relâmpagos. São, portanto, as morfogéneses, mas também as transformações, as complexificações, os desenvolvimentos, as degradações, as destruições, as decadências que o tetagrama nos permite conceber. O tetagrama formula, não a chave do conhecimento, mas as suas condições e limites incompreensíveis (MORIN, 1994).



A necessidade de pensar em conjunto na complementaridade, na concorrência e no antagonismo das noções de ordem, desordem e organização, obriga a respeitar a complexidade física, biológica e humana. A complexidade não é a palavra mestra que explica qualquer acontecimento ou fenómeno, é a palavra que desperta o homem para explorar tudo que o rodeia.

2.3. Informação, Entropia e Neguentropia

É comum identificar-se o último século deste milénio, como a *era da informação* ou da *revolução da informação*. Estas denominações têm por vezes, pelo modo pouco preciso com que são abordadas, banalizado o que constitui a natureza ou especificidade do conceito de informação. A informação é um conceito complexo, omnipresente desde o aparecimento da vida e inerente a qualquer processo evolutivo. Deste modo, a informação serviu e continua a servir ainda de quadro de reflexão tanto em Biologia, em Física, em Psicologia, em Economia, em Linguística, como em diversos outros ramos da ciéncia.

O poder da informação, no final do século XX, resulta do desenvolvimento tecnológico onde se enquadra todo o campo informático desde as tecnologias do computador às auto-estradas da informação, passando pelas tecnologias do controlo e da comunicação, assim como o próprio desenvolvimento da sociedade dos media. O mesmo tipo de impacto, com alterações profundas em diversos campos científicos, ocorreu há dois séculos no que concerne ao conceito de energia, factor chave da revolução industrial, donde resultaram as invenções da máquina a vapor e do motor

de combustão e, em consequência, o caminho de ferro e automóvel, entre outros.

Curiosamente, verifica-se que ao longo do tempo, as grandes invenções da humanidade assentam quer na capacidade de utilizar a energia (o fogo, a roda, a vela, o moinho, a máquina a vapor, a electricidade, o motor de combustão, a bomba atómica) quer na capacidade de utilizar a informação: a linguagem, a escrita, a impressão, a fotografia, o telefone, o rádio, a televisão, o computador. Em resumo, uma tipologia original permite traçar a quase totalidade da evolução das ciências e técnicas desde o aparecimento do homem (DION, 1997).

Em termos epistemológicos, verifica-se que, tanto no caso da energia como no da informação, o nascimento de um conceito único e de uma unidade de medida comum é bastante posterior ao surgimento de numerosas aplicações práticas. Pode afirmar-se que em ambos os casos, a utilização do recurso antecedeu a sua conceptualização: apenas nos meados do século XIX, os físicos concebem uma identidade de natureza entre a energia mecânica, o calor e a energia eléctrica (entre outros), quantificando-a nos mesmos termos, através de uma nova unidade física, o *joule*. Paralelamente, apenas um século depois, o mesmo percurso pode ser observado no que respeita à informação, com o aparecimento da nova teoria de Claude Elwood Shannon. A noção, até então vaga e simplesmente qualitativa de informação, obtém subitamente um sentido preciso ao mesmo tempo que se desenvolve uma unidade de medida própria, o *bit*.

A publicação, em 1948 de “*A Mathematical Theory of Communication*”⁴, comumente designada por Teoria da Informação, da autoria de Shannon, em 1948, permanecerá certamente como um dos grandes marcos da história das ciências no século XX. Nesta obra, Shannon concebe a informação como uma grandeza observável e mensurável, tornando-a assim a pedra angular da teoria da comunicação. A abordagem da teoria de Shannon é original na medida em que é a única que propõe uma aproximação verdadeiramente quantificável do fenómeno de comunicação. A quantificação do fenómeno comunicação, como analisa Dion, comporta um duplo efeito: por um lado (*i*) “*restringe a teoria da informação aos aspectos formais da comunicação, negligenciando tudo o que possa respeitar a conteúdos de mensagem*; e, por outro, (*ii*) “*propõe soluções práticas para problemas materiais e concretos, como a melhoria da quantidade de comunicações que é possível veicular sobre uma linha telefónica, o que a valida no plano técnico, mais do que no plano fundamental*” (Dion, 1997). A Teoria da Informação é então a única teoria de referência que enquadra convenientemente os problemas formais de comunicação, e permite analisar, em particular, os problemas de escolha dos símbolos transmitidos, a frequência de ocorrência, a codificação, etc.

Afigura-se oportuno, aliás, assinalar, antes mesmo de abordar a génesis da teoria da informação, que esta resulta, não da visão de um sábio que teria ele próprio a ambição de criar um modelo geral de comunicação, mas bem mais modestamente de um trabalho práctico de engenheiros que pesquisavam uma forma de melhorar a *performance* dos utensílios físicos de transmissão da informação, em particular das linhas de telégrafo, na companhia de telégrafos e telefones Bell. Esta companhia procurava o modo mais económico e mais seguro para transmitir as mensagens. Assim, o quadro original da teoria é o de um sistema de comunicações onde um

⁴ Editada por Bell System Technical Journal, 27, 1948.

emissor transmite uma mensagem a um receptor, através de um determinado canal. Por hipótese, emissor e receptor dispõem do mesmo código, isto é, conhecem as categorias de sinais utilizáveis. A mensagem em código é transmitida, do emissor ao receptor, através do canal, sob a forma de símbolos ou sinais passíveis de ser decompostos em unidades de informação denominadas *bits*.

O *bit* pode ser definido como um acontecimento que desfaz a incerteza dum receptor colocado diante de uma alternativa, na qual as duas saídas são, para ele, equiprováveis. Quanto mais numerosas forem as eventualidades que este receptor pode encarar, mais acontecimentos informativos comporta a mensagem, maior será a quantidade de *bits* transmitidos. Sendo evidente que nenhum receptor mede em *bits* a informação contida através de uma mensagem, torna-se necessária a intervenção, na relação comunicacional, de um elemento novo, o observador. Este dispõe da teoria e mede a informação, com base no cálculo binário, a partir da probabilidade de ocorrência de um acontecimento relativamente ao número de possibilidades (MORIN, 1997).

De modo a visualizar uma perspectiva, da Teoria da Informação e enquadrar os desenvolvimentos científicos nesta área, analisa-se sucintamente a evolução da história da comunicação, após a origem do homem e da escrita.

2.3.1. Aspectos históricos da Teoria da Informação

Os sistemas mais comuns e rudimentares de comunicação que apareceram com as primeiras espécies vivas muito antes, aliás, do

homem, e que ainda hoje perduram, eram essencialmente mecânicos, sonoros, luminosos e moleculares, percepcionados respectivamente por receptores tácteis, auditivos, visuais e olfactivos. Em algumas espécies, identificam-se ainda, sistemas de comunicação baseados na utilização de descargas eléctricas.

A comunicação apresenta, contudo, o seu grande desenvolvimento através da vocalização desenvolvida pela espécie humana, cuja expressão mais elaborada é a palavra. Pouco se conhece ainda sobre os códigos utilizados nas primeiras permutas vocais. Pelo contrário, graças às pesquisas arqueológicas, é mais fácil estudar as primeiras formas de comunicação escrita. Estas misturam-se com a origem dos desenhos de formas gráficas correspondentes aos sons mais frequentes, para evoluir posteriormente para alfabetos compostos unicamente por símbolos abstractos representando a totalidade dos sons elementares. Esta forma de simplificação combinatória terá sido motivada, na origem, pela dificuldade técnica de representação e da consequente morosidade, quando se tratava de gravar mensagens na madeira ou na pedra, prosseguindo nos tempos modernos com o aparecimento de meios de produção, de escrita, como a impressão com caracteres móveis, a dactilografia, a estenografia, etc.

A partir do momento em que aparecem as formas abstractas e simplificadas de comunicação, aparecem também as formas primitivas de codificação e, consequentemente, as tentativas de decodificação; paralelamente, desenvolveu-se a reflexão sobre o fenómeno de codificação, as condições e as características dos sinais utilizados.

Por outro lado, desde que surgiu o interesse pela transmissão de comunicação à distância, que se é confrontado com o problema da simplificação e da economia dos códigos. Um dos primeiros métodos conhecidos foi concebido pelos Gregos, 300 anos antes de Cristo. Este método utilizava combinações de 25 letras do alfabeto em 5 colunas e 5 linhas. Esta organização permitia comunicar à distância as coordenadas das letras de uma mensagem utilizando o número correspondente de archotes acesos. Bem mais tarde, no fim do século XVIII, a Agência Reuter montou e desenvolveu uma rede de 220 telégrafos, o que permitiu a transmissão de mensagens a uma distância de cerca de 2 000 quilómetros, ao ritmo de um símbolo por minuto (DION, 1997).

Os sistemas binários de transmissão de informação aparecem em diferentes épocas e, separadamente, em diferentes partes do globo: sinais de fumo dos Índios da América, batimentos de tambor em África, alfabeto *morse* no Ocidente. Estes sistemas apresentam um certo número de características assinalavelmente distintas relativamente aos sistemas alfábéticos clássicos: (i) dissociação simbólica total da linguagem oral; (ii) simplificação máxima do conteúdo da mensagem; (iii) simplificação máxima do alfabeto utilizado (abaixo de dois símbolos distintos a comunicação é impossível); (iv) bom poder combinatório; e, (v) aptidão particular para a codificação. Samuel Morse (1791-1872), inventor do alfabeto com o seu nome, utilizou bastante antes da formulação da Teoria da Informação um certo número de princípios básicos desta, em particular a afectação, aos símbolos mais frequentes do alfabeto fonte (e, t, a, etc.) os símbolos mais curtos do alfabeto codificado (. , - , .. , etc.). Ainda que se tratasse de uma aplicação imperfeita, o código definido com base naqueles princípios

revelou-se suficientemente eficaz, e a sua utilização foi efectivamente consagrada tanto no plano económico, no plano militar ou, ainda, em planos meramente práticos. Os estudos efectuados indicam que o código *morse* permite atingir uma eficácia de 85% da codificação óptima, o que é uma característica notável para um código concebido em 1832 (DION, 1997).

As reflexões subjacentes à concepção deste sistema criptográfico necessitavam do estudo de frequência de ocorrência de todas as letras do alfabeto (as tabelas de frequência apareceram em 1380), depois das combinações das várias letras entre si (as tabelas mais antigas de combinações de duas letras, denominadas diagramas, datam do século XVII). Mas estas investigações permaneceram ainda, durante um determinado período de tempo, um pouco isoladas e desprovidas de uma teoria centralizadora. Os progressos só conheceram um novo rumo no começo do século XX, com o impulso dado pela estatística matemática e pelos significativos avanços técnicos verificados, quase em simultâneo, na tecnologia de transmissão de sinais (DION, 1997). Estes dois factores forneceram as condições ideias para o aprofundamento de matérias e consequentemente de novas abordagens científicas, posicionando-se deste modo, como os principais propulsionadores do aparecimento de uma nova teoria científica, a Teoria da Informação.

O que sobressai, na originalidade da Teoria da Informação é a transversalidade científica, a qual tem contribuído para o enriquecimento, em diferentes graus, de numerosos campos científicos diferentes e independentes, como a Informática, a Termodinâmica, a Biologia, a Psicologia, a Economia e a Linguística, (entre outras), partici-

pando também na concepção de numerosas metáforas em Filosofia, sobre a natureza da vida e da arte em particular. Com efeito, trata-se de uma teoria da medida da informação. Na Física, esta ideia foi expressa, em 1872, nos trabalhos de Boltzmann sobre a entropia de um sistema como o seu grau de ordem. Assim, a Teoria da Informação não é, à partida, senão uma teoria estatística, desenvolvida fora do quadro conceptual das ciências físicas.

Uma analogia real entre a quantidade de informação e entropia significa que este conceito de informação tem um interesse prático no tratamento estatístico de determinados problemas de comunicação, mas também que expressa uma realidade física universal no que respeita às outras grandezas físicas mensuráveis como a energia, entrando assim de pleno direito no domínio das ciências da natureza. Reciprocamente, a constatação de uma tal analogia, reflecte-se inevitavelmente sobre a maneira de compreender a noção de entropia e então, pelo mesmo motivo, modifica sensivelmente o quadro clássico das ciências, em particular, no que respeita ao *papel do observador* e da *medida* (ATLAN, 1992).

Henri Atlan (1992) cita J. Rothstein para demonstrar como a medida física constitui um caso particular de comunicação: *Pode associar-se a qualquer método ou aparelho de medida um conjunto de alternativas, desigualdade o conjunto das indicações discerníveis que ele comporta. Antes que a medida seja efectuada não se sabe qual daquelas indicações aparecerá como resultado do processo de medida. A medida como selecção de uma das indicações carrega informação física, sendo a palavra "informação" tomada com o seu sentido preciso definido pela teoria das comunicações. Ter um ponto de vista operacional é não admitir nenhuma fonte de informação física além da medida e utilizar a linguagem da*

Teoria da Informação aplicada à medida (ATLAN, 1992). Com esta abordagem quantitativa pretende-se demonstrar que toda a medida física é acompanhada inevitavelmente de variações de entropia do sistema global que constitui o aparelho de medida/sistema onde se desenrola o fenómeno a medir. Este ponto de vista desenvolve e sublinha as consequências de uma evidência: os conceitos físicos mais comuns não existem senão como interpretações de experiências actuando sobre grandezas mensuráveis.

2.3.2. Segundo Princípio da Termodinâmica, entropia e complexidade

A termodinâmica opõe o sistema aberto, comportando trocas materiais e energéticas com o exterior, ao sistema isolado que não realiza tais trocas, e ao sistema fechado. Neste último podem verificar-se trocas de energia, mas não de matéria com o exterior, como no caso da Terra, que recebe energia sob a forma de radiação.

Von Bertalanfy definiu, em 1969, os organismos vivos, como sistemas abertos (Von BERTALANFY, 1998), também denominados sistemas dissipativos por Prigogine⁵ (PRIGOGINE e STENGERS, 1986), precisamente porque estes têm uma necessidade vital de extrair matéria e energia do meio. A partir daí, desenvolve-se a ligação entre termodinâmica e organização viva. Se esta, em vez de aumentar a sua entropia, isto é, desintegrar-se, se mantém e até se desenvolve, é porque extraí matéria e energia, incessantemente do meio.

⁵ A Nova Aliança

Depois de Boltzmann, o Segundo Princípio da Termodinâmica expande-se, deixando de se referir apenas à energia, mas também à ordem e, sobretudo à organização. Ora, a sua posição não poderia deixar de ser controversa, numa Física onde não se podia estabelecer nenhuma relação entre a ideia de ordem e a ideia de desordem e onde sobretudo não se dava nenhum lugar à noção de organização. Assim, o Segundo Princípio não podia articular-se nem com um conceito de ordem – sempre repulsivo – nem com um conceito de organização – sempre ausente.

Boltzmann, há mais de um século, demonstrou que o equilíbrio é o estado em que não há dinâmica (os estados do sistema são sempre os mesmos), não pode haver evolução, é um estado excepcional no Universo. É mesmo difícil dar um só exemplo de um sistema natural que esteja em equilíbrio. Apenas em sistemas completamente fechados se pode antever essa possibilidade. Tais sistemas são os mais simples e por isso mesmo os primeiros sobre os quais foram feitos modelos matemáticos de previsão. Desses modelos resulta uma conclusão para a direção da trajectória global do Universo: o destino do Universo é o equilíbrio onde, tudo igual, tudo monótono, permanecerá sempre igual, i.e., morto, porque o Universo é um sistema fechado; para além dele, nada mais há.

Na ordem global das coisas, a desordem, sinônimo de estrutura sem nexo, sem organização e sem função, crescerá, mas também é certo que, uma vez criada uma estrutura que está longe do equilíbrio, quer seja uma estrutura orgânica, quer funcional, essa estrutura tudo fará para se manter em existência e, se possível, tentará propagar-se. O teorema do equilíbrio, o teorema H de Boltzmann, é a grande exceção do Universo (CARVALHO RODRIGUES, 1994).

Segundo a perspectiva da Física clássica, a entropia na sua acessão mais simplista, não passa de uma medida desprovida de qual-

quer poder de inferência sobre a *physis* e o cosmo no seu conjunto. Ao invés, no seu sentido mais amplo, o Segundo Princípio da Termodinâmica apresenta-se como a grande lei do universo, que se aplica não só a todos os objectos físicos concebidos isoladamente, mas também ao devir universal, até ao seu fim inclusivo. Assim sendo, justifica-se a questão de saber por que razão tudo não é já desordem e poeira cósmica, ou seja, como se constituíram e “dialogam” ordem e desordem?

O Primeiro Princípio da Termodinâmica quantifica as trocas de energia de um sistema físico com o seu meio no decurso de uma transformação qualquer. Todo o sistema físico e mais precisamente todo o sistema macroscópico, possui uma certa forma de energia, que os físicos denominam por energia interna. Esta energia, habitualmente designada por U , expressa-se em função das variáveis termodinâmicas clássicas: a temperatura, a pressão e o volume. Encontra-se ligada ao movimento de partículas que compõem os corpos. Segundo a sua formulação tradicional, o Primeiro Princípio respeita unicamente a sistemas fechados (BOUTOT, 1993).

O Primeiro Princípio afirma precisamente que a variação da energia interna de um sistema fechado, no decurso de uma transformação qualquer (que conduz o sistema de um estado inicial designado por 1 para um estado final designado por 2), é igual à diferença entre o calor que recebeu e o trabalho que forneceu. Designando por U a energia interna, Q o calor recebido e W o trabalho fornecido, este princípio traduz-se na seguinte expressão:

$$U_2 - U_1 = Q + W \quad (1)$$

Ao longo de uma transformação qualquer, a variação da energia interna depende então unicamente dos estados extremos do sistema (do estado final e do estado inicial). A energia interna é então uma *função de estado*: não depende da história do sistema, isto é do caminho percorrido para ir do estado inicial ao estado final. No caso particular em que o sistema é não somente fechado, mas também isolado, isto é, não recebe nem produz, nem calor nem trabalho ($Q = W = 0$), a energia interna permanece constante no decorrer de qualquer transformação ($U_2 = U_1$). Por este motivo, é comum denominar-se este princípio como princípio da conservação da energia. É de notar que o primeiro princípio não foi estabelecido, historicamente, senão depois do segundo. Ele assenta sobre a equivalência das diferentes formas de energia na natureza, e nomeadamente o calor e o trabalho. Esta equivalência não foi estabelecida senão em 1842, não por um físico, mas por um médico, J. R. von Mayer, perto de vinte anos depois da primeira formulação do segundo princípio da termodinâmica por Sadi Carnot, em 1824.

Na sua formulação corrente, o Segundo Princípio indica o sentido no qual se efectua a transferência de calor ou, o que vem significar o mesmo, a transformação de energia. Este princípio introduz uma dissimetria fundamental, ausente no Primeiro Princípio, entre o trabalho, forma nobre da energia, e o calor, que é uma forma degradada. Então, é possível transformar a globalidade de trabalho em calor *no decorrer de um ciclo* (atritos, por exemplo), o inverso não é verdadeiro. Ou ainda no decorrer de uma transformação cíclica (i.e. onde o estado final coincide com o estado inicial), com a condição de admitir que uma parte de calor se desloca para um corpo mais frio (fonte fria no ciclo de Carnot) e seja, por conseguinte, perdida.

O Segundo Princípio expressa então uma tendência geral da *degradação* da energia, que se transforma naturalmente em calor. Formaliza-se geralmente este princípio introduzindo uma função de estado, denominada entropia do sistema representada habitualmente por S . Esta função foi introduzida em 1854 pelo físico alemão Rudolf Clausius que estabeleceu que em toda a transformação elementar, a variação dS era *superior ou igual* a Q/T , onde Q designa a quantidade elementar de calor recebido pelo sistema e T a temperatura, suposta uniforme, da fonte de calor (a igualdade não era verificada senão para uma transformação reversível). No caso de sistemas isolados, isto é, em que não existe troca de energia com o meio exterior, $Q = 0$, o que implica $dS \geq 0$. A entropia é então uma função monótona crescente, e atinge um máximo em equilíbrio($dS = 0$). Em equilíbrio, por definição o sistema não evolui mais. Encontra-se geralmente num estado de degradação completo caracterizado por um valor uniforme do conjunto dos seus parâmetros termodinâmicos. Por esta razão, a entropia é tradicionalmente interpretada como uma medida de desordem. Boltzmann deu um fundamento teórico a esta interpretação ligando a entropia ao número de realizações moleculares possíveis de um estado dado e à sua probabilidade. Ele demonstrou que a entropia de um sistema qualquer que seja, pode ser equacionada como $S = k \log W$, onde k é uma constante universal e W o número de combinações moleculares possíveis para realizar o estado do sistema, o que se designa por complexificação do sistema. O crescimento da entropia expressa uma evolução através do estado mais provável, que é também o mais desorganizado (BOUTOT, 1993).

2.3.3. Organização neguentrópica

Em termos de medida, entropia e neguentropia são duas leituras da mesma grandeza, a primeira de sinal positivo e a segunda de sinal negativo, como a aceleração e a desaceleração, no caso da velocidade. São, deste modo, dois conceitos antagónicos de uma mesma realidade. Enquanto a entropia mede a desordem de um sistema, a neguentropia mede a ordem. Assim, qualquer sistema macroscópico pode ser lido segundo a sua entropia S ou a sua neguentropia $-S$. Nesta perspectiva, toda a organização pode ser considerada como um ilhéu de neguentropia. As organizações não activas e os sistemas ditos fechados só podem evoluir no sentido da entropia crescente. Neste caso, só tem sentido o sinal +, que é o da sua evolução. Esta situação altera-se por completo, quando se considera uma organização *produtora-desí⁶*. Apesar do trabalho ininterrupto efectuado por tal organização, a entropia não vai do - ao +, mas permanece estacionária enquanto dura o sistema. Este balanço estacionário escamoteia a verdadeira dinâmica do sistema que se concretiza na produção de organização, a qual resulta de reorganização constante. Considere-se, por exemplo, o caso da *organização Sol*. Ao admitir que esta organização se encontra em estado de entropia estacionária, não só produz continuamente o seu próprio ser (ordem), como também produz átomos pesados e radiação (desordem), que alimentam o planeta Terra e a vida que nele se desenvolve.

Segundo Morin (1977), são todas as organizações *produtoras-desí*, incluindo turbilhões e remoinhos, que colocam o problema da inversão, certamente local e temporária, mas contudo real, do curso da entropia. De todas as organizações, é sobretudo a vida que aufere, de

modo mais espantoso, do sentido interdito que vai do + ao -, nas suas ontogéneses e filogéneses, assim como cada instante de existência dos organismos que, vivendo à temperatura da sua destruição, restauram, fabricam e substituem aquilo que incessantemente se degrada.

Este aspecto paradoxal, da desordem e da ordem em simultâneo, encontrou sérias dificuldades de aceitação, porque o organismo não era entendido como sistema físico. Aparentemente, o ser vivo atentava contra a lei termodinâmica ao fornecer a prova “vitalista” de que as “leis” da “matéria viva” ignoravam as leis imperativamente degradantes da “matéria física”. O problema inerente à organização viva, passou a ser encarado segundo a perspectiva dos dois sentidos da entropia, após os desenvolvimentos efectuados por Schrodinger, em 1945 (PENROSE, 1997). A partir destes, imediatamente se constituiu uma dissociação entre o positivo e o negativo da entropia, que no entanto permanece basicamente *uma* e o conceito de neguentropia toma corpo, unicamente para tudo o que depende de uma organização activa. No âmbito das organizações não activas e dos sistemas fechados, a neguentropia continua a não se diferenciar da entropia senão por uma leitura em negativo da mesma grandeza.

Pelo contrário, nas organizações activas e *produtoras-de-si*, a neguentropia assume a forma de processo original, antagónico ao processo de entropia crescente. Dito de outro modo, o processo neguentrópico remete para uma configuração organizacional completamente diversa daquela onde actua isoladamente o processo entrópico, embora esta configuração produza necessariamente entropia.

⁶ Denominação utilizada por Edgar Morin, em 1977, para as organizações que detém capacidade de se auto-organizar, mesmo que esta auto-organização seja apenas temporária.

Assim, a neguentropia pode ser definida em termos activos, produtivos e organizacionais. Em termos estáticos, toda a organização é um ilhéu de neguentropia, mas este ilhéu, se não for alimentado por organização generativa ou regenerado por organização activa, pode apenas corroer-se a cada transformação. Em termos dinâmicos, uma organização é neguentrópica se for dotada de capacidades organizadoras activas, as quais em última hipótese, necessitam de um ciclo recorrente *produtor-de-si*. Entendido deste modo, pode definir-se o conceito de neguentropia, como o rosto termodinâmico de toda a regeneração, reorganização, produção e reprodução de organização. Origina-se e toma forma no ciclo recorrente, que recomeça e reconstrói incessantemente a integridade do ser-máquina. A partir daí, há uma relação indissociável:

$$\text{NEG (entropia)} = \text{GEN (eratividade)}$$

A dimensão activa da neguentropia organizacional só é perceptível nos termos estáticos da medida de Boltzmann. Com efeito, admitindo a possibilidade de medir a entropia de um sistema vivo num determinado período de tempo T, apenas seriam observadas variações oscilantes em torno dum estado de entropia estacionária; ora o balanço de entropia estacionária longe de revelar um estado zero, é, de facto, a soma nula resultante de dois processos antagónicos: um desorganizador (entropia crescente) e um outro, reorganizador (neguentropia). Deste modo, tem de se distinguir a neguentropia-processo, que se refere a uma organização dotada de *generatividade*, da neguentropia-medida, que quantifica estados.

A neguentropia-processo é um conceito que em nada contraria a neguentropia-medida, a qual proveio de um conceito evolutivo a que Clausius chamou entropia, para significar regressão. A diferença fundamental é que a neguentropia-processo não é universal como a entropia, não pode instalar-se no quadro geral do sistema, só tem existência no quadro específico e original das organizações *produtoras-desi* (MORIN, 1997).

Existem na natureza muitos estados neguentrópicos fora da organização, como o desequilíbrio entre uma fonte quente e uma fonte fria, que só se convertem em processos neguentrópicos se existirem organizações que utilizem estes estados para as suas produções. É o caso da solução do conhecido paradoxo de Maxwell que pode ser completada com a introdução da ideia de organização neguentrópica.

James Clerk Maxwell, estabeleceu as equações do electromagnetismo, quando analisava uma aplicação muito comum, talvez a primeira, da Segunda Lei da Termodinâmica: a que trata um corpo quente e um corpo frio nas proximidades um do outro. Imagine-se uma caixa dividida em duas partes por uma divisória removível. De um dos lados encontra-se uma amostra de gás, quente, e do outro lado uma amostra fria do mesmo gás. A caixa é um sistema fechado com uma certa quantidade de ordem, pois as moléculas estatisticamente mais rápidas, do gás quente, de um dos lados da divisória, são segregadas das moléculas estatisticamente mais lentas, do gás frio, do outro lado.

Admita-se, em primeiro lugar, que a divisória é de metal, conduzindo, portanto, o calor. Sabe-se que a amostra quente de gás terá tendência para arrefecer e a amostra fria para aquecer, até que ambas

atinja a mesma temperatura. É, claramente, isso que exige a Segunda Lei, dado que desaparece a segregação entre os gases quente e frio e aumenta, portanto, a entropia.

Suponha-se agora que a partição não conduz o calor, sendo portanto, mantida a segregação dos gases mais quente e mais frio. A entropia manter-se-á então constante, o que também é compatível com a Segunda Lei. Mas o que aconteceria se houvesse um *demoniozinho* entre-tido a separar as moléculas rápidas das mais lentas? Poderia fazer diminuir a entropia? (GELL-MANN, 1997)

“O demónio de Maxwell encontra-se de guarda a uma porta de comunicação existente na partição, a qual se presume ainda que não conduz o calor. Observa as moléculas que lhe chegam de cada um dos lados e avalia as suas velocidades. As moléculas de gás quente são apenas estatisticamente mais rápidas do que as de gás frio; cada amostra de gás tem moléculas que se deslocam a velocidades muito diferentes. O demónio perverso manipula a porta de comunicação de modo a permitir que por ela passem apenas as moléculas mais lentas (muito mais lentas do que as restantes) do gás quente e as mais rápidas (muito mais rápidas que as restantes) do gás frio. Assim, o gás frio recebe moléculas extremamente lentas, que o arrefecem ainda mais, e o gás quente recebe moléculas extremamente rápidas, que o aquecem ainda mais. Num desafio aparente à Segunda Lei da Termodinâmica, o demónio provocou um fluxo de calor do gás frio para o gás quente. O que se passou?”

Dado que a lei se aplica apenas a um sistema fechado, tem de incluir-se o demónio nos cálculos. O seu aumento de entropia terá de ser, pelo menos, tão grande como o decréscimo de entropia das duas metades da caixa?” (GEL-MANN, 1997).

2.3.4. Informação e neguentropia

O demónio de Maxwell é, talvez, o mais célebre dos paradoxos clássicos, que aparenta uma violação do Segundo Princípio da Termodinâmica e aquele que melhor exemplifica a existência de uma estreita relação física entre as noções de entropia e de informação.

Leo Szilard começou a responder à questão colocada no ponto anterior, em 1929, quando introduziu a relação entre entropia e informação. Mais tarde, após a Segunda Guerra Mundial, Shannon estabeleceu a noção matemática de informação, a qual foi clarificada pelo físico teórico francês Léon Brillouin nomeadamente no estudo do demónio de Maxwell, o qual denominou como o “Princípio de Carnot Generalizado” (GEL-MANN, 1997).

Segundo esta análise, o Segundo Princípio da Termodinâmica, aparece como uma lei de diminuição da informação. Afirmar que um sistema isolado tende a evoluir para um estado de maior desordem, significa que a informação inerente a um tal sistema não pode senão decrescer. O estado de máxima desordem corresponde à informação mínima. Aparentemente, existe uma certa contradição quando se fala da informação proveniente de um sistema isolado: o sistema deixa de ser isolado a partir do momento em que a informação chega. É precisamente o que expressa esta lei de decrescimento, o sistema não está mais isolado, permuta a energia com o meio ambiente na quantidade necessária para que a informação chegue. Esta permuta acontece com a degradação do nível de energia, em termos de termodinâmica, ou com perda de informação, em termos de teoria da informação.

Evidencia-se assim, a analogia que se estabelece entre o Segundo Princípio da Termodinâmica e o Teorema de Transmissão com Ruído de Shannon, segundo o qual, numa via, quanto maior for a quantidade de informação transmitida, maiores serão os ruídos nessa via e menor será a quantidade de informação recebida (ATLAN, 1992).

Henri Atlan (1972) cita a formulação elaborada em 1952 por J. Rothstein: “*A informação sobre um sistema isolado não pode nunca aumentar, só com interação com o sistema se pode obter uma nova informação. Os processos reversíveis conservam informação enquanto que os processos irreversíveis a perdem. Teoricamente, a informação máxima que corresponderia a um estado puro tem uma entropia nula; a informação mínima, corresponde a um estado de equilíbrio, tem entropia máxima*”(ATLAN, 1992).

Brillouin, demonstra matematicamente a situação anterior através das seguintes expressões:

$$I_1 = S_0 - S_1 \quad (2)$$

em que I_1 representa a informação no momento 1 e S_0 e S_1 representam a entropia no momento 0 e no momento 1, respectivamente. Da equação (2) vem então que:

$$S_1 = S_0 - I_1 \quad (3)$$

A equação (3) expressa a possibilidade de diminuir a entropia de um sistema por intermédio de um agente exterior ao sistema, o

instrumento de medida utilizado. Se agora se isolar o sistema, o Princípio de Carnot indica que toda a evolução posterior:

$$\Delta S_1 \geq 0 \quad \text{ou} \quad \Delta(S_0 - S_1) \geq 0 \quad (4)$$

definindo a neguentropia por N, então $N = -S$, as expressões anteriores podem ser substituídas por:

$$\Delta N_1 \leq 0 \quad \text{e} \quad \Delta(S_0 - I_1) \leq 0 \quad (5)$$

a esta relação Brillouin denomina o Princípio de Carnot Generalizado: “num sistema isolado, a soma da entropia negativa com a informação não pode senão decrescer”. As permutas entre estes dois termos podem estabelecer-se, de tal modo que uma variação de um, numa direcção que contraria o Segundo Princípio da Termodinâmica, pode ser compensada por outro na direcção oposta, de modo a que este princípio seja sempre satisfeito. É este princípio que é utilizado na resolução de paradoxos do tipo “demónio de Maxwell”, em que uma situação limite é criada de tal modo que o Segundo Princípio é aparentemente violado; a introdução da variável informação no Segundo Princípio permite facilmente levantar aquela dificuldade.

O caso analisado diz respeito àquilo a que Brillouin denominou como informação restrita. Mas este autor vai mais longe, estendendo este princípio a toda a informação, quer seja *restrita*, determinada por estados físicos, quer se trate de informação *livre*, determinada por símbolos abstractos, que não existem conforme ele próprio diz *senão no espírito daqueles que os utilizam*. Ele expressa então o seu princípio de neguentropia demonstrando, recorrendo a diferentes exemplos, que

a informação quer seja livre ou não, só pode ser obtida por cedência da neguentropia a um sistema físico. Com efeito, a distinção entre estes dois tipos de informação é muitas vezes difícil, mas ainda quando intervém um observador humano. Talvez esta distinção seja no fundo artificial, caso se admita que o observador esteja sempre presente, como intermediário da operação de medida na definição dos conceitos físicos. Deste modo, analisando o acréscimo de entropia provocado pela expansão de gás com um volume V' a um outro com volume $V > V'$, ou à mistura por difusão de dois gases inicialmente contidos em dois volumes separados, Brillouin demonstra como este aumento equivale a uma perda de informação, ou seja, como *se o gás se esquecesse progressivamente da informação* (ATLAN, 1992).

Com efeito, a informação *restrita* é um caso particular da informação *livre*, isto é, não há diferença de natureza entre as duas. A diferença reside então no grau de generalização que é considerado elementar. O carácter abstracto da informação *livre* provém do seu grau mais elevado de generalização e de integração. Pelo contrário, a informação *restrita* dirá respeito a um grau de abstracção menos elevado, ou seja, ligado a conceitos mais elementares que podem ser perceptíveis pelo estado do conhecimento humano sobre a matéria. Dito de outro modo, os símbolos considerados abstractos não seriam senão símbolos mais gerais do que aqueles que constituem os micro-estados físicos de um sistema. Trata-se, por exemplo, do caso das quantidades de informação dos organismos vivos, o qual será abordado nos pontos seguintes.

2.4. Conceito de Organização Biológica

A noção de organização é uma das noções comumente utilizadas em biologia, sem no entanto existir uma definição precisa e unívoca admitida pela generalidade da comunidade científica. Contudo, a noção de organização detém um papel fundamental na transformação da história da Biologia, isto é, da passagem de ciência de classificação de caracteres morfológicos, a ciência dos mecanismos de funcionamento. A partir do momento em que a relação órgão-função foi estabelecida, a noção de organização, com a sua dupla implicação estrutural e funcional, tornou-se uma das noções fundamentais para a descrição dos organismos vivos na sua diversidade.

É assim no que respeita a qualquer indivíduo: reconhecem-se numerosos níveis ditos de organização, uns englobando os outros, desde o nível celular, até ao indivíduo por inteiro, passando pelos órgãos, pelos aparelhos e pelos sistemas. Quanto ao conjunto dos seres vivos, a visão da sua unidade e simultaneamente das suas diferenças, assenta em parte, sobre a noção, por vezes explícita, mas sempre implícita, de organização: os constituintes químicos da matéria viva, foram reconhecidos como idênticos aos da matéria inanimada ao nível atómico; a única unidade reconhecida no conjunto dos seres vivos é a da ordem de organização desses átomos e não, evidentemente, da diferença entre matéria viva e matéria inanimada. Mais, as *diferenças* entre diferentes tipos de organismos que aparecem na imensa diversidade das espécies, são frequentemente descritas em termos de níveis de organização: *um mamífero é considerado em geral mais organizado que uma bactéria, mesmo se não se sabe de maneira precisa o que é uma organização e, ainda menos, como medir um grau de organização* (ATLAN, 1992).

Dito de outro modo, trata-se de uma noção que aparece como essencial no discurso biológico, sem que, no entanto, seja definida clara e quantitativamente. Não é então, de estranhar, que alguns autores tenham procurado activamente uma definição precisa deste conceito, que tenha em conta as características que intuitivamente se atribuem ao que se designa habitualmente como sistemas organizados, entre os quais os sistemas vivos representam uma classe privilegiada. O privilégio advém essencialmente do facto de se tratar de sistemas naturais, isto é, sistemas cuja organização, qualquer que seja e qualquer que seja a sua definição, tem origem na natureza e não nos homens. *Além disso, detêm um grau de complexidade superior, o que conduz frequentemente à ideia de um verdadeiro mistério de organização dos seres vivos, que resulta da associação – aparentemente paradoxal – de uma complexidade dificilmente imaginável com uma origem natural dessa mesma complexidade* (ATLAN,1992).

Como se explica que um organismo vivo tão extraordinariamente complexo, como um animal dotado de órgãos eficazes tais como o nariz e os ouvidos, e funcionando harmoniosamente, seja resultado de o acaso de uma série de eventos encadeados? Como é que um órgão tão perfeito como o olho, com centenas de milhões de células, que transmitem mensagens luminosas da retina ao cérebro, pode ter surgido casualmente? Como é que na sequência de acontecimentos totalmente desordenados, os organismos geram mecanismos adaptativos de modo a superar alterações ambientais? *Sobretudo, como mutações genéticas inteiramente casuísticas podem ser responsáveis por estruturas totalmente novas e extremamente bem concebidas, como o cérebro humano, rede de cerca de 100 biliões de neurónios capazes de gerar pensamento, experimentar sentimentos, apreciar a beleza?* (THUAN, 1998).

Como atribuir uma origem natural a sistemas tão complexos, que só poderão ter equivalência em sistemas artificiais, isto é resultantes de uma actividade humana voluntária e orientada, conduzidas por um conhecimento experimental e intelectual, utilizando, muitas vezes, como recurso, a habilidade manual e as capacidades de dedução e indução representativas de um pensamento lógico (ATLAN, 1992)?

2.4.1. A lógica do vivo

Até meados dos anos 50, a vida era concebida como uma qualidade, sem conexão com o universo físico-químico; mantinha-se também fechada para o fenómeno social, que, embora muito largamente presente no reino animal, e até no vegetal, apenas era interpretado como exceções surpreendentes e não como sinal de uma sociabilidade profundamente inscrita no universo vivo. Deste modo, a Biologia restringia a concepção de vida ao próprio organismo, mantendo-se fechada a todas as qualidades ou faculdades que fossem estritamente além da fisiologia, isto é, a tudo aquilo que nos seres vivos, diz respeito a comunicação, conhecimento e inteligência.

Com a formulação das teorias da Informação, de Shannon (1949), e da Cibernética, de Wiener (1948), abre-se uma nova perspectiva teórica aplicável aos organismos vivos. Em 1953, o esforço marginal da Biologia molecular consegue abrir a brecha decisiva que expõe os fenómenos biológicos a interpretações à luz da Física e da Química, pela descoberta do código genético e dos mecanismos auto e heterocatalíticos do gene. Esta descoberta veio demonstrar que não existe

matéria viva, mas sim sistemas vivos, quer dizer, organizações particulares da matéria.

No decurso dos anos 50 e 60, a nova biologia procurou reconduzir a vida celular aos seus substratos nucleoproteicos e descobriu que o jogo das combinações e das interacções dos milhões de moléculas que constituem o mais pequeno sistema celular, obedece a regras estatisticamente improváveis em relação aos processos ditos *normais*, os quais deveriam ter levado à decomposição do sistema e à dispersão dos seus constituintes. Esta nova biologia socorreu-se dos novos conceitos trazidos pela Teoria da Informação e pela Cibernética. A partir destas teorias, e das noções de informação, de código, de mensagem, de programa, de comunicação, de inibição, de repressão e de controlo, concebeu a célula como uma máquina autocomandada e controlada a nível informativo.

A aplicação da noção de máquina à célula, isto é, à unidade fundamental da vida, representou um verdadeiro salto epistemológico em relação à Física clássica: *a máquina é um todo organizado, que não se pode reduzir aos seus elementos constituintes, os quais não podem ser correctamente descritos isoladamente, a partir das suas propriedades particulares; a unidade superior, a máquina, não se pode dissociar nas suas unidades elementares, mas, pelo contrário, traz a inteligibilidade das propriedades que elas manifestam* (ATLAN, 1992). O que tornou extraordinária esta nova abordagem da vida foi a concepção de organismos vivos como organizações complexas, das quais depende o seu aparecimento, a sua manutenção, a sua reprodução ou a sua própria extinção.

O primeiro requisito óbvio para a perpetuação da vida, é sem dúvida, a replicação. É preciso transmitir uma quantidade de informação considerável que contenha as instruções para produzir a complexidade que caracteriza a vida e, a menos que essa informação seja copiada com razoável exactidão, o mecanismo decairá sob o peso acumulado dos erros. Por outro lado, não é necessário uma exactidão perfeita. De facto, nem todas as cópias devem ser iguais. Muitos erros constituirão uma desvantagem, mas alguns até podem resultar numa vantagem para os organismos. Estes erros designados por mutações são de utilidade no processo de funcionamento da selecção natural. Na prática, a taxa de erro necessária é excepcionalmente baixa; na verdade tão baixa que, para que uma célula continue a manter-se e a desenvolver-se, terão de ser tomadas precauções especiais para corrigir a maior parte dos erros.

É importante salientar que as mutações devem ser copiadas pelo mecanismo da replicação. Erros que não podem ser copiados são inúteis, porque iriam apenas baralhar o sistema. Esses erros serão eliminados de algum modo. Confrontados com um tal erro químico, o sistema de cópia pode ignorá-lo e introduzir ao acaso uma das letras normalmente usadas. Para que a selecção natural funcione não é muito importante qual o erro que é cometido, desde que dele resulte uma alteração ou possa ser copiado fielmente nas gerações seguintes.

O exposto nos parágrafos anteriores resume de um modo sucinto as principais exigências do sistema de informação necessário para a vida, do qual derivam alguns requisitos mais imediatos. Visto que são necessárias cópias de algumas das moléculas, deve existir um

conhecimento adequado da matéria prima. Excepto em casos muito especiais, estes produtos químicos necessitarão de ser transformados noutras produtos químicos afins. Nas células, cada uma dessas etapas é geralmente catalisada por uma proteína especial, um enzima específico dessa reacção. *Na origem da vida, o material bruto deve ter existido essencialmente numa forma pronta para utilização imediata, visto que nessa altura devia haver poucos, se é que algums, catalisadores específicos para tornar o caldo primitivo mais apaladado (CRICK, 1988).*

Para conseguir a síntese orgânica é necessário um fornecimento de energia, a qual deve ser disponibilizada para *utilização*. O sistema não está portanto em equilíbrio no sentido restrito do termo, embora possa encontrar-se em equilíbrio dinâmico. Esta situação pode ser comparada com o que acontece num lago muito parado, cujo equilíbrio é estático, e um rio que corre mantendo um curso regular. Um sistema vivo assemelha-se ao rio. Os materiais e a energia livre fluem para dentro dele, enquanto os resíduos e o calor fluem para fora dele. Em termos técnicos, este processo denomina-se por sistema aberto. Só desta maneira pode continuar a manter-se a síntese necessária para uma replicação química, que se repete.

São estes portanto os requisitos básicos para a vida. O sistema deve ser capaz ao mesmo tempo de replicar de forma directa as suas próprias instruções e indirectamente, a maquinaria que é necessária para as executar. A replicação do material genético deve ser razoavelmente exacta, mas as mutações – erros que podem ser fielmente copiados – devem ocorrer a uma taxa bastante baixa. Um gene e o seu “produto” devem ser conservados nas proximidades um do outro. O

sistema deve ser aberto e deve ter um fornecimento de material em bruto e, de alguma maneira, um fornecimento de energia livre.

Posto assim nestes termos tão gerais, tais requisitos não parecem muito exigentes, embora sejam bastante difíceis de satisfazer quando se parte do zero. O que não será tão evidente diz respeito à capacidade espantosa que o sistema vivo tem para se melhorar a si próprio. Um processo de cópia com alguns raros erros – a que pode isso conduzir? A primeira coisa a perceber é a natureza permanente deste processo. Para conseguir algo de importante, o sistema tem efectivamente de continuar sempre. Mas isso implica que se duplique o “número” de cópias em cada “geração”, o que conduz a números de difícil manipulação.

Se um sistema vivo se duplicar sempre desta maneira, a exigir alimento na forma de matéria prima e energia, muito rapidamente ele irá esgotar os recursos do seu meio ambiente. Assim, num espaço de tempo relativamente curto, os diferentes indivíduos terão de competir para se alimentarem. Se o fornecimento de alimento e energia for apenas constante, o sistema não poderá continuar a expandir-se indefinidamente; em vez disso, irá atingir uma fase estacionária. Isso implica que nessa fase, cada organismo deixará em média, apenas um descendente por geração. Visto que alguns organismos duplicam, outros haverá que não se reproduzem sequer. Isso dar-se-á ao acaso. Um organismo pode descobrir um local onde haja alimento, enquanto outro poderá ter menos sorte e perecer de fome nas mesmas condições. Contudo, se um determinado organismo tiver adquirido uma mutação nos seus genes de forma a que, por uma razão ou por outra, possa competir com mais sucesso e, em média, deixar mais descendentes, ele

tenderá a aumentar a sua representação na população, e assim, necessariamente, os outros organismos menos favorecidos, produzirão menos descendentes. Se este processo continuar indefinidamente, as espécies menos favorecidas acabarão por morrer completamente, enquanto aquela que tiver o gene mais eficiente, se imporá. O importante a fixar neste processo simples é que, *um processo aleatório raro acaba por tornar-se habitual* (CRICK, 1988).

Este processo pode, no entanto, acontecer repetidas vezes porque o acaso faz surgir novas mutações favoráveis. Os aperfeiçoamentos assim somados, com o tempo, irão dar origem, no processo de evolução, a um indivíduo particularmente bem adaptado ao seu meio ambiente. Para se atingir tal perfeição, não são precisas mais do que mutações produzidas pelo acaso. Parece não haver mecanismo algum, pelo menos um mecanismo comum, que *dirija* as modificações no gene de forma a que se produzam apenas alterações favoráveis. Além disso, pode argumentar-se que um mecanismo que fosse assim controlado a longo prazo, tornar-se-ia demasiado rígido. Quando as coisas se tornam difíceis, é necessário introduzir uma verdadeira novidade – novidade cujas características importantes não podem ser planificadas de antemão – e para isso, é no acaso que se tem de confiar. *O acaso é a única verdadeira fonte de verdadeira novidade* (CRICK, 1988).

Tal é o poder da selecção natural que pode operar a todos os níveis. Pode até introduzir melhoria nos mecanismos da própria selecção – a reprodução sexuada é um bom exemplo. Se o meio ambiente, se mantiver estável, a selecção natural tenderá a ser mais conservadora e manterá um conjunto de organismos *intercruzáveis* dentro de uma gama estreita, visto que, em sentido lato, a perfeição foi atingida. Em

qualquer aperfeiçoamento posterior irá exigir um acontecimento extremamente raro, porque todos os acontecimentos de carácter moderadamente raro já terão sido ensaiados.

Contudo, se o meio se alterar, ou se por uma razão ou outra, alguns indivíduos se tiverem isolado efectivamente dos restantes, então o equilíbrio pode ser perturbado e, nessas circunstâncias, a selecção poderá vir a tornar-se mais criativa.

No âmbito deste trabalho, não se justifica a análise detalhada destas complexidades, embora sejam de enorme importância para a teoria detalhada da evolução da vida. O que é realmente importante neste ponto, é perceber as características gerais do processo de evolução e ter uma percepção clara de como é que, partindo de um conjunto simples de pressupostos, se pode chegar a resultados tão notáveis e inesperados.

A selecção natural aparenta ser o único mecanismo capaz de considerar um sistema vivo, visto que este processo implica o armazenamento e a replicação de uma grande quantidade de informação. O único meio eficiente de conseguir o tratamento da informação é através do recurso da análise combinatória, isto é, expressar-se a informação usando apenas um pequeno número de unidades padrão, mas combinando-as de maneiras diferentes. A vida tal como se conhece, emprega cadeias lineares de unidades padrão, mas é possível conceber esquemas que utilizem folhas sequenciais de unidades ou mesmo estruturas em três dimensões, embora estas sejam menos fáceis de replicar. Estas estruturas devem não só conter informação – o que quer dizer que não podem ser completamente regulares –, mas o seu conteú-

do informativo deve ser fácil de copiar com rigor e, o que é mais importante, a informação deve ser estável durante um período de tempo muito mais longo do que aquele que é necessário para o copiar, porque de outra maneira, os erros seriam demasiado frequentes e a selecção natural não poderia operar. Assim, para que qualquer forma de vida possa evoluir, será essencial uma construção de combinações variadas razoavelmente estáveis, a partir de unidades padrão. Evitar o uso de um pequeno número de unidades padrão, pode dificultar o mecanismo de replicação.

Outro requisito geral é que o processo não deve ser demasiado lento. Embora não se possa calcular a velocidade da evolução a partir dos primeiros princípios, mas um sistema que fosse dez ou cem vezes mais lento que o nosso, dificilmente “teria tido tempo” para produzir organismos superiores de uma complexidade semelhante à nossa, mesmo se o sistema tivesse começado logo a seguir ao *Big Bang*. Assim, qualquer sistema baseado no estado sólido, em que as reacções químicas estão sem dúvida a prosseguir, mas de uma maneira extremamente lenta, não seria, quase de certeza, suficientemente rápido para produzir organismos com uma complexidade idêntica à de um ser animal ou vegetal. A existência de animais e plantas na Terra mostra que, desde que começa a evolução de um sistema, a selecção natural ultrapassa engenhosamente um elevado conjunto de obstáculos.

2.5. Síntese do Capítulo

2. A VARIÁVEL INFORMAÇÃO NA CRIAÇÃO, MANUTENÇÃO E PERPETUAÇÃO DAS ORGANIZAÇÕES

- 2.1. Organização e Teoria dos Sistemas
- 2.2. Ordem, Desordem e Complexidade
- 2.3. Informação, Entropia e Neguentropia
 - 2.3.1. Aspectos históricos da Teoria da Informação
 - 2.3.2. Segundo Princípio da Termodinâmica, entropia e complexidade
 - 2.3.3. Organização neguentrópica
 - 2.3.4. Informação e neguentropia
- 2.4. Conceito de Organização Biológica
 - 2.4.1. A lógica do vivo

Todas as entidades, do átomo à molécula, do ser vivo à sociedade possuem e assentam numa organização, isto é, numa teia de inter-relações entre os seus componentes particulares que conferem ordem e unidade ao sistema. Dito de outro modo, a organização estabelece a estrutura do sistema. Organização, estrutura e sistema são pois conceitos indissociáveis. No seio das organizações (ou sistemas) emergem, por sua vez, noções de globalidade, de crescimento, de diferenciação, de hierarquia, de dominância, de controlo, de retroacção, de competição, etc..

As organizações (ou sistemas) caracterizam-se ainda por apresentarem propriedades novas, não redutíveis à soma das propriedades particulares, que lhes conferem uma unidade. Ao conceito de organização associa-se o conceito de complexidade, o qual decorre da multiplicidade e da diversidade dos constituintes do sistema. A complexidade reforça a unidade.

A Teoria Geral dos Sistemas, de von Bertalanfy, integra estes conceitos e propicia uma visão holística dos sistemas bem como dos fenómenos a eles associados.

Subjacente aos conceitos de organização e de sistema encontra-se implicitamente a ideia de ordem. A ordem singular de um sistema pode ser concebida como a estrutura que o organiza.

No processo de complexificação dos sistemas, contudo, a ordem comporta ou gera a sua antítese, a desordem. Agitações, instabilidades, desvios, desintegrações erros e ruídos são algumas das situações correntes que tendem a “desordenar” o sistema, a negar a imutabilidade da ordem estabelecida.

A desordem é indissociável da evolução do Universo; omnipresente, e apesar de oposta, mantém com a ordem uma cooperação para gerar organização na inovação.

O “diálogo” entre ordem e desordem é objecto da Termodinâmica, mais exactamente do Segundo Princípio, que associa a desordem à degradação da energia em calor e introduz uma função de estado, designada por entropia, para medir a desordem. Nesta perspectiva física, o crescimento da entropia expressa a evolução de um sistema de um estado organizado para um estado menos organizado ou totalmente desorganizado.

Todas as organizações, em geral, tendem naturalmente para um estado de equilíbrio, caracterizado pela desordem máxima e, portanto, também pela entropia máxima. Em “violação” desta regra, situam-se as organizações “produtoras-de-si”, isto é, aquelas que são capazes de gerarem no seu seio, novas relações ou estruturas que substituam as que se degradam. Nestas, ao estado de equilíbrio não corresponde a entropia máxima mas, pelo contrário, uma “relação de forças” entre ordem e desordem, cuja estabilidade se designa por equilíbrio dinâmico.

As organizações “produtoras-de-si”, naturais, são os seres vivos. Nestes, ao invés do que acontece nos sistemas presentes no meio exterior envolvente, a produção de ordem contraria constantemente a desordem gerada.

O conceito de neguentropia, antagónico do de entropia, foi criado não só para medir a produção de ordem (neguentropia-medida) mas também para significar os processos inerentes ao ser vivo e que repõem instante a instante, as estruturas danificadas ou destruídas (neguentropia-processo).

Num sistema aberto (ou dissipativo) como são os seres vivos, a manutenção da ordem (ou do diálogo ordem-desordem) depende não só do fluxo de energia mas também da informação do sistema. Ao estado de máxima desordem corresponde não só a energia mínima mas também informação mínima.

Nas organizações produtoras-de-si naturais, os seres vivos, reconhecem-se diversos níveis de organização, entre os quais se estabelecem relações de dependência, de hierarquia, de controlo e de retro-controlo. A complexidade destes sistemas depende, por conseguinte, não só da multiplicidade e diversidade dos constituintes, mas também dos níveis hierárquicos de organização.

Observados à luz da Teoria Geral dos Sistemas e da Teoria da Informação, os seres vivos, ao mesmo tempo que revelam a sua lógica intrínseca, perdem o “privilegio” de serem considerados exceções, inexplicáveis pelas leis da Física e da Química. Interpretados à luz da Física e da Química, os seres vivos, revelam não só os “segredos” dos processos neguentrópicos residentes a nível celular, como evidenciam a importância fundamental da informação na manutenção da ordem e na replicação, como ainda o papel determinante da desordem nos processos inerentes à adaptação, à evolução e à formação de novas espécies.

3. A INFORMAÇÃO NAS ORGANIZAÇÕES HUMANAS

Num dia de Primavera, num café, situado na rua da Universidade, um homem saboreava uma cerveja enquanto lia o jornal diário. Na mesa ao lado, uma rapariga bebia um café olhando distraidamente os estudantes de capas negras que desciam e subiam a calçada. Embora sentados em mesas lado a lado, o homem e a rapariga, não se tinham visto. De repente, o homem volta a cabeça e o seu olhar cruza-se com o da jovem rapariga. Desencadeiam-se então uma série de acontecimentos. A luz dourada do Sol reflectida pelo corpo esbelto feminino insinua-se nos olhos do homem. Viajando à velocidade de 300 000 Km por segundo, 10 000 biliões de partículas de luz (denominadas fotões) caem segundo a segundo em cada uma das suas pupilas, atravessando, primeiro um corpo oval denominado cristalino, depois, uma substância transparente e gelatinosa, antes de atingirem a retina.

Na retina, 100 milhões de células em forma de cone entram em acção. Algumas recebem uma grande quantidade de luz, as que provêm das zonas brilhantes do corpo da mulher, como os lábios ligeiramente humedecidos sublinhando um vermelho brilhante. Outras células recebem menos luz, as que provêm de zonas mais sombreadas como as suas faces ligeiramente coradas. As células da retina são compostas por um número incalculável de moléculas. Cada molécula é por seu turno composta de 20 átomos de carbono, de 28

átomos de hidrogénio e um oxigénio. Todas estas moléculas registam a luz através, de um estranho bailado oscilante. No repouso, quando não está activada pela luz, as molécula presentes na retina são totalmente encarquilhadas e envoltas por uma proteína. Mas, quando uma partícula de luz a atinge (a luz reflectida pela rapariga atinge 30 milhões de biliões de moléculas no olhar do homem em cada segundo), a molécula da retina separa-se da proteína e abre-se. Um certo tempo passa, e ela encarquila-se de novo esperando a chegada da partícula de luz seguinte.

Todos estes acontecimentos ocorreram em menos de um milésimo de segundo, após o olhar do homem ter cruzado o da mulher. Portanto, o homem não estava consciente da presença da rapariga, uma vez que a informação não provém do seu cérebro. Certas moléculas da superfície dos neurónios mudam de forma, bloqueando o fluxo de iões de sódio no líquido que as envolve e provocando uma corrente eléctrica que se propaga de neurónio em neurónio, desde o olho até ao cérebro. No córtex cerebral, cada célula nervosa faz a síntese da informação transmitida por um milhar de neurónios antes de retransmitir por seu turno a informação analisada a um milhar de outros neurónios. Centenas de milhares de neurónios do cérebro do homem ligam-se em conjunto através de circuitos de uma complexidade inaudita, e põem-se a trabalhar, de modo a processar a informação.

Os fluxos de potássio e de sódio que se interrompem e restabelecem através das membranas dos neurónios, determinam correntes eléctricas que não param de percorrer os circuitos nervosos e propagam sinais que por seu turno vão excitar outros neurónios. Ao fim de alguns milésimos de segundo, a imagem é reconstruída no cérebro do homem; enfim ele vê a jovem. Ele repará-nos seus longos cabelos castanhos, nos grandes olhos negros e no seu saia

casaco creme que molda o corpo e a cabeça ligeiramente descaída que lhe dá um ar sonhador.

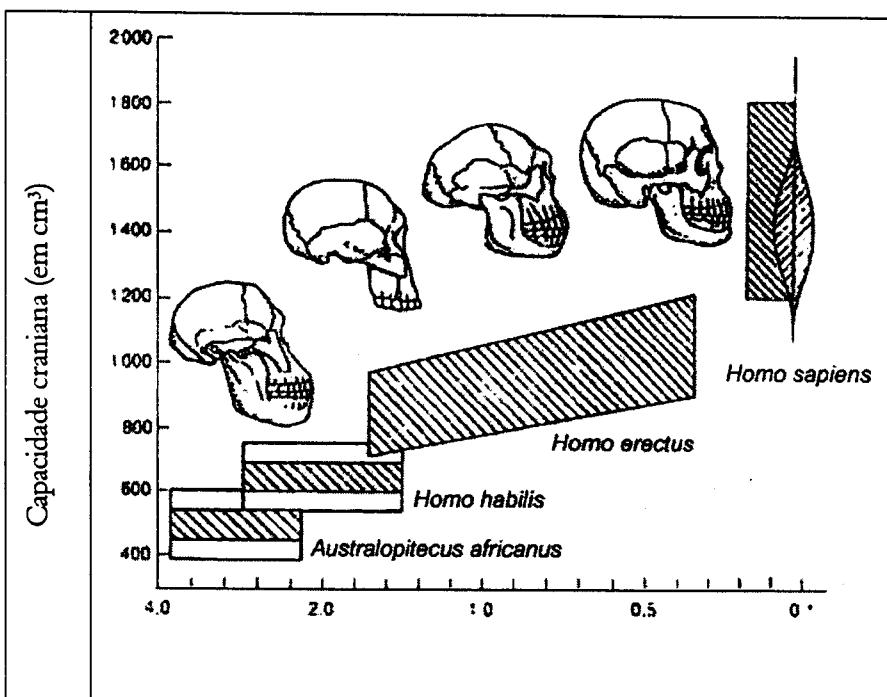
A jovem volta a cabeça, encontra o olhar do homem, esboça um sorriso e diz “bom dia”. Instantaneamente, inúmeras moléculas de ar se põem a vibrar, transmitindo o som das cordas vocais da jovem para os ouvidos do homem. Dois metros os separam e o som chega cerca de um centésimo de segundo mais tarde. O tímpano (uma membrana de 1 mm de espessura) de cada um dos ouvidos do homem põe-se também a vibrar. As vibrações são transmitidas ao líquido encerrado na espiral auditiva. Aqui se opera a descodificação do som. Uma membrana começa a oscilar de acordo com as vibrações do líquido; nela se encontram numerosas fibras de desigual espessura, tais como as cordas de uma harpa. Esta “harpa” é modulada pela voz harmoniosa da jovem e vai por sua vez restituir o som da palavra “bom” e o som da palavra “dia”. Finalmente, os sons são transmitidos ao nervo auditivo que passa a informação ao córtex cerebral. O homem entende o “bom dia” da sua vizinha. Paralelamente, sem que a ciência o tenha de todo desvendado, desenvolve-se um processo transversal no espírito do homem como uma mola: “como ela é bela” (adaptado de THUAN, 1998).

“Com os seus cem mil milhões de neurónios interligados, o cérebro humano representa o mais alto nível de “complexidade simbiótica” perceptível no Universo; ele resulta de um movimento evolutivo constante, que não cessou de fazer aumentar o volume cerebral na linhagem dos Vertebrados. Mas cada cérebro humano é único, ilustrando um nível de biodiversidade sem igual nas outras espécies animais ou vegetais” (PELT, 1998).

3.1. O *Homo Sapiens*

O problema da ascendência do homem toma um sentido verdadeiramente polémico, no século XIX, com a obra de Darwin “Sobre a descendência do homem”. Nesta obra, Darwin considera a humanidade, como uma espécie análoga a todas as que a tinham precedido, tendo surgido um dia num ramo dos Primatas e, tal como qualquer outra espécie, poderia vir a conhecer o declínio e a morte. Graças à investigação e descoberta de fósseis, é quase certo que as etapas mais antigas da evolução da família dos Hominídeos, à qual pertence o ser humano actual, se desenvolveram na África oriental e austral. Entre 10 e 5 milhões de anos, antes de Cristo, ocorre a divergência entre os Hominídeos e os macacos Pongídeos, representados hoje pelos gorilas, os chimpanzés e os orangotangos. Enquanto estes têm um cérebro cujo volume oscila entre 400 e 500 centímetros cúbicos, os Hominídeos africanos do género australopiteco, aparecidos há cerca de 3 milhões de anos, não apresentam grandes diferenças a nível do volume cerebral, mas atribui-se-lhes a invenção da marcha bípede (ECCLES, 1992).

O Australopiteco conheceu uma longa história: mais de dois milhões de anos. A espécie humana actual conta no máximo entre 50 000 e 100 000 anos, o que representa cerca de 0,2% a 0,5% da evolução temporal da história da Terra (MORIN, 1973). Como descreveu Eccles, os Australopitecos transmitiram *o archte aos corredores seguintes*, os *Homo habilis*, e desapareceram, como acontece com a maior parte das espécies mortais (ECCLES, 1992).



Fonte : ECCLES 1994

Fig. 3.1.: Crescimento da capacidade craniana ao longo dos últimos milhões de anos desde os crânios do *A. africanus*, do *Homo habilis*, *Homo erectus* e *Homo sapiens*. O quadrilátero tracejado representa a época de cada espécie e o tamanho do seu cérebro. O rectângulo do *Homo sapiens* vai de HSN para HSS a parte ovalada tracejada representa a capacidade craniana actual do HSS e a distribuição estatística dele próprio.

Porque os Hominídeos da espécie *Homo habilis* tinham já um cérebro com um volume de 646 centímetros cúbicos, em média, foram classificados no género *Homo*. Já a espécie *habilis*, deve o seu nome à sua “habilidade” e é aquela que desenvolve, pela primeira vez, instrumentos a partir da pedra. Tal como os seus antepassados continua, no entanto, a viver de colheitas, e eventualmente de pequenas caçadas. Esta espécie viria a desaparecer ao fim de 900 000 anos, depois de ter inventado, segundo se crê, os primeiros rudimentos da linguagem, ou seja a primeira tentativa de comunicação, no sentido de transmissão de

informação. O *Homo erectus* veio substituir o *Homo habilis* e apresenta já um cérebro de 800 a 1200 centímetros cúbicos. O seu aparecimento ronda os cerca de 1 500 000 anos, povoa a África, mas conquista também a pouco e pouco, a Europa e a Ásia, até ao Extremo Oriente. Os seus utensílios são muito mais aperfeiçoados que os dos seus antecessores, além de já dominar o fogo. Há 100 000 anos, apareceram os primeiros *Homo sapiens*, denominados Neandertalenses, cujo cérebro atingia cerca de 1 200 centímetros cúbicos. É com o aparecimento do homem de Neandertal que surgem os primeiros traços da evolução cultural. Com efeito, os Neandertalenses ao enterrarem os seus mortos, preocuparem-se com a decoração das casas e manifestarem a procura da beleza e do sagrado, evidenciam um indubitável nível cultural (figura n.º 3.1.) (ECCLES, 1992).

Os Neandertalenses extinguiram-se, há cerca de 35 000 anos, tendo sido substituídos pelos *Homo sapiens sapiens*, que constituem a única espécie de homens actualmente vivos sobre a Terra, com uma capacidade cerebral que atinge, em média, 1 330 centímetros cúbico. A partir desta etapa, a evolução social toma o lugar da evolução biológica. O elo de base de aqui em diante submetido à pressão complexificante e organizacional já não é a célula, mas o homem (PELT, 1998).

Quando se atinge uma fase evolutiva, ou seja, assim que a informação pode ser percebida e gerar modos de comportamento imitativos, o centro da evolução desloca-se do campo genético para o campo do comportamento e do julgamento, que é uma faculdade de aprendizagem do tipo cognitivo. Em lugar de ser memorizada nos genes, a informação é acumulada nos cérebros de um grupo de indivídu-

os, o que constitui a cultura que irá ser transmitida aos jovens por via da instrução. No que respeita às vantagens de transmissão de informação, o benefício é francamente evidente, porque a evolução passa a efectuar-se muito mais rapidamente do que pela via genética. Na evolução cognitiva, o que conta são as mudanças dos modelos e dos valores do mundo e baseia-se na faculdade de certos membros da população experimentarem, e por vezes adoptarem, novos comportamentos, abandonando os precedentes. Esta dimensão cognitiva da evolução assenta no hábito de os indivíduos tomarem decisões, o que implica que aquele que decide actua com base nos sistemas de informação e de valores disponíveis (ALLEN, 1996)⁷.

Para Pelt (1996), com o aparecimento do homem actual, encontram-se igualmente os três princípios da evolução da matéria e da vida pré-humana:

1. O homem evolui na extrema diversidade das suas estruturas e das suas organizações, das suas etnias e das suas culturas. A sociodiversidade assemelha-se à biodiversidade. Independentemente do local de nascimento de cada ser humano, a humanidade é uma na sociodiversidade, tal como a vida na biodiversidade e a matéria na cosmodiversidade;
2. A análise mais superficial das sociedades humanas, evidencia que qualquer sociedade – ou mesmo o mundo em geral – é caracterizada por eleições e selecções, competições e confrontos em ambientes de competitividade permanente; e,

⁷ Baseado no texto inserido em La Mort de Newton, 1996.

3. Cada indivíduo pode ser considerado uma célula do corpo social, que funciona como um organismo biológico, razão pela qual é também denominado “organismo social”. À semelhança das células do coração, do cérebro, do rim, do fígado, que só desenvolvem as potencialidades compatíveis com o órgão que as contém, cada indivíduo é levado a não desenvolver senão algumas das suas potencialidades, aquelas que correspondem justamente às exigências da profissão que exerce, ou seja, do órgão social a que pertence (PELT, 1998).

3.2. Origens Pré-Científicas

Durante centenas de milhares de anos, os homens viveram em cavernas em condições pouco diferentes dos animais. As principais energias eram utilizadas na procura e recolha de alimentos. Faziam instrumentos para caçar e pescar, desenvolviam a linguagem para poderem comunicar uns com os outros e, nos últimos tempos do paleolítico, enriqueceram as suas habitações com certas formas de arte criativa, estatuetas e pinturas, que revelam uma notável compreensão da forma da descrição bidimensional de objectos no espaço.

A sociedade hominídea constitui a sua economia organizando as duas *praxis* ecológicas, da caça e da colheita, que se transformam progressivamente em práticas económicas. Tanto uma como a outra, são diferenciadas pela primeira divisão do trabalho que estabelece a clivagem socioeconómica entre homens e mulheres. A prática da caça encontrava-se, no final do Paleolítico altamente organizada: ao *modo colectivo de produção*, da

procura da caça, acrescentavam-se regras colectivas de repartição, isto é, de distribuição e consumo, com aplicação aos principais recursos de toda a sociedade. Daí resulta a surpreendente conjunção de uma “sociedade de classes” primitiva organizando um *anarquismo* primitivo a partir destas regras internas de solidariedade (MORIN, 1973).

Poucos progressos se fizeram no conhecimento de valores numéricos e de relações espaciais até se dar a transição da mera *recolha* de alimentos para a *produção*, da caça para a agricultura. Com esta transformação, que inicia um novo período da Idade da Pedra, o Neolítico, o homem abandona uma atitude passiva perante a Natureza para passar a adoptar uma atitude activa. A pouco e pouco parte da população nómada, que vagueava à procura de alimentos, foi desaparecendo. Os caçadores foram substituídos por agricultores sedentários, enquanto o solo se mantivesse fértil: concomitantemente começaram a construir habitações mais permanentes e, neste processo, surgiram as povoações, como protecção contra os rigores do clima e os predadores inimigos. Quando se construían casas, como por exemplo as dos agricultores indianos ou as casas de madeira dos habitantes da Europa Central, estabeleciam-se regras para a construção ser feita segundo linhas rectas e ângulos rectos. A palavra “recta” relaciona-se com esticar, indicando operações com uma corda (o nome “esticadores de corda” está ligado em muitos países aos homens que se ocupam de medições ou levantamentos topográficos); a palavra “linha” relaciona-se com “linho”, o que mostra uma certa ligação entre a tecelagem⁸ e as origens da geometria (STRUIK, 1997).

⁸ O homem do neolítico revelou um grande sentido para os padrões geométricos. A cizédura e a pintura da cerâmica, o entrelaçamento de juncos, a tecelagem de cestos e têxteis e, mais tarde, o fabrico de metais conduziram à noção de plano e a relações espaciais (STRUIK, 1997).

A actividade social de permuta de produtos desenvolveu a necessidade de saber contar. Os números foram sendo ordenados e agrupados em unidades cada vez maiores, quer pelo recurso aos dedos da mão, quer através do uso de um “pau” entalhado. Para negociar sementes ou líquidos era necessária a comparação de pesos ou de capacidades. Os padrões de medição ou de cálculo de certos volumes eram grosseiros e muitas vezes provinham de partes do corpo humano, o que deu origem a unidades de medida como o dedo, o pé e a mão. Os nomes de “vara”, “braça” e “cúbito” recordam também este costume (STRUIK, 1997).

O camponês tinha de saber identificar as sementes e as épocas de sementeira e colheita. Mesmo nos povos com uma estrutura social mais distante da era actual, encontram-se registos do tempo e, relacionados com eles, conhecimentos do movimento do Sol, da Lua e das estrelas. Este conhecimento atingiu, pela primeira vez, um carácter científico com o desenvolvimento da agricultura e do comércio. O uso do calendário lunar tem origem muito antiga na história da humanidade e está ligado às variações da vegetação com as fases da Lua. O calendário mais antigo que se conhece, foi concebido no Egipto entre 4245 e 4242 antes de Cristo, baseou-se na observação do céu e fixou o ritmo das estações. Esta observação, inicialmente bastante sumária, foi-se aperfeiçoando progressivamente.

Os Mesopotâmios, berço das antigas civilizações do Próximo Oriente (Sumérios, Babilónios e Assírios), inventaram aparelhos como o gnómon, os pólos e a clepsidra, que permitiam determinar a altura dos astros e dos planetas acima do horizonte, medir ângulos e, de modo menos rigoroso, tempos. Apesar da limitação imposta pelo facto de a observação dos corpos celestes só ser possível a olho nu - a luneta astronómica só vi-

ria a ser inventada no século XVII da nossa era -, estabeleceram-se calendários das estrelas, determinaram-se trajectórias de astros e de planetas e usaram-se constelações para se orientarem na navegação. Desta astronomia, resultaram conhecimentos sobre as propriedades da esfera, das direcções angulares, dos círculos e mesmo de figuras mais complicadas (SERRES, 1995).

A fixação e, de certo modo, a divisão do trabalho, propiciaram maior disponibilidade de tempo, a qual foi aproveitada por alguns na especialização de ofícios através do desenvolvimento de técnicas de fabricação de instrumentos e de armas⁹. As tribos que anteriormente produziam quase inteiramente a totalidade dos bens necessários à sua subsistência, passaram a trocar entre si os produtos cultivados e fabricados. A descoberta das técnicas de fundição e de manufactura, primeiro do cobre, depois do bronze, estimulou fortemente a actividade comercial, de onde resultou o estabelecimento de ligações entre localidades afastadas centenas de quilómetros.

Esta actividade comercial promoveu e desenvolveu, por um lado, a formação de linguagens entre povoações, essenciais para os processos de transacção de bens e produtos e, por outro, complexificou a organização e estrutura das sociedades, o que gerou a necessidade de concepção de mecanismos de controlo. Assim, e porque as limitações da memória humana restringem o grau de sofisticação numérica, para que uma sociedade se

⁹ Os restos encontrados nas escavações de povoações neolíticas mostram como gradualmente se desenvolveram certos ofícios elementares, tais como a cerâmica, a carpintaria e a tecelagem. Existiam celeiros onde os habitantes guardavam os excedentes para o Inverno e períodos mais difíceis. Coziam o pão, fermentavam a cerveja, e nos últimos tempos do neolítico, preparavam e fundiam o cobre e o bronze. Neste período ocorreram invenções notáveis como a roda de oleiro e a roda de carro; aperfeiçoaram-se os barcos e os abrigos (STRUIK, 1997).

desenvolva necessita de uma escrita que actue como suporte material da matemática e que vá para além do simples cálculo.

As matemáticas e a escrita mantiveram e mantêm uma relação simbiótica. Nasceram ao mesmo tempo e os seus destinos sempre estiveram ligados, mesmo se a segunda está, em grande medida, livre dos constrangimentos inerentes às primeiras. Dito de outro modo, para que uma sociedade desenvolva a escrita, as necessidades materiais, em particular, a necessidade de preservar os vestígios das transacções, foram determinantes. Este aspecto foi compreendido após as descobertas arqueológicas dos últimos decénios terem permitido seguir o desenvolvimento, praticamente a partir do zero, de dois sistemas de escrita, um utilizado no sul da Mesopotâmia desde meados do IV milénio antes da nossa era, e o outro, na região de Suse, no Irão, um pouco mais tarde (RITER, 1995)¹⁰.

Nas duas sociedades o suporte material é a argila, praticamente indestrutível, e os primeiros documentos são *contas*. Foi portanto a necessidade de medir, dividir e repartir os materiais que deu origem aos primeiros sistemas de escrita. O primeiro, em particular, denominado escrita “cuneiforme”, viria a ter um grande sucesso durante os três mil anos seguintes. Utilizado para escrever, não apenas o sumério de origem, mas também o acádio, o hitita, o elamita, o urita e muitas outras línguas do Próximo Oriente Antigo, só viria a extinguir-se no início da nossa era. Mas o que resta dos testemunhos sobre a natureza do uso quotidiano da escrita mostra também a existência precoce e a importância de textos económicos e de cálculos. Os primeiros pictogramas só se conservaram sob o seu aspecto original nas inscrições em pedra, e foram baptizados, desde os Gregos de

¹⁰ In Elementos para uma História das Ciências, vol. I, 1995

“hieróglifos”; evoluíram para a escrita cursiva, dita “hierática”, que é utilizada em quase todos os documentos correntes (RITTER, 1995).

No fim do III milénio, estes escritos tinham atingido aquilo que parece ser uma forma estável. Os sinais e as suas combinações, a formação das palavras, dos números, etc., eram ensinados nas escolas reservadas quase exclusivamente aos filhos das classes sociais dirigentes. Das duas civilizações conhecem-se exemplos de exercícios escolares e de textos pedagógicos de espécies diferentes e, entre eles, textos e exercícios matemáticos. Sabe-se ainda, que a aprendizagem da aritmética começava muito cedo na vida do estudante, em simultâneo com a escrita e a leitura, e que as matemáticas, tal como hoje, eram consideradas como um dos temas “mais difíceis” (RITTER, 1995).

3.3. Nascimento da Astronomia e da Matemática

O surgimento da agricultura e da domesticação dos herbívoros, nas margens dos grandes rios das regiões sub-tropicais de África e da Ásia, primeiro ao longo do rio Nilo, do Tigre, do Eufrates, do Indo, depois ao longo do Ganges, do Huang Ho e, enfim, do Yang-Tse, cerca de cinco mil anos antes da nossa era, vieram permitir a melhoria do nível de vida das populações (STRUJK, 1997).

As terras situadas ao longo desses rios podiam produzir colheitas abundantes, desde que as cheias fossem devidamente controladas e os pântanos drenados. Os desertos áridos, as regiões montanhosas e as planícies que cercavam estas terras contrastavam com os vales dos rios que podiam transformar-se em terras muito férteis. Ao longo dos séculos, estes

problemas foram sendo resolvidos através da construção de barragens e diques, canais e represas. Os trabalhos de regulação de abastecimento de água exigiram a coordenação de diferentes actividades entre localidades afastadas numa escala que ultrapassou amplamente todos os esforços anteriores. Este facto esteve na base da constituição de grandes impérios, política e administrativamente muito centralizados. Foi assim na Suméria e no Egipto durante o quarto milénio, na China no terceiro e na Índia no segundo.

O excedente relativamente grande produzido por uma agricultura intensiva bastante aperfeiçoada, não só melhorou os padrões de vida da populações no seu conjunto, mas também criou uma aristocracia urbana encabeçada por numerosos chefes de clã. Existiam muitos ofícios especializados, mantidos por artesãos, soldados, funcionários e sacerdotes. A administração das obras públicas estava nas mãos de uma burocracia permanente, um grupo conhecedor do ciclo das estações do ano, do movimento dos astros, da arte de dividir os campos, do armazenamento dos alimentos e do estabelecimento de impostos. Usava-se uma escrita para codificar as exigências da administração e os actos dos chefes. Nesta época, os grupos sociais estavam firmemente estabilizados. Existiam chefes militares, rendeiros e agricultores livres, artífices, escribas, funcionários, servos e escravos. Os chefes locais aumentaram tanto a sua riqueza e poder que se elevaram da condição de senhores feudais, com autoridade limitada à de reis locais, com soberania absoluta.

No entanto, as tribos da montanha e do deserto, atraídas pela riqueza dos vales, levavam a querelas e a guerras que conduziam à mudança de poder de um rei tribal para outro, ou à fragmentação da sociedade em pequenas unidades feudais, recomeçando de novo o processo de unifica-

ção. Apesar de se verificarem diferentes transições entre feudalismo e absolutismo, o fundamental da estrutura económica e social permaneceu inalterada, durante séculos.

A posse da terra deu origem ao património; o poder político centralizado, ao imposto, o qual podia ser calculado a partir da quantidade de mercadorias produzidas ou da superfície cultivada. As necessidades geradas pelo novo modelo de organização incrementaram a matemática e a astronomia. A matemática surge, então, como uma ciência prática com o objectivo de permitir o cálculo do calendário, a administração das colheitas, a organização das obras públicas e a cobrança de impostos. Deste modo, a ênfase inicial foi dada naturalmente à aritmética prática e à medição. Porém, uma ciência cultivada durante séculos como um ofício especial e cuja tarefa não é apenas aplicar, mas também ensinar os seus segredos, desenvolve tendências para a abstracção e gradualmente passa a ser estudada por si própria. A aritmética transformou-se em álgebra, não só porque possibilitava melhores cálculos práticos, mas também porque era o resultado natural de uma ciência cultivada e desenvolvida na escola dos escribas. Por razões idênticas, a medição deu origem aos primórdios – mas não mais do que isso – da geometria teórica.

Os Egípcios, os Sumérios, os Chineses e os Hindus desenvolveram sistemas de numeração, conheciam as quatro operações e a aritmética, sabiam resolver empiricamente alguns problemas de álgebra, equações a uma incógnita e, nalguns casos, a duas. O cálculo de superfícies, o de diversos volumes e os imperativos ligados à arquitectura, desenvolveram a geometria de que a astronomia também viria a ser aliás, tributária.

O desenvolvimento económico da Mesopotâmia era superior ao das restantes sociedades localizadas no chamado *Crescente Fértil do Próximo Oriente*, que se estendia da Mesopotâmia ao Egípto, circunstância que não era alheia ao facto de estar situada numa encruzilhada de um grande número de rotas de caravanas, enquanto comparativamente, o Egípto permanecia isolado. Na primeira dinastia Babilónica, durante o reinado do rei Hammurabi, cerca de 1750 a. C., os babilónios dominavam a técnica para manipular equações quadráticas. Resolviam equações lineares e quadráticas com duas variáveis, e até mesmo problemas que envolviam equações cúbicas e biquadráticas. O forte carácter aritmético-algébrico da matemática babilónica transparece também na sua geometria. Tal como no Egípto, a geometria veio da fundamentação de problemas práticos relacionados com a medição, mas a forma geométrica de um problema era usualmente uma maneira de apresentar uma questão algébrica. Os textos mostram que a geometria babilónica do período semita possuía fórmulas para áreas de figuras rectilíneas simples e para volumes de sólidos simples. O “*Teorema de Pitágoras*”¹¹ era conhecido, não apenas para casos especiais, mas com toda a generalidade, como uma relação numérica entre os lados de um triângulo rectângulo (STRUJK, 1997).

A astronomia e a matemática abarcaram um conjunto de observações, de medidas, de relações, etc., e fruto das necessidades quotidianas conquistaram o estatuto de ciências. Os textos do último período das eras neobabilónica, persa e selêncida (600 a.C. – 300 d.C.) estão fundamentalmente influenciados pelo desenvolvimento da astronomia babilónica, que naquela época tinha já alcançado nível científico, caracterizando-se por

¹¹ Os pitagóricos atribuem a descoberta ao seu mestre. A grande diferença entre os babilónios e os pitagóricos baseia-se no facto de que os primeiros consideraram-no como um resultado de medições enquanto os segundos o conceberam como um teorema genérico abstracto.

uma análise cuidadosa das diferentes efemérides, úteis também para a astrologia. A matemática aperfeiçoou a técnica de cálculo e a álgebra, a resolução de problemas através de equações que nos tempos actuais ainda exigem uma considerável destreza mental. Nos antigos textos cuneiformes encontram-se já problemas de juros compostos, como a questão de saber qual o tempo necessário para que uma determinada quantia em dinheiro, sujeita a uma determinada taxa de juro, atinja o dobro do montante inicial. No entanto, as operações numéricas complicadas não estavam relacionadas com problemas de lançamento de impostos ou de medições, mas antes eram estimuladas pelos problemas de astronomia ou pelo puro prazer intelectual do cálculo.

O desenvolvimento de sociedades civilizadas com uma forma forte e centralizada de governo ocorreu em várias épocas e em lugares diversos e influenciou indirectamente os pressupostos que confirmaram o desenvolvimento da ciência. A imagem do universo como um estado ordenado, sujeito a regras e regulações introduzidas para o bem-estar humano, deve alguma coisa a este curso de acontecimentos. As necessidades práticas, ditadas pelas necessidades colectivas inerentes às de grandes sociedades ligadas à agricultura, à navegação ou à consolidação das capacidades de defesa militar, motivaram muitas investigações científicas.

No entanto, a ciência antiga, após uma época notável que a caracterizou durante largos séculos, limitou-se a um progresso contínuo mas lento, sem alterações de relevo. A investigação, ou seja a tentativa de interpretar factos longínquos e misteriosos com o auxílio e a comparação de fenómenos similares mais acessíveis e facilmente repetidos no dia a dia, foi obra meritória dos Gregos da Antiguidade. Embora tenha recebido do Egipto e da Ásia grande parte dos seus materiais intelectuais, a irradiação

do pensamento grego situou-se num contexto histórico marcado por um poderio político, económico, artístico e cultural, representando a primeira sistematização da ciência e da filosofia.

3.4. O Homem, a Perpetuação e a Transmissão de Informação

Desde os sinais do fumo à transmissão via satélite, da escrita cuneiforme à impressão laser, do ábaco ao computador, a espécie humana procurou e continua a procurar instrumentos de transmissão, armazenamento e processamento de informação. Esta capacidade de transmitir informação de geração em geração e de ampliar a informação através da cultura permitiu ao Homem evoluir da Idade da Pedra até à era actual da Idade da Informação.

A circulação da informação gerou, consequentemente o intercâmbio de experiências e conhecimentos. A transversalidade daí resultante atingiu os diferentes ramos da ciência, proporcionando um progresso social e tecnológico e, assim, a “Informação” constituiu-se como motor de desenvolvimento da Humanidade.

Primitivamente o Homem armazenava todo o seu saber no único instrumento disponível, o cérebro. No entanto, o Homem cedo se apercebeu das suas limitações intrínsecas enquanto veículo de transmissão e perpetuação de conhecimento. De modo a colmatar esta falha, criou e desenvolveu símbolos e códigos que com maior facilidade e rapidez permitiam recordar, memorizar e perpetuar informação. Munido de informação, o homem podia reduzir a incerteza nas decisões que quotidiana-

mente tinha de tomar. Esta descoberta levou a uma incessante investigação de novos instrumentos e técnicas de processamento, tratamento e descodificação de informação.

Graças às invenções da escrita, do desenho e da aritmética, um pedaço de papel pode ser utilizado para enviar uma mensagem, registar uma imagem ou efectuar um cálculo. Todas estas técnicas complementam a capacidade da mente humana para comunicar, recordar e pensar. Processar informação é manipular símbolos – elementos de pensamento, como números, palavras e imagens – , sujeitos às regras da lógica, da gramática e da aritmética, utilizados pelos seres humanos como forma de aumentar o nível de conhecimento ou a comunicação entre os seus semelhantes (PENZIAS, 1992.)

Símbolos são instrumentos. Todos os usos e aplicações da informação dependem de símbolos. Os símbolos representam ideias, condições, qualidades e outros conceitos abstractos. Individualmente ou em grupo, constituem a matéria prima que pessoas e máquinas, utilizam para obterem e transmitirem informação.

O cérebro, enquanto possuidor de vida e actividade, cria e manipula o próprio conjunto de símbolos à medida que adquire, processa armazena e actua sobre a informação sensorial. “*No caso humano, o neurónio organizado em cérebro inventou dois processos únicos, duas habilidades exclusivas da espécie humana: (i) Capacidade de transmitir informação de geração em geração; e, (ii) Capacidade de ampliar a informação através da cultura.*

A primeira capacidade, todos os seres vivos a têm em graus de maior ou menor qualidade. Todos fazem através da reprodução a transmissão, pelo menos da informação genética. À excepção dos seres humanos, é o acasalamento e a reprodução que indu-

*zem coesão na espécie. Não é, no entanto, uma coesão de estrutura, é uma coesão relacionada com a manutenção e propagação da espécie baseada na força de atração sexual. Ao criar estruturas mais complexas das que resultam apenas do acasalamento, o *Homo sapiens sapiens* distinguiu-se de todo o resto da Criação.*

E, para que a passagem da informação ao longo da cadeia de gerações possa ser feita com a máxima eficácia, o Homem inventou a cultura. A cultura, que só pode existir e desenvolver-se dentro de uma estrutura social altamente organizada, desempenha o elo central na coesão de diversas estruturas que as ligações entre os vários cérebros não undindo “(CARVALHO RODRIGUES, 1994).

No entanto, até muito recentemente, o conhecimento acerca dos símbolos gerados pelo cérebro era insuficiente para usá-lo como modelo. A humanidade criou sistemas de símbolos a partir de objectos como os que derivaram da utilização dos dedos para contar ou de tocar tambores para comunicar. Há cerca de 10 000 anos atrás surgiram as primeiras pinturas rupestres no interior de grutas em França e em Espanha: gradualmente, contornos grosseiros de mãos humanas colocadas contra as paredes da rocha deram lugar a desenhos de bisontes, de cavalos e até de rinocerontes cobertos de espessas pelagens. Estas pinturas representaram um enorme salto cognitivo. Pela primeira vez o homem associou objectos familiares a marcas deliberadamente traçadas numa superfície. Como as palavras, também os desenhos podiam representar objectos e ser entendidos como tal. Atribuir nomes às coisas, isto é, empregar palavras para as referir, para simbolizar algo mais, foi um processo que surgiu naturalmente. Mais difícil e demorado foi o processo de representação de palavras através de figuras, de imagens ou grafismos. A associação entre *palavra* e *representação gráfica* define a linguagem escrita (PENZIAS, 1992).

À semelhança do que se passa com tantas outras comodidades da vida moderna, a aparência de simplicidade dos sistemas de alfabeto fonético e numeração decimal parece óbvia ante o olhar retrospectivo actual. Todavia é bem diferente a versão que a história relata. O progresso dependeu de uma cadeia de acontecimentos mais ou menos incertos e ocasionais. Os pictogramas precederam o alfabeto, e símbolos numéricos menos sofisticados proporcionaram os indispensáveis passos intermédios que conduziram ao sistema decimal moderno. Os povos primitivos encontraram formas de lidar com a informação numérica milhares de anos antes de alguém ter sequer aprendido a contar, confiando nas suas marcas. Os povos europeus tiveram acesso ao sistema decimal, que constitui a base da moderna matemática, com a conquista normanda da Sicília, em 1091. Muito embora este sistema tenha chegado ao Ocidente através dos Sarracenos, a chamada *numeração árabe* derivava, por seu turno, de invenções indianas – em particular o número zero –, e proporcionou uma aritmética muito mais simples e prática. A ciência e a tecnologia da Europa do século XII ficavam francamente atrás das mais avançadas do Oriente.

Esta situação de desvantagem relativa, porém, em breve se alterou. À medida que o afluxo de novos conhecimentos ia resgatando a Europa da chamada *idade das trevas*, o acesso a novos instrumentos matemáticos possibilitou avanços noutras áreas. Os novos métodos de cálculo permitiram passar de um estádio de quase total ignorância, a outro de quase total dependência dos números.

A matemática dos nossos dias nasceu de uma combinação de invenção e descoberta. Ao mesmo tempo que inventava o sistema decimal e o método da multiplicação, o homem descobria o facto de que no produto de um número por outro era indiferente a ordem dos factores, inde-

pendentemente do método de multiplicação utilizado; assim como o número 7 sempre foi um número primo, independente dos símbolos que os diferentes povos tenham usado para o representar, ou até mesmo, do facto de esses povos terem, ou não, sequer conhecimento da existência de números. Naturalmente, os seres humanos começaram a aprender matemática de uma forma empírica. À medida que os homens iam encontrando objectos que exibiam propriedades semelhantes, iam extrapolando as noções abstractas de número e de contagem que corporizam o fundamento para a compreensão da matemática. Um exemplo por excelência deste tipo de abstracção, foi a descoberta do número zero.

Tal como já foi referido, símbolos são instrumentos. Do mesmo modo que alavancas e rodas aumentaram a capacidade dos nossos antepassados para deslocarem objectos, também os sistemas de numeração e de escrita aumentaram a capacidade de resolução de problemas. Algumas máquinas (como rebocadores e empilhadores) manipulam objectos físicos, outras (como relógios e computadores) símbolos. Tal como as do primeiro grupo ampliam o alcance e o poder do músculo humano através da aplicação de energia, as do segundo ampliam o alcance e o poder da mente humana ao proporcionarem a informação necessária numa conjuntura específica de tempo, localização e forma. Para tanto, estas máquinas de informação necessitam de armazenar, transmitir e processar símbolos (PENZIAS, 1992).

O processamento da informação consiste em converter um grupo de símbolos num outro, segundo regras de lógica e de matemática. A maioria destas máquinas relacionadas, de alguma forma, com a informação são praticamente recém-chegadas ao cenário deste nosso mundo. Ao longo da maior parte da história da humanidade, as máquinas limitaram-se,

quase exclusivamente ao desempenho de tarefas físicas. Ainda em meados do século XIX, por exemplo, um único relógio servia as necessidades de informação horária de quase todas as pequenas cidades europeias e da América colonial. Por essa altura, no entanto, já muitas casas particulares dispunham de diversas máquinas destinadas a trabalhos físicos, como rodas de fiar, rebolos, sarilhos e carroças.

Pela segunda metade do século XX, o advento das modernas telecomunicações e as invenções gémeas do computador e do transístor, haviam mudado drasticamente o panorama. Em especial, os avanços registados na tecnologia dos circuitos impressos conduziram a uma proliferação verdadeiramente explosiva dos microprocessadores. Em menos de dois séculos, o papel dos mecanismos de informação evoluiu do solitário relógio da torre da aldeia até uma posição dominante numa sociedade altamente mecanizada. Qualquer que tenha sido a função original poucos serão os equivalentes modernos das rodas de fiar, rebolos, sarilhos ou carroças a operarem actualmente sem um ou mais *chips* a controlá-los. Para além do papel sempre crescente que desempenham no controlo de dispositivos destinados a trabalho mecânico, os computadores penetram virtualmente em todas as tarefas relacionadas com a informação de que a nossa sociedade depende (PENZIAS, 1992).

A manipulação mecânica de símbolos começou com a tecnologia dos relógios e sistemas de relojoaria. Até à invenção do relógio mecânico, ocorrida no século XII, a contagem do tempo dependia do movimento de rotação da Terra – o movimento das estrelas através do firmamento ou a deslocação de sombras projectadas sobre o mostrador de um relógio de Sol. Reproduzir, por meio de mecanismos fiáveis, esses movimentos lentos e regulares constituiu, durante muitos séculos, a dificuldade chave,

contra a qual se depararam diversos cientistas, nas repetidas tentativas de superá-la. O elevado grau de precisão requerido para os mecanismos de relojoaria, exigia a imposição de limites estritos às amplitudes de variação permitidas. Esta precisão mecânica era conseguida com o recurso a engrenagens dentadas, que asseguravam que cada dente de cada roda engrenava suavemente nos das demais. O funcionamento dos sistemas de relojoaria comandados por engrenagens mecânicas depende directamente das propriedades numéricas das respectivas componentes, isto é, do número de dentes de cada roda, dependendo apenas de uma forma indirecta das propriedades físicas, como por exemplo, o ajuste suficiente para manter as rodas devidamente engrenadas. Em resultado disso, os fabricantes de relógios podem, em princípio prever que os ponteiros se manterão sincronizados até que alguma peça se quebre ou desgaste com o uso (PENZIAS, 1992).

A única excepção a essa dependência das propriedades numéricas diz respeito ao sistema de cronometragem que regula o movimento do mecanismo impulsor. O respectivo período ou unidade de tempo entre cada duas libertações sucessivas de dentes da engrenagem que controla o tempo – provém de alguma propriedade física, como a tensão de uma mola ou o comprimento de um pêndulo. Cada dente, fazendo subir uma pequena patilha, comunica um ligeiro impulso, que conservará o pêndulo em movimento.

A noção de que uma série de eixos podiam comandar-se mutuamente por meio de engrenagens levou ao fabrico de relógios equipados com inúmeros mostradores – representando a Lua e os planetas, para além das horas, dos dias, dos meses e até dos anos. Cada novo modelo era uma mera questão de reunir o número certo de engrenagens com o núme-

ro certo de dentes a fim de se obter a relação pretendida entre o respetivo número de rotações. Leis de proporcionalidade simples, isto é, multiplicações e divisões, regulam os sistemas de engrenagens associadas em cadeia.

À medida que a tecnologia das engrenagens mecânicas se ia aperfeiçoando, também relógios e sistemas de relojoaria se iam tornando mais precisos e sofisticados. Em cada novo modelo alguém se encarregava de calcular matematicamente o que aconteceria se as engrenagens se pusessem em movimento. Finalmente, no século XVII, alguns matemáticos – em especial Gottfried Leibniz e Blaise Pascal – começaram a explorar a ideia de inverter o processo: mudar a posição das engrenagens para determinar o que daí resultaria em termos de cálculo matemático, ou seja utilizar um instrumento para manipular números.

Em 1642, Blaise Pascal, com apenas dezanove anos, inventou a primeira calculadora mecânica (o ábaco já era utilizado na Ásia há praticamente 5 000 anos). Três décadas mais tarde, o matemático alemão Gottfried von Leibniz introduziu alguns melhoramentos à calculadora de Pascal, entre os quais o espião dentado o que permitia multiplicar, dividir e calcular raízes quadradas. Até ao aparecimento das calculadoras electrónicas, o mercado foi sustentado por calculadoras mecânicas fiáveis, constituídas por ponteiros e rodas dentadas, descendentes da máquina de Leibniz (GATES, 1995). Numa análise retrospectiva, poderá surpreender como uma noção tão “simples” demorou tanto a ocorrer a alguém. Na verdade, as máquinas de calcular comandadas por engrenagens mecânicas apresentavam enormes problemas técnicos de concepção. Requeriam componentes como matracas, embraiagens e diferenciais, dificilmente adaptáveis a partir da tecnologia dos sistemas de relojoaria então existentes.

tes. Consequentemente, algumas máquinas desse tipo, surgidas nos séculos XVII e XVIII, revelaram-se pouco mais do que meras curiosidades intelectuais, de fabrico dispendioso e uso limitado.

Seria necessário que a mecânica de precisão fornecesse a tecnologia de base para que as calculadoras operadas por engrenagens mecânicas começassem a surgir nos inícios do século XIX. Em 1822, um matemático inglês teve a percepção da possibilidade de criação do computador, facto que o tornou famoso até aos nossos dias. Charles Babbage, professor de matemática na Universidade de Cambridge, idealizou um dispositivo mecânico capaz de executar uma série de cálculos relacionados. Por volta de 1830, apercebeu-se que a informação poderia ser manipulada por uma máquina programável, desde que fosse convertida em números. Este precursor do moderno computador seria controlado por cartões perfurados, inspirado nos artefactos usados pelos tecelões franceses para controlarem as sequências de fios nos teares. A máquina a vapor idealizada por Babbage seria constituída por cavilhas, rodas dentadas, cilindros e outros componentes mecânicos característicos da recente Era da Revolução Industrial. Babbage acreditava que a sua “máquina analítica” iria acabar com o aborrecimento e impressão dos cálculos matemáticos. Na ausência de termos para designar os componentes do seu invento, designou o processador central, ou mecanismo interno, da máquina por “fábrica” e a memória por “armazém”. Babbage imaginou um processo de transformação da informação semelhante ao processo de transformação do algodão – retirado de um armazém e trabalhado numa fábrica dando origem a um novo produto (GATES, 1995)

A Máquina Analítica de Babbage era mecânica, mas previa uma forma de obedecer a diferentes grupos de instruções, servindo, deste

modo, funções diferentes. É esta a essência do *software*: um conjunto abrangente de regras que se podem introduzir numa máquina de modo a instruí-la para o desempenho de tarefas específicas. Babbage percebeu que para criar estas instruções iria necessitar de um tipo completamente novo de linguagem constituída por números, letras, setas e outros símbolos. O objectivo desta linguagem era “programar” a Máquina Analítica com uma longa série de instruções que permitiriam à máquina modificar as suas ações em resposta às diferentes situações. Babbage foi o primeiro homem a perceber que uma única máquina poderia executar diversas funções (GATES, 1995).

Babbage pediu demasiado à tecnologia do seu tempo, acabando por morrer sem ver os seus sonhos realizados. Alguns anos após a sua morte, uma conjugação de sistemas de engrenagens mais precisos com objectivos menos ambiciosos, permitiu que outros construíssem máquinas de calcular que deram um contributo útil, quer ao trabalho de cálculo científico, mais moroso, quer à contabilidade comercial, como por exemplo as caixas registadoras, ao longo da primeira metade do século XX. Por essa altura a tecnologia dos sistemas de relojoaria tinha alcançado os derradeiros limites, e o passo seguinte no campo da tecnologia da informação surgiu de uma invenção inteiramente diferente.

Em 1825, William Sturgeon, um inventor inglês, descobriu que uma corrente eléctrica que percorresse uma bobina de fio condutor criava um magnete. Passado pouco tempo, o físico americano Joseph Henry verificava que, colocando um núcleo de ferrite no interior da bobina, reforçava o efeito do magnete – conseguindo que este electroíman atraísse ou soltasse pequenos objectos de ferro, segundo ligava ou desligava um interruptor instalado em série entre uma bobina e um acumulador. Em 1837

Samuel Morse, incorporou o electroíman de Henry no primeiro telegrafo experimental, fazendo com que electroíman e interruptor ficassem distanciados entre si, cerca de 500 metros de extensão de fio, demonstrando desse modo, a viabilidade de comunicação eléctrica instantânea à distância. Durante cerca de 40 anos, o telegrafo foi a última palavra em matéria de comunicação à distância. Até que em 1876, Alexandre Graham Bell descobriu um meio de converter palavras directamente em corrente eléctrica, e esta, de novo, em palavras, evitando assim, a codificação e descodificação inerente à telegrafia. Em particular, o encaminhamento das palavras requeria controlo remoto dos comutadores envolvidos, o que levou ao aperfeiçoamento e emprego massivo de relés¹² (PENZIAS, 1992).

Com a expansão do serviço telefónico nos anos que se seguiram à Primeira Guerra Mundial foram milhões os telefones a instalar na rede, o que exigiu comutadores cada vez mais sofisticados e obrigou os engenheiros da especialidade a pesquisar formas mais eficazes e poderosas de tirar partido da tecnologia dos relés. Durante os primeiros anos deste século, os matemáticos trabalharam aquelas tecnologias, que conjugadas com as ideias lançadas por Babbage, permitiram, em meados dos anos 40, a construção do primeiro computador electrónico baseado nos princípios da Máquina Analítica, ao qual estão associados os nomes de Alan Turing, Claude Shannon e John von Neumann.

Em meados dos anos 30, Alan Turing, à semelhança de Babbage, propôs o que acabou por ficar conhecido como “máquina de Turing”, uma versão de máquina de calcular para múltiplas aplicações, que podia ser instruída para trabalhar com praticamente todos os tipos de informação. No final da década de 30, Claude Shannon, demonstrou que uma

¹² Interruptores armados de uma mola e accionados por electroímanes.

máquina capaz de executar instruções poderia também manipular informação. A sua ideia consistia em demonstrar que os circuitos de computador – fechados para verdadeiro e abertos para falso – poderiam executar operações lógicas utilizando o número 1 para representar “verdadeiro” e 0 para representar “falso”. Finalmente, com a máquina de John von Neumann dá-se a passagem de testemunho das tarefas de cálculo dos homens para as máquinas. Na máquina concebida por von Neumann, os próprios números registados podiam controlar cada operação, permitindo desse modo, aos utilizadores, a escrita de programas e respectiva introdução no computador, como se de quaisquer outros dados se tratasse.

A arquitectura de von Neumann revelou um potencial crescente a nível informático, que abarcou todos os ramos da ciência, ao mesmo tempo que novas tecnologias de informação registaram, e continuam a registrar, um desenvolvimento exponencial, desconhecendo-se até onde poderão chegar.

3.5. Cultura, Sociedade e Conhecimento

Aplicando uma metáfora de Morin (1991) poder-se-á dizer que *a cultura de uma sociedade é uma espécie de megacomputador complexo, que memoriza todos os dados cognitivos e que, portadora de quase-programas, prescreve as normas práticas, éticas e políticas dessa sociedade. Em certo sentido, o Grande Computador está presente em cada cérebro individual onde inscreveu as suas instruções e onde prescreve as suas normas; noutra sentido, cada cérebro é como que um computador individual e o conjunto das interacções entre estes computadores individuais constitui o Grande Computador. Nas sociedades arcaicas, este “computador” reconstitui-se e regenera-se sem cessar a partir das interacções entre os cérebros individuais. Nos impérios e reinos antigos, os Deuses constituem os “Grande Computadores” que memorizam e sintetizam*

zam todos os dados morais, estratégicos, políticos de uma civilização. Estes Grandes Computadores reconstituem-se e regeneram-se sem cessar a partir dos espíritos dos Magos/Padres/Iniciados. O Grande Computador está presente em cada cérebro dos súditos do reino, do qual dispõe, ao mesmo tempo, de um santuário e de um miradouro” (MORIN, 1992).

As condições socioculturais do conhecimento e as condições bio-cerebrais, embora de natureza completamente diferente mantêm entre si uma profunda interligação. As sociedades existem e as culturas formam-se, conservam-se, transmitem-se e desenvolvem-se como resultado das interacções cerebrais entre indivíduos. A cultura característica das sociedades humanas é organizada e organizadora através do capital cognitivo colectivo dos conhecimentos adquiridos, das aptidões aprendidas, das experiências vividas, da memória histórica e das crenças míticas da própria sociedade. Assim se manifestam “representações colectivas”, “consciência colectiva” e “imaginário colectivo”. E, dispondo do seu capital cognitivo, a cultura institui regras e normas que organizam a sociedade e dirigem os comportamentos individuais. As regras e normas culturais geram processos sociais e regeneram globalmente a complexidade social adquirida por essa mesma cultura. Assim, a cultura não é nem “superestrutura” nem “infra-estrutura”, termos aliás, impróprios numa organização recursiva onde o que é produzido e gerado se torna produtor ou gerador daquilo que o produz ou gera. Cultura e sociedade encontram-se numa relação geradora mútua na qual, os indivíduos são portadores e transmissores de cultura, ou seja, regeneram a sociedade, que por sua vez regenera a cultura.

Se a cultura contém em si um saber colectivo acumulado em memória social, se é portadora dos princípios, modelos, esquemas de conhecimento, se gera uma visão do mundo, se a linguagem e o mito são partes

constitutivas da cultura, então a cultura não tem só uma praxis cognitiva: é uma máquina cuja praxis é cognitiva.

Uma cultura abre e fecha as potencialidades bio-antropológicas de conhecimento. Abre-as e actualiza-as fornecendo aos indivíduos o seu saber acumulado, a sua linguagem, os seus paradigmas, a sua lógica, os seus esquemas, os seus métodos de aprendizagem, de investigação, de verificação, etc., mas, ao mesmo tempo, fecha-os e impõe-os com as suas normas, regras, proibições, tabus, com o seu etnocentrismo, a sua auto-sacralização, com a ignorância da sua ignorância. Também aqui, o que abre o conhecimento é o que fecha o conhecimento e tudo isto sugere a existência de um tronco comum entre cultura, sociedade e conhecimento (MORIN, 1992).

3.6. Síntese do Capítulo

- | | |
|------|--|
| 3. | A INFORMAÇÃO NAS ORGANIZAÇÕES HUMANAS |
| 3.1. | O Homo Sapiens |
| 3.2. | Origens Pré-Científicas |
| 3.3. | Nascimento da Astronomia e da Matemática |
| 3.4. | O Homem, a Perpetuação e a Transmissão de Informação |
| 3.5. | Cultura, Sociedade e Conhecimento |

A organização Homem cedo se apercebeu da insuficiência do cérebro, enquanto veículo de transmissão e perpetuação do conhecimento. Para colmatar esta insuficiência, criou e desenvolveu símbolos e códigos que com maior facilidade e rapidez permitiriam recordar, memorizar e perpetuar informação. Munido de informação, o Homem reduzia a incerteza nas decisões que quotidianamente tinha de tomar. Assim, a pouco e pouco, foi-se apercebendo das vantagens que podia retirar da divisão do trabalho, ao mesmo tempo que iniciou um processo de sedentarização, do qual resultou o surgimento das primeiras organizações sociais humanas (sociedades).

Com a sedentarização desenvolveram-se as actividades de permuta, o que conduziu à necessidade de saber contar, comparar pesos ou capacidades e identificar as épocas mais adequadas para a realização de sementeiras, facto que esteve na origem do primeiro calendário lunar. A fixação e a divisão do trabalho, possibilitaram o desenvolvimento de actividades paralelas, que vieram estimular a actividade comercial e o estabelecimento de ligações entre comunidades. Frutos destas ligações, gerou-se a necessidade de desenvolver

a linguagem entre povoações, o que complexificou a organização e a estrutura das sociedades e gerou a necessidade de concepção de mecanismos de controlo.

As necessidades geradas pelo novo modelo de organização, incrementaram o desenvolvimento da astronomia e da matemática. O aparecimento da matemática, inicialmente prática, decorre da necessidade de medir, de dividir e de repartir. Estas necessidades deram origem aos primeiros sistemas de escrita. Aliás, as matemáticas mantiveram e mantêm com a escrita uma relação simbiótica.

O desenvolvimento das sociedades ocorreu em diferentes épocas e é indissociável do desenvolvimento da ciência. A esta deve-se a imagem de um Universo ordenado, sujeito a regras e regulações introduzidas para o bem-estar humano. Muitas investigações científicas foram fruto das necessidades colectivas inerentes às grandes sociedades, como a agricultura, a navegação, ou a consolidação das capacidades de defesa militar.

Com a descoberta das suas limitações enquanto entidade una, o Homem iniciou uma incessante investigação de novos instrumentos e técnicas de processamento, tratamento e descodificação da Informação, como forma de aumentar o nível de conhecimento ou a comunicação entre os seus semelhantes.

A circulação da informação gerou, consequentemente, o intercâmbio de experiências e conhecimentos. A transversalidade daí re-

sultante atingiu os diferentes ramos do “saber” e proporcionou um progresso social e tecnológico que conferiu à “Informação” o papel de motor de desenvolvimento das sociedades.

A profunda interligação entre as condições socioculturais e as condições biocerebrais estão na origem das sociedades e da cultura de um povo. As culturas formam-se, conservam-se, transmitem-se e desenvolvem-se como resultado das interacções cerebrais entre os indivíduos. A cultura institui regras e normas que organizam a sociedade e dirigem os comportamentos individuais. Estas regras e normas geram processos sociais e regeneram globalmente a complexidade social adquirida por essa mesma cultura. Cultura e sociedade encontram-se, então, numa relação geradora mútua, em que os indivíduos são portadores e transmissores de cultura e deste modo regeneram a sociedade, que por sua vez regenera a cultura. A cultura contém, então, em si um saber colectivo acumulado em memória social, a qual é portadora de princípios, modelos, esquemas de conhecimento. A praxis da cultura é cognitiva, gera uma visão do mundo, no qual a linguagem e o mito são partes constitutivas.

4. A MEDIDA DA INFORMAÇÃO

Como influí a forma na informação que veicula? Como influencia o conhecimento dessa informação, as formas subsequentes? Como é que um processo complexo pode gerar estabilidade de estruturas em não equilíbrio? E, como é que se geram e se perdem essas estruturas?

Segundo Carvalho Rodrigues (1994), “*cada estrutura vai lutar para se conservar, vai querer ter a primazia, vai fazer tudo para existir o máximo tempo possível e, se for preciso, contra tudo e contra todos. Conflito é uma actividade que persiste, com maior ou menor intensidade, um pouco por todo o lado.*

O problema consiste em descobrir o que faz, por um lado, manter, persistir, aumentar as estruturas criadas pelo homem, se possível no máximo de ordem, afastando-as do equilíbrio termodinâmico, e o que, por outro lado, introduz nessas mesmas estruturas a desregulação, a perda da sua coesão e consequente substituição, numa situação dinâmica de conflito.

Os grandes factores são a forma e a informação que decorrem do neurónio e das suas estruturas, o cérebro e a sociedade hierarquizada” (CARVALHO RODRIGUES, 1994).

Aparentemente o ser humano dá maior importância a tudo o que se apresente como fora de um determinado contexto, ou seja, pode-se afirmar que quanto menos provável for um acontecimento, mais predisposto o indiví-

duo se encontra para ficar consciente da sua presença; um acontecimento raríssimo pode tornar-se, mesmo, num factor permanente da memória, por longos períodos.

Deste modo, pode concluir-se que quanto menos provável for um acontecimento, ou quanto menor for a sua frequência, tanto maior é a percepção que dele se tem, ou tanto maior é a quantidade de informação que ele encerra. É esta supremacia, a supremacia da percepção sobre as sensações, a supremacia da quantidade de informação que mede, num acontecimento, a sua frequência, quem comanda o comportamento e quem induz grandes modificações estruturais nos sistemas.

4.1. Um Pouco de História

A primeira manifestação da informação como realidade mensurável, teve lugar, durante os anos 20, nos trabalhos desenvolvidos pelo investigador de estatística matemática Ronald Fisher, aparecendo explicitamente nas suas publicações a partir de 1934. A noção de informação surge de um modo bastante discreto, face à introdução da grande variedade de conceitos e de operadores novos que a obra de Fisher contempla.

A dedução de Fisher baseia-se na hipótese de obtenção de informação a partir de uma população bastante numerosa, isto é infinita, caso limite em que está em permanente reprodução. Nesta situação, não se podem conhecer, nem tratar, todas as informações relativas a cada indivíduo que compõe o universo em estudo. O problema coloca-se então, na capacidade de descrever correctamente a população por meio de indicadores de síntese, obtidos a partir de amostras procedentes da população em estudo. Quanto maior for o número de dados passíveis de ser analisados,

mais representativa será a amostra da população de referência e maior o volume de informação contido na amostra.

A partir daquela hipótese, Fisher define tecnicamente a informação como o valor médio do quadrado da derivada do logaritmo da lei de probabilidade estudada. (DION, 1997).

Exactamente no momento em que Fisher elabora as suas próprias teorias, 1922, o desenvolvimento da indústria das telecomunicações centra-se na investigação de melhores rendimentos das linhas e no financiamento de laboratórios de investigação de onde irão sair os primeiros resultados significativos. De entre os diversos estudos efectuados, marcam uma etapa importante os trabalhos desenvolvidos por um investigador de nome Carson, que demonstrou, contrariamente à ideia aceite, que a emissão da modulação de frequência ocupa necessariamente uma banda passante tão larga como a emissão de modulação de amplitude.

Na sequência daquela descoberta, a investigação focalizou-se nos problemas de frequência do sinal e da banda útil passante e, em 1924, Nyquist engenheiro na companhia de telégrafos e telefones Bell, publica um artigo no qual demonstra que é necessária uma banda passante mínima para atingir um nível dado de transmissão do sinal, qualquer que seja a técnica utilizada. Para as necessidades da sua demonstração, Nyquist é conduzido a redefinir os termos do problema, mostrando que na transmissão do sinal, assim como no problema do transporte, a principal restrição assenta na quantidade a transportar. A fim de avaliar correctamente o melhor resultado possível de um meio qualquer de comunicação, deverá ser medida a quantidade de informação transportada. Nyquist escolhe então, como quantidade de base, o número "M" de sinais do sistema telegrá-

fico considerado, número este correspondente às diferentes modulações do sinal que pode ser transmitido, e estabelece a fórmula que liga a velocidade de transmissão "W" a "M" do modo seguinte:

$$W = K \cdot \log M \quad (6)$$

sendo K uma constante definida por certas propriedades da linha de telegrafo. Pode notar-se nesta fórmula, como na de Fisher, a presença do operador logarítmico, que se encontrará mais tarde com Shannon e cuja presença será, posteriormente, justificada na maior parte das fórmulas de medida da informação.

Quatro anos depois, Hartley, também engenheiro na companhia Bell, sugeria que a transmissão de uma dada quantidade de informação necessita de um binário de banda mínima, velocidade de circulação/tempo. É a primeira vez que o termo quantidade de informação aparece numa investigação relativa a telecomunicações (Nyquist, não fala ainda da "inteligência" de uma mensagem ou do seu número de sinais). É então Hartley que propõe a primeira fórmula em que surge uma medida matemática da quantidade de informação (I), definida como:

$$I = n \cdot \log s \quad (7)$$

designando n o número de sinais da mensagem e s, o mínimo de sinais do alfabeto utilizado. A partir destas aproximações, o terreno estava preparado para elaboração de uma verdadeira teoria da informação (DION, 1997).

No entanto, a história das ciências não é linear e foram ainda precisos mais vinte anos e uma guerra mundial para que Shannon, também engenheiro na Bell, publicasse o artigo que veio dar verdadeiramente a visão da teoria, tal como se conhece hoje em dia. Estava-se, nessa altura, em 1948 e todas as condições se encontravam reunidas para que uma teoria não somente emergisse, mas também para que fosse posto em marcha um novo conhecimento do mundo.

4.2. Definição da Quantidade de Informação: Fórmula de Shannon

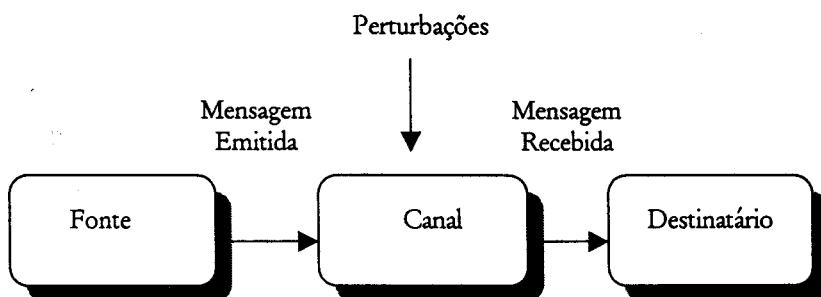
Claude Elwood Shannon nasceu em 1916, em Gaylord, no estado de Michigan. O seu percurso de investigador começou com Norbert Wiener, no Massachusetts Institute of Technology (MIT)¹², onde Shannon fez os seus estudos antes da Segunda Guerra Mundial, enquanto Wiener ensinava matemática. Em 1943, inicia uma carreira como engenheiro nos laboratórios da Bell em Nova York, onde tinha como missão estudar os meios de melhorar o rendimento das linhas de telégrafo. Confrontava-se então, com os mesmos problemas que tinham sido abordados antes por Nyquist e Hartley.

Em 1948, Shannon produziu o que é hoje considerado como a obra fundadora da Teoria da Informação. Inicialmente tratava-se apenas de uma publicação técnica interna da companhia Bell, mas aquele artigo rapidamente deu a volta ao mundo. Neste Shannon refere explicitamente os trabalhos de Nyquist e Hartley. Deste trabalho, o essencial foi retomado num livro que publicou, alguns meses mais tarde, sob a dupla caução

¹² Adiante designado MIT

de um editor universitário e de um colega investigador, Warren Weaver. A sua ambição era integrar, na reflexão, os fenómenos do ruído nas vias de comunicação e de ter em conta, nos cálculos de natureza estatística, a codificação utilizada.

Uma vez lançada a sua teoria, Shannon está inevitavelmente exposto e torna-se o centro de um debate que agita fortemente toda a comunidade científica. Weaver inicia, por seu lado, uma série de conferências que marcam o início das ciências cognitivas, e o MIT cria, especialmente para Shannon, uma cadeira de teoria de informação no departamento de engenharia eléctrica, cadeira que leccionará durante vários decénios.



Fonte: Dion, 1997

Fig. 4.1.: Esquema Fundamental de uma Comunicação (Paradigma de Shannon)

Numa primeira aproximação, a “Teoria da Informação”, não constitui uma teoria muito complexa sobre o plano da formalização matemática. Para compreender as grandes linhas, é suficiente conhecer duas definições que utilizam, elas próprias, operadores matemáticos simples: a da quantidade de informação e a da entropia. Embora se possam estudar os efeitos provocados por outras noções, como a redundância ou o ruído, a

importância vital para a compreensão da Teoria da Informação assenta fundamentalmente nas duas definições referidas (DION, 1997).

De acordo com a Teoria da Informação, um processo de comunicação pode ser esquematizado conforme figura n.º4.1. Esta esquematização encerra todavia, um interesse marginal, uma vez que o principal objectivo da Teoria da Informação consiste em precisar a capacidade de transporte de um canal definido e, para este fim, utiliza uma definição quantificada da noção de informação. É aqui que reside todo o potencial da Teoria da Informação, ainda que se deva sublinhar o seu carácter extremamente reduutor, ao não considerar os conteúdos das mensagens, na problemática da transmissão.

Na teoria de Shannon, é, de uma maneira puramente matematizada que, por definição, uma informação designa um ou vários acontecimentos de entre um conjunto finito de acontecimentos possíveis. Todas as medidas informacionais são resultados probabilísticos que caracterizam um conjunto de acontecimentos.

Shannon definiu, a quantidade de informação contida numa mensagem x, pela fórmula:

$$H(x) = - \sum_i p(i) \log_2 p(i) \quad (8)$$

onde i representa o índice dos N símbolos $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_N$ utilizados na mensagem e $p(i)$ a frequência de utilização, ou a probabilidade de ocorrência do símbolo x_i .

Passa-se da frequência de utilização de um símbolo da mensagem, à sua probabilidade assinalando que a função H define, não tanto uma mensagem particular, mas um conjunto de mensagens, utilizando todos o mesmo alfabeto, isto é, a mesma série de símbolos com a mesma distribuição de probabilidade dos símbolos.

A função H representa, com efeito, a quantidade de informação média por símbolo, no conjunto das mensagens x que utilizam determinado alfabeto. Para conhecer a quantidade de informação total veiculada por uma certa mensagem particular, é necessário multiplicar $H(x)$ pelo número de símbolos dessa mensagem.

Supondo que se pode percepcionar um acontecimento, este acontecimento comporta uma determinada quantidade de informação. A mínima informação que transmite, é sobre a sua própria sobrevivência, o simples facto de acontecer. Com efeito, a teoria da informação pôr-a neste mínimo: vai-se medir a informação produzida por este acontecimento, limitando-a ao que ela transporta somente pelo facto de ter ocorrido, isto é, sem ter em conta o significado que determinado acontecimento pode ou não encerrar. Nesta situação limite, será natural afirmar que a ocorrência de um acontecimento trará tanto mais informação quanto maior é a imprevisibilidade do acontecimento; se com certeza se sabe que um acontecimento se verifica, a sua ocorrência não comporta nenhuma novidade; pelo contrário, se não existe certeza da sua ocorrência, então existe uma incerteza e aprende-se qualquer coisa. É por vezes possível medir o carácter de previsibilidade ou de imprevisibilidade *a priori* de um acontecimento: sempre que se conhece a sua probabilidade de ocorrência. É por isso que se diz que a informação veiculada por um acontecimento é tanto maior quanto menor for a sua probabilidade de ocorrência.

4.2.1. Quantidade de informação de uma mensagem

O interesse mais evidente da medida da quantidade de informação carreada pelo resultado de uma experiência, aparece desde que se trate de transmitir esse resultado à distância, a um destinatário longínquo. Esta operação implica a existência de uma via de comunicação esquematizada na sua expressão mais simples, na fig. 4.1..

O resultado da experiência é enviado sob a forma de uma mensagem constituída por sinais ou símbolos. É necessário portanto que o destinatário seja capaz de reconstituir os resultados transmitidos a partir da mensagem que lhe chega. Dito de outra forma, é necessário que exista um código permitindo expressar o resultado a transmitir através de símbolos constituindo uma mensagem. Entre a fonte emissora da mensagem e a via, tem de existir uma operação de codificação enquanto a operação inversa é efectuada à saída. Os dois teoremas que constituem o corpo da teoria de Shannon, referem-se aos problemas colocados pelas operações de codificação e as condições da sua optimização (ATLAN, 1992).

O método de codificação mais simples, senão mesmo o mais económico, é evidentemente o da utilização de tantos símbolos diferentes quantos os resultados possíveis e afectar cada símbolo a um resultado. Neste caso, é fácil definir a quantidade de informação média por símbolo de mensagem enviada: é igual à quantidade de informação média obtida por cada resultado da experiência. O *número de resultados possíveis* torna-se igual ao *número de símbolos* utilizados (ATLAN, 1992).

Compreende-se então a definição de Shannon da “quantidade de informação de uma mensagem x”

$$H(x) = - \sum_i p(i) \log_2 p(i) \quad (8)$$

onde $p(i)$ representa a probabilidade do símbolo x_i e a função assume, de novo, a forma $H(x) = - \log_2 p$ quando todos os símbolos utilizados apresentam a mesma probabilidade de ocorrência p . Verifica-se como a quantidade de informação de uma mensagem é, de facto, uma quantidade de informação média por símbolo. Com efeito, a mensagem é em geral, constituída por uma série de numerosos símbolos: ou várias experiências diferentes *mas todas susceptíveis de não dar senão os mesmos resultados e com a mesma distribuição de probabilidades* (ATLAN, 1992).

Como se referiu atrás a quantidade $H(x)$, representa não a quantidade de informação veiculada pela globalidade da mensagem, mas o seu valor médio por símbolo. A quantidade da informação global da mensagem será então igual a $H(x)$ multiplicada pelo número total de símbolos utilizados por essa mensagem. O termo “quantidade de informação da mensagem x” que define H não deve então induzir em erro. Note-se que Shannon tinha denominado esta função H como a entropia da mensagem e que, no seguimento de diversos autores, renunciou-se a este termo em virtude das confusões que poderiam ser geradas quando se tratava das relações entre H e a entropia de um sistema no sentido termodinâmico.

Com efeito, é necessário entender que a função H aplica-se não a uma mensagem particular, mas a um conjunto de mensagens que utilizam todas o mesmo número de símbolos diferentes, com a

mesma distribuição de probabilidades para estes símbolos. As mensagens poderão diferir pela sua extensão e também pelo seu conteúdo – a ordem pela qual os símbolos são utilizados – mas a função H que as caracterizará será a mesma. Dito de outro modo, esta função caracteriza essencialmente um grupo de símbolos, isto é, um alfabeto no sentido lato, cada um deles estando afecto a uma frequência de utilização ou a uma probabilidade de ocorrência, num conjunto de mensagens que o utilizam.

A condição de validade desta definição é que o conjunto em questão seja estatisticamente homogéneo. Diz-se que a emissão de sequências de símbolos pela fonte deve constituir um processo estocástico estacionário e ergódico, o que significa que o regime das probabilidades é o mesmo em todas as sequências de símbolos e também que não existem variações periodicamente arrumadas, ou outras que permitam dividir o conjunto das mensagens em processos independentes.

Mais ainda, a fórmula de Shannon tal como foi apresentada, implica que as probabilidades dos símbolos sucessivos numa mensagem sejam *independentes*, isto é, que o resultado de uma experiência não seja influenciado pelo resultado de uma experiência precedente. Mas, esta última condição pode ser desviada e a própria função H pode ser redefinida, assumindo uma forma um pouco mais complicada.

Um dos problemas frequentemente colocados refere-se à determinação da quantidade de informação de uma mensagem já constituída, tomada do conjunto de mensagens, e percebida independentemente de todo o resultado de experiências físicas. Um exemplo clássico é o da quantidade de informação de uma língua falada ou escrita.

A condição prévia de validade deste conceito é ser seguro que a emissão de frases escritas ou faladas numa determinada linguagem, constituam um processo estocástico estacionário e ergódico. A aplicação da teoria de Shannon está submetida a este postulado, embora frequentemente não seja explicitado nem discutido, de que estejam verificadas essas condições.

4.2.2. Alfabeto de 2 símbolos: definição de unidade bit

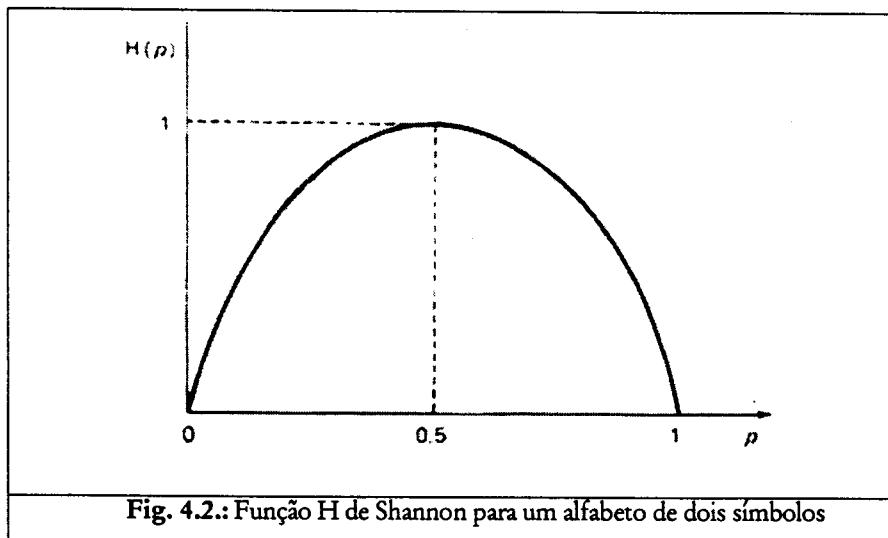
Por razões técnicas ligadas ao desenvolvimento da electrónica, as máquinas para tratar informação são mais facilmente adaptáveis a um alfabeto com apenas dois símbolos. Por outro lado, a álgebra de Boole encontra-se perfeitamente adaptada à utilização deste tipo de alfabeto.

Deixando de lado os problemas gerais de codificação, analise-se a fórmula da Shannon no caso de um alfabeto com 2 símbolos. Seja 0 e 1 ou x_1 e x_2 o modo de denominar estes dois símbolos, que são evidentemente arbitrários e não provocam qualquer consequência particular na sequência de raciocínio. Considere-se $p(0)$ e $p(1)$ as probabilidades respectivas de utilização de 0 ou de 1 no conjunto de mensagens x que se pretende transmitir. A quantidade de informação destas mensagens, que é com efeito a quantidade de informação média por símbolo, é igual a:

$$H(x) = - p(0) \log_2 p(0) - p(1) \log_2 p(1) \quad (9)$$

Constata-se que se $p(0) = p$, então $p(1) = (1 - p)$ de modo que a fórmula anterior vem:

$$H(x) = -p \log_2 p - (1-p) \log_2 (1-p) = H(p) \quad (10)$$



Sendo então $H(x)$ uma função de p , conforme representada na fig. 4.2.

No caso de as propriedades serem iguais, então

$$p(0) = p(1) = \frac{1}{2} \text{ o que corresponde a}$$

$$H(x) = -2 \cdot \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} = 1 \quad (11)$$

A fig. 4.2. mostra que este é o valor máximo que pode assumir a função H no caso de um alfabeto de 2 símbolos. De acordo com a propriedade geral da função H , este máximo é realizado no caso em que os símbolos são equiprováveis.

É este valor máximo de H , da quantidade de informação de um alfabeto binário, que serve de unidade de medida às quantidades de informação, o qual é denominado **bit**. Com efeito, a opção de logaritmos de base 2 utilizados na função H corresponde à escolha da unidade, que conduz a um valor de $H = 1$.

Sabe-se que bit é a abreviatura de símbolo binário. Viu-se que 1 bit é a quantidade de informação máxima de qualquer mensagem expressa em linguagem binária, com a condição de que as probabilidades, ou frequências de utilização de 2 dígitos sejam as mesmas, todas as duas iguais a $\frac{1}{2}$. Caso contrário, a quantidade de informação por dígito binário é inferior a 1 bit. Um bit é então a quantidade de informação que corresponde à redução da metade da incerteza sobre um problema dado. É por exemplo, o aparecimento, em resposta a uma questão dicotómica, de um 0 (sim) ou de um 1 (não), admitindo que a sua ocorrência seja *a priori* equiprovável, transporta uma informação precisa sobre o problema em questão (DION, 1997).

4.2.3. Informação de Shannon: significado e limitações

Da função da medida de informação, de Shannon, resultam duas características fundamentais:

- a) A informação é uma quantidade abstracta mensurável, cujo valor não depende do conteúdo que carreia, do mesmo modo que o comprimento, o peso, ou a temperatura têm medidas independentes do facto de ser extenso, elevado ou quente.

- b) A informação está ligada ao conjunto das formas possíveis de realização de um acontecimento no sentido lato (resultados de uma experiência, utilização de uma letra no curso de uma frase escrita ou falada, etc...): o seu valor depende das probabilidades associadas com as suas formas, mas em caso algum das suas causas ou das suas consequências.

Isto é, trata-se de uma definição matemática independente do substrato físico veículo de informação. Toda a classificação dos símbolo x com as categorias i e as probabilidades associadas $p(i)$ permite definir, pela fórmula de Shannon, uma quantidade de informação $H(x)$, que é uma função destas probabilidades esta função goza de um certo número de propriedades como: independência, continuidade e aditividade.

Ao aceitar a medida de informação, como a incerteza transportada por um acontecimento, a função H tem todas as propriedades que parecem razoáveis para atingir uma tal definição. Mais adiante ver-se-á que existe uma outra propriedade essencial: se uma mensagem x escrita num alfabeto de N símbolos x_i deve ser transcrita para uma linguagem binária, o número médio de símbolos binários necessários por símbolo do alfabeto de origem, é pelo menos igual a $H(x)$. Esta função constitui então o limite à eficácia da codificação de qualquer mensagem em representação binária.

Para precisar esta ideia, Atlan (1970) cita *La Science et La Théorie de L'Information* da autoria de Brillouin: “*Define-se informação como o resultado de uma escolha; não a consideramos como o ponto de partida de uma previsão, mas como o resultado que permite uma outra opção. Deixa-se de lado o valor*

humano de informação. Atribui-se um certo valor de informação a um conjunto de 100 letras sem investigar se este conjunto tem um sentido na língua inglesa e se a frase obtida tem alguma importância prática. Segundo a nossa definição, daremos o mesmo valor de informação a 100 letras tomadas ao acaso ou a uma frase de um jornal, de uma peça de Shakespeare ou de um teorema de Einstein. Por outras palavras, define-se informação independentemente do conhecimento ao qual não se pode atribuir valor numérico.

Não é feita a distinção entre informação útil e informação inútil, preferindo ignorar completamente o valor da informação. A nossa definição estatística do valor da informação não é baseado senão na raridade. Se uma situação é rara, contém uma informação; que esta informação seja ou não despojada de valor, isso não interessa. A ideia de "valor" refere-se ao seu emprego possível para um observador vivo; este aspecto do problema ultrapassa esta teoria; somos incapazes de discutir o encaminhamento do pensamento ou todo outro problema relativo ao emprego de informação pelos seres vivos" (ATLAN, 1992).

Esta definição de informação revela-se contudo extremamente útil e prática; corresponde perfeitamente à situação de um engenheiro das telecomunicações que deve poder transmitir toda a informação contida num dado telegrama, sem se preocupar com o valor que o mesmo reveste para a pessoa a quem o telegrama é destinado.

A informação é uma grandeza absoluta que tem o mesmo valor numérico para qualquer observador; o seu valor humano, pelo contrário, é necessariamente, uma grandeza relativa, que terá valores diferentes segundo aquele que terá a possibilidade de a compreender e utilizar posteriormente. Por outro lado, a noção de informação é sempre medida por uma quantidade positiva.

Estas limitações da definição de informação pela função H, foram expressas por Weaver, que dividia os problemas colocados pelas comunicações, em três grupos distintos:

- a) Problemas técnicos: com que precisão os símbolos utilizados podem ser transmitidos?
- b) Problemas semânticos: com que precisão os símbolos transmitidos veiculam o significado procurado?
- c) Problemas de eficácia: com que eficácia a mensagem portadora de significado uma vez recebida, afecta o destinatário da maneira desejada (ATLAN, 1992)?

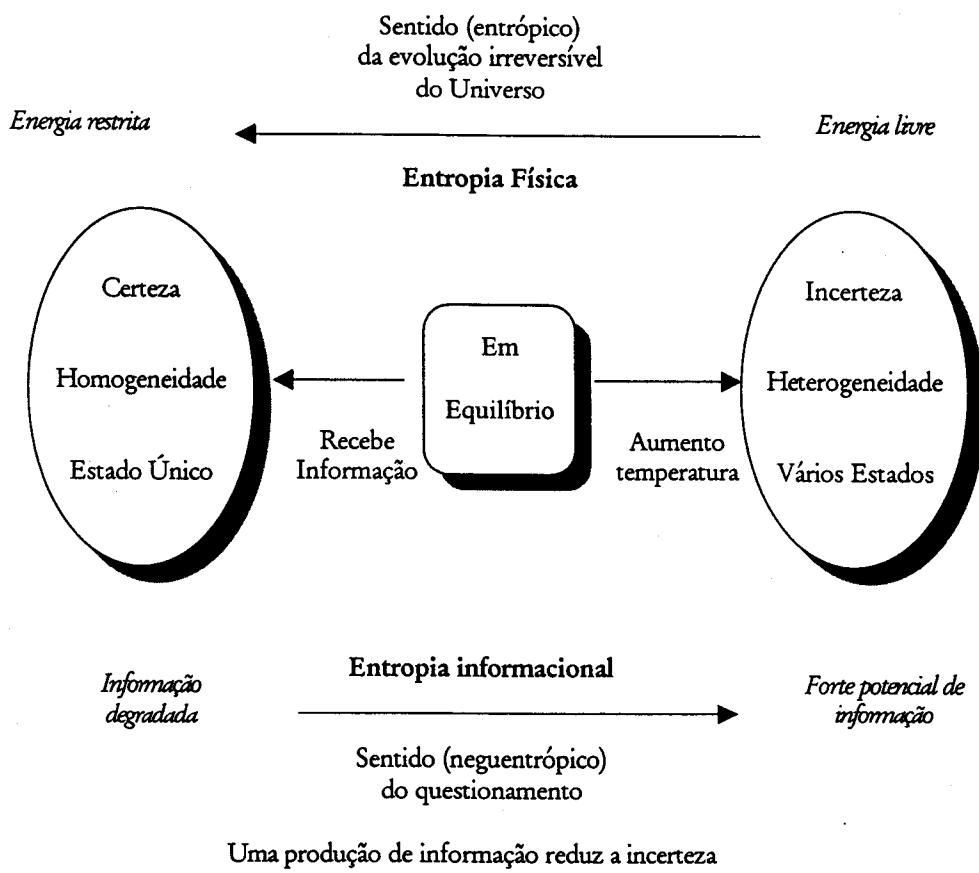
A teoria de Shannon preocupa-se com os problemas técnicos excluindo deste modo tudo o que se prenda com aspectos semânticos e de eficácia.

Uma outra limitação da função H, de Shannon, que importa enfatizar, é se ela está particularmente bem adaptada a tratar de problemas de transmissão de informação, está muito menos adaptada, é o facto da sua inadequação no que respeita à medida da quantidade de informação em sistemas organizados. Com efeito, é necessário ter presente a grande distinção entre quantidade de informação de um sistema, ou de um conjunto de acontecimentos, como medida da sua organização ou complexidade, e a informação transmitida numa via de comunicação.

Portanto, é evidente que esta teoria da transmissão de informação, devia poder abrir passagem para uma teoria da organização, ou da complexidade, ou do grau de ordem dos sistemas organizados. Esta ideia estava subjacente nos desenvolvimentos de Shannon, pelo que

denominou a sua função H como “entropia da mensagem”, por referência à entropia física, no seguimento dos trabalhos de Boltzmann na termodinâmica estatística, que mede o grau de ordem de um sistema físico constituído por um conjunto de partículas elementares (ATLAN, 1992) (fig. 4.3.).

Uma produção de energia permite inverter o sentido da evolução entrópica



Fonte: Dion, 1997

Fig. 4.3.: Entropia Física e Entropia Informacional

A função H foi definida a partir de resultados possíveis de experiências, ou de símbolos capazes de transmitir informação e aos quais podem ser associados probabilidades de ocorrência. Um grau acima na generalização e na abstracção, consistiu em considerar uma série de símbolos aos quais se podem associar as probabilidades, como uma mensagem portadora de informação, independentemente da existência de resultados da experiência de que se trata. Por fim, a última etapa consiste em assimilar todo um conjunto de acontecimentos, no sentido lato (conjunto de elementos de uma estrutura, por exemplo), a uma série de símbolos tomados de uma linguagem, e constituir uma mensagem. É evidente que este último caso da fórmula de Shannon supõe verificadas um certo número de hipóteses que é necessário ter presente porque não são muitas vezes formuladas.

Falou-se da hipótese do carácter estacionário e ergódico do processo estocástico que permite associar as probabilidades aos diferentes acontecimentos, ou seja, trata-se com efeito de uma hipótese que admite a homogeneidade estatística do conjunto.

Mais ainda, afectar o *conjunto de acontecimentos a um conjunto de símbolos constituindo uma mensagem*, quer dizer que se considera implicitamente uma *transmissão de informação* do sistema constituído por estes acontecimentos ao observador. Dito de outro modo, aplicar a fórmula de Shannon a uma medida de quantidade de informação contida num sistema quer dizer que se considera que existe *uma via de transmissão de informação entre o sistema e o observador*. A esta condição, toda a série de elementos, pode ser considerada como uma mensagem emitida por uma fonte, e pode-se então tentar caracterizar matematicamente com a

ajuda da função de Shannon, sem ter a menor ideia sobre a natureza física da fonte (ATLAN, 1992).

Retenhamos por agora que a passagem da noção de quantidade de informação transmitida numa via, como define a fórmula de Shannon, à quantidade de informação contida num sistema, é realizada considerando que existe uma via de comunicação entre o sistema e o observador; a quantidade de informação do sistema, é então de facto, a quantidade de informação transmitida nessa via.

4.3. Codificação – Teorema da via sem ruído

Trata-se de problemas colocados pela transcrição fiel e não equívoca de uma mensagem escrita com a ajuda de um certo alfabeto a N símbolos utilizando um outro alfabeto tendo um número N' de símbolos diferente de N. Com efeito o caso onde $N' = N$ não coloca senão problemas de tecnologia, no que respeita à escolha dos veículos físicos dos símbolos melhor adaptados.

O problema que se encontra muito frequentemente é então transcrever uma mensagem escrita num alfabeto a N símbolos ($N > 2$), como ajuda de um alfabeto binário. É evidente que cada um dos N símbolos será obrigado a fazer corresponder mais de um símbolo binário. Um exemplo clássico é o codificar as 26 letras do alfabeto latino em alfabeto binário. Será evidentemente necessário mais de um 0 ou de um 1 para expressar cada uma das 26 letras: cada uma delas deverá ser codificada com a ajuda de uma sequência de vários 0 e 1, absolutamente característica, de tal modo que uma vez que seja dada a chave do código (a lista das correspondências entre letras e 0 e 1), a descodificação se possa fazer sem ambi-

guidade, isto é, a operação inversa, que consiste em passar da transcrição em alfabeto binário à escrita original do alfabeto de partida.

Os problemas que se colocam são os seguintes. Todas as formas de realizar a codificação têm as mesmas vantagens e os mesmos inconvenientes? A resposta a esta questão é evidentemente negativa. Pode-se desembaraçar das leis que permitem saber em que direcção é mais ou menos vantajoso ligar-se? Em particular pode determinar-se o mínimo de símbolos binários que é necessário reunir para codificar eficazmente – isto é sem equívoco – cada letra do alfabeto de 26 letras? A resposta a esta última questão é positiva, e a fórmula de Shannon permite calcular esse mínimo em todos os casos possíveis: é este problema que vai ser analisado e que constitui o objecto do que se denomina por “teorema da via sem ruído”

Seja N o número de símbolos do alfabeto a codificar em símbolos binários. Vários casos são possíveis:

1. N é uma potência inteira de 2 e os N símbolos são utilizados com a mesma frequência (eles são equiprováveis), que é então uma potência inteira de $\frac{1}{2}$, ou seja $1/2^k$;
2. os N símbolos não são equiprováveis, mas as suas frequências são ainda potências inteiras de $\frac{1}{2}$ tais que $1/2^{k1}, 1/2^{k2}$, etc.;
3. os N símbolos são equiprováveis mas N é um número qualquer ($N \neq 2^k$); e,
4. os N símbolos não são equiprováveis e as suas probabilidades assumem qualquer valor.

4.4. Transmissão de Informação numa Via com Ruído

Até ao momento admitiu-se implicitamente que os problemas de codificação e descodificação, se processavam numa via de comunicação de uma forma perfeita. Uma via implica com efeito, uma mensagem emitida e uma mensagem recebida. Toda a análise efectuada admitiu que ambas eram idênticas. Com efeito, o mais frequente não é esta situação, porque existem parasitas na via que vão produzir erros de transmissão de tal modo que a mensagem emitida não é exactamente idêntica à mensagem recebida.

De uma forma geral, pode representar-se um sistema de comunicação como o esquematizado na fig. 4.4..

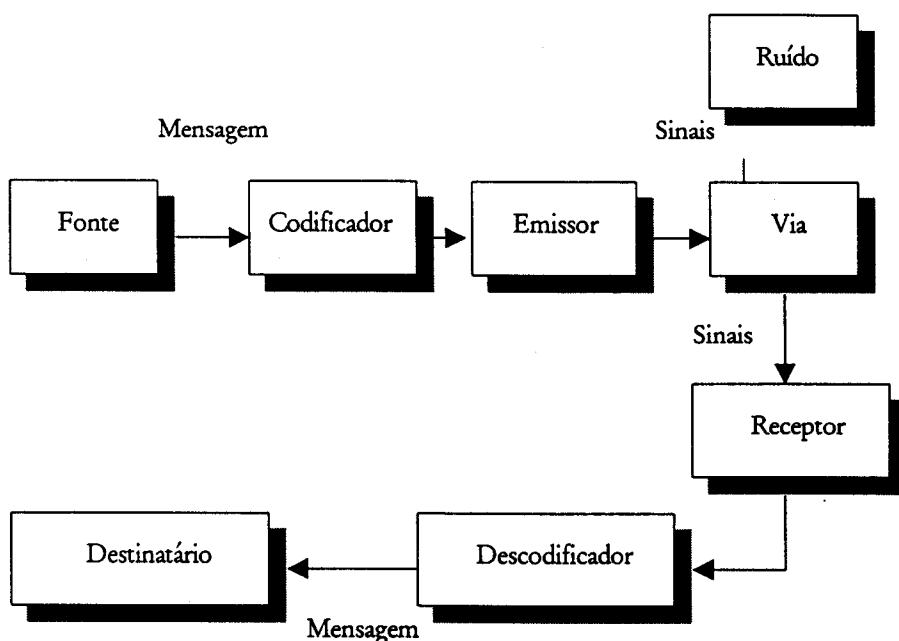


Fig. 4.4. :Esquema Geral de Um Sistema de Comunicação

Os erros de transmissão são produzidos por factores diversos, que intervêm na via, de maneira *aleatória*, e que se denominam factores de ruído. De maneira formal, a transmissão de informação do emissor ao receptor expressa-se da maneira seguinte. A informação é substanciada numa mensagem emitida à "entrada", na via, e constituída por uma série de símbolos. A transmissão será perfeita, evidentemente, se a série dos símbolos recebidos reproduzir exactamente a série de símbolos emitidos. Em geral, não é este o caso e o *problema consiste então em reconstituir* a série de símbolos emitidos, a partir dos símbolos recebidos à saída.

Para tratar este problema quantitativamente, é importante poder medir a *perda de informação* accidental a partir da transmissão. Esta medida utiliza a fórmula de Shannon ligeiramente modificada pela introdução das probabilidades condicionais ou *probabilidades de transição entre os símbolos das mensagens entradas e os símbolos das mensagens de saída* (ATLAN, 1992).

A partir do momento que se admite que um canal tem ruído, todos os problemas de transmissão e de codificação se tornam probabilísticos. Para o efeito, convém distinguir os símbolos enviados [$a_1, a_2, a_3, \dots, a_i, \dots, a_n$] dos símbolos recebidos [$b_1, b_2, b_3, \dots, b_j, \dots, b_p$], que podem ser diferentes, mas que se encontram ligados pela lei das probabilidades.

Quando se intervêm com a noção de entropia, é necessário, em caso de ruído, considerar as diferentes entropias. A entropia da fonte (H_s), pode ser calculada a partir das probabilidades $p(a_i)$. Mas o receptor da mensagem só pode conhecer directamente esta entropia se

medir a entropia observada na recepção (H_b), a partir das probabilidades $p(b)$, calculadas empiricamente.

O cálculo entrópico mais importante é contudo um pouco mais complexo. Utiliza as probabilidades condicionais designadas por $p(a_i|b_j)$ (ditas “probabilidade de a_i sabendo b_j ”) que representa a probabilidade que um sinal a_i tenha sido emitido quando um b_j foi recebido. Supõe-se que estas probabilidades, que correspondem a uma tendência do canal a modificar os símbolos transmitidos de maneira sempre igual (ruído constante), são as características conhecidas dos utilizadores.

O receptor pode também calcular $H(A|b_j)$, isto é a entropia (que é aqui vantajoso imaginar como variável) da fonte quando recebe b_j . Por exemplo, se é um canal sem ruído, a recepção de um b_j corresponde sempre ao envio do mesmo símbolo e $H(A|b_j)$ é nulo. A probabilidade é de 1 para um símbolo e de 0 para todos os outros: não existe qualquer incerteza. Em seguida é possível calcular $H(A|B)$ que representa a média ponderada de todos os $H(A|b_j)$.

O valor $H(A|B)$ tem um grande interesse prático; encontra-se em diversos problemas diferentes e denomina-se *equívoco* do canal. Este nome foi escolhido visto que $H(A|B)$ designa bem a incerteza que decorre sobre o sinal emitido depois de ter sido recebido. Um tal valor não depende senão do canal, não da mensagem transmitida, e a sua formulação matemática exacta é:

$$H(A|B) = - \sum_{ij} [p(a_i, b_j) \cdot \log_2(p(a_i|b_j))] \quad (12)$$

A fórmula do *equívoco* contempla duas características particulares que devem ser observadas:

- $p(a_i|b_j)$, como é indicado mais acima, representa a probabilidade de que um sinal a_i foi emitido quando um b_j foi recebido; trata-se de uma probabilidade condicional.
- $p(a_i|b_j)$, designa por sua parte unicamente a probabilidade conjunta da emissão de a_i e da recepção de um b_j , o que não é uma probabilidade condicional mas a simples probabilidade da coincidência de dois acontecimentos mais ou menos dependentes.

Uma medida menos corrente, é a da incerteza sobre a mensagem recebida do ponto de vista do emissor (isto é a incerteza que a sua mensagem tenha sido fielmente transmitida). Esta medida é a simétrica exacta do *equívoco* e denomina-se por *ambiguidade* sendo a sua fórmula expressa por:

$$H(B|A) = - \sum_{ij} [p(a_i, b_j) \log_2 (p(b_j|a_i))] \quad (13)$$

É importante salientar que *equívoco* e *ambiguidade* representam as únicas medidas precisas de imperfeição do canal. O ruído, nome pelo qual é mais conhecido, não é portanto senão a noção abstracta geral e não quantificada destes fenómenos. Nestas situações, é usual designar $H(A|B)$ como a entropia conjunta dos pares de acontecimentos (a_i, b_j) . Por definição, tem-se então:

$$H(A, B) = - \sum_{ij} [p(a_i, b_j) \log_2 (p(a_i|b_j))] \quad (14)$$

Nesta sequência pode demonstrar-se que:

$$H(A, B) \leq H(A) + H(B) \quad (15)$$

Esta fórmula significa concretamente que a entropia conjunta de A e de B não excede a soma das entropias de A e de B respectivamente. Por outras palavras, a incerteza produzida por A e B considerada como um conjunto, não poderá ser superior à soma da incerteza produzida por A e B, quando considerados independentemente.

É interessante analisar o caso particular onde estas duas quantidades são precisamente iguais. Observa-se então que:

$$H(A, B) = H(A) + H(B) \quad (16)$$

o que implica que A e B são variáveis independentes.

É necessário então que apareça uma nova quantidade, que meça a diferença entre os dois termos da desigualdade. Esta quantidade é denominada transformação de um canal ou informação transmitida por um canal e mede a quantidade de informação efectivamente transmitida por um canal com ruído. Representa-se por $T(A, B)$, isto é a transmissão de informação de A para B

$$T(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B) \quad (17)$$

No caso particular em que as variáveis A e B são independentes, a transmissão de informação é nula (o conhecimento do sinal não permite de modo nenhum conhecer a mensagem emitida; o ruído é tal que impede qualquer comunicação).

Pelo contrário, quanto maior for a ligação entre as variáveis maior é a correspondência entre a mensagem emitida e a mensagem recebida. A transmissão da informação aumenta então, com a dependência das variáveis A e B.

Assim, podem demonstrar-se as igualdades seguintes:

$$H(A,B) = H(A) + H(B|A) \quad (18)$$

$$H(A,B) = H(B) + H(A|B) \quad (19)$$

e

$$T(A,B) = H(A) - H(B|A) \quad (20)$$

Pelos mesmos motivos da situação anterior tem-se:

$$T(A,B) = H(B) - H(A|B) \quad (21)$$

Se a ligação for perfeita entre as variáveis A e B, tanto o equívoco $H(A|B)$ como a ambiguidade $H(B|A)$, são nulas donde:

$$T(A,B) = H(A) = H(B) \quad (22)$$

É o caso de um canal sem ruído em que a transmissão é máxima e igual à entropia da fonte, toda a informação é efectivamente recebida.

4.5. A Entropia Revisitada

Como se analisou, o cálculo da quantidade de informação é possível, quer com mensagens longas ou com simples sinais elementares consi-

derados independentemente uns dos outros. Contudo, desde que se verifique, por um lado, um certo distanciamento em relação a um determinado acontecimento, e, por outro, um interesse por uma lei das probabilidades na sua globalidade, encontra-se o outro conceito essencial da teoria de Shannon: o conceito de entropia.

A entropia é o único conceito da teoria de Shannon de importância comparável ao da quantidade de informação. Trata-se de um conceito que deve a sua origem à física termodinâmica, mas que se reencontra hoje, por via da teoria da informação, justamente inserido em campos científicos muito diversos. A sua erupção no sistema de Shannon é na realidade muito natural. A ideia da quantidade de informação é com efeito uma ideia estática que permite julgar uma situação finalizada, uma produção, um resultado. Face a um acontecimento (uma informação) dada, a fórmula da quantidade de informação propõe uma escala de medida. Mas esta medida não diz como avaliar o potencial informational de uma situação antes do aparecimento do acontecimento.

A noção de entropia foi proposta precisamente para avaliar esse potencial. A sua função é analisar o sistema informacional por inteiro, comparar diferentes fontes, diferentes canais ou diferentes receptores em termos de capacidade de emissão, de transporte ou de recepção de informação.

Seja E um conjunto com os respectivos subconjuntos E_1, E_2, \dots, E_n que formam uma partição de E . A quantidade de informação correspondente ao acontecimento E_i é, conforme a definição dada acima:

$$I(E_i) = \log (N/n_i) \quad (23)$$

Onde n_i designa o cardinal de E_i e N o de E .

O valor matemático da entropia expressa-se pela fórmula seguinte:

$$H = \sum_i \left[\left(\frac{n_i}{N} \right) \cdot \log \left(\frac{N}{n_i} \right) \right] \quad (24)$$

Mais geralmente, se a fórmula utilizada retém as probabilidades mais cedo que os cardinais, pode escrever-se:

$$H = \sum_i \frac{p_i \cdot \log_2 1}{p_i} = - \sum_i p_i \cdot \log_2 p_i \quad (25)$$

em que p_i designa a probabilidade do acontecimento i .

Esta noção pode parecer puramente abstracta na sua formulação matemática, mas comprehende-se facilmente quando aplicada a um caso preciso. Seja por exemplo uma mensagem emitida num alfabeto do tipo morse, que tem apenas traços e pontos. Supondo que o aparecimento de um traço é mais frequente, surgindo cerca de 75% das vezes e que o aparecimento de um ponto é de 25%.

A quantidade de informação ligada ao aparecimento de um traço será:

$$I(\text{traço}) = -\log(0,75) = 0,415 \text{ bit}$$

A quantidade de informação ligada ao aparecimento de um ponto será:

$$I(\text{ponto}) = -\log(0,25) = 2 \text{ bits}$$

Sintetize-se os resultados sob a forma dum quadro (Quadro n.º 4.1.):

Quadro n.º4.1.: Probabilidades e quantidades de informação para aparecimento de um traço ou de um ponto

	Traço	Ponto
Probabilidade de ocorrência	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{4}$
Quantidade de informação antes da ocorrência	0,415 bit	2 bits

Verifica-se de imediato três aspectos:

- o aparecimento de um ponto pesa mais, em termos de produção de informação, que o aparecimento de um traço. Trata-se com efeito de um acontecimento mais raro, mais improvável, então de um certo modo, mais valioso.
- por definição o acontecimento mais frequente é sempre o menos informativo.
- o aparecimento de um traço vale menos de uma unidade de informação (1 bit), porque há mais de uma hipótese sobre duas de acontecer (porque é a probabilidade de 0,5 que marca a equivalência a 1 bit). Paralelamente, o aparecimento de um ponto transporta uma informação superior a 1 bit (probabilidade de aparecimento inferior a 0,5).

Até aqui, a única fórmula utilizada foi a da quantidade de informação. Por relação a esta fórmula estatística, a entropia adopta uma outra análise, a da lei da probabilidade por inteiro. Sabe-se com efeito que, se se repete a experiência um grande número de vezes, o acontecimento “traço” aparecerá com uma probabilidade de $\frac{3}{4}$ e o acontecimento “ponto” com uma probabilidade de $\frac{1}{4}$.

Pode-se então considerar que, três vezes em quatro assistir-se-á a um acontecimento portador de 0,415 bit de informação e que uma

vez em quatro a um acontecimento portador de 2 bits de informação. O acontecimento será então em média portador de uma informação assinalada por H de:

$$H = (\frac{3}{4}) \cdot 0,415 + (\frac{1}{4}) \cdot 2 = 0,811 \text{ bit}$$

é precisamente esta informação média que é definida como a entropia da lei de probabilidade.

Para dar um sentido um pouco mais intuitivo a esta noção, pode-se também explicar a entropia como a propensão de uma fonte ou de um canal a emitir ou veicular uma certa quantidade de informação.

4.6. Síntese do Capítulo

4. A MEDIDA DA INFORMAÇÃO

- 4.1. Um Pouco de História
- 4.2. Definição da Quantidade de Informação: Fórmula de Shannon
 - 4.2.1. Quantidade de informação de uma mensagem
 - 4.2.2. Alfabeto de 2 símbolos: definição de unidade bit
 - 4.2.3. Informação de Shannon: significado e limitações
- 4.3. Codificação - Teorema da via sem ruído
- 4.4. Transmissão de Informação numa Via com Ruído
- 4.5. A Entropia Revisitada

As organizações criadas pelo homem encontram-se em conflito permanente, numa luta pela primazia, pela sobrevivência. O importante é compreender o que determina que essas organizações ou estruturas, se mantenham longe do equilíbrio termodinâmico estático; o que por outro lado, induz nessas estruturas, desregulação, perda de coesão e ... a sua substituição, na dinâmica do conflito.

A informação constitui, como se viu em capítulo anterior, o factor determinante quer na manutenção dos equilíbrios dinâmicos em sistemas abertos, quer, se em excesso, na sua desregulação.

A medida da informação constitui, a partir do início do século XX, uma preocupação maior, em particular por parte das entidades que tinham, por missão, assegurar o seu transporte. Depois de Hartley ter proposto a primeira fórmula em que surge uma medida matemática da quantidade de informação, relacionando-a com o número de sinais da mensagem e o número de sinais do alfabeto, coube a Shannon formular a Teoria da Informação. A Teoria da In-

formação esquematiza o processo de comunicação considerando uma entidade emissora, um canal de transmissão e uma entidade receptora. A mensagem emitida deverá dar entrada no canal, codificada de acordo com um alfabeto de sinais e símbolos e, posteriormente, deverá sofrer um processo de descodificação à saída do canal. Shannon calcula a quantidade de informação que circula no canal, relativa a uma determinada mensagem em função da probabilidade de ocorrência de cada um dos símbolos e do número de símbolos intervenientes.

Por razões técnicas, as máquinas de tratamento de informação são mais facilmente adaptáveis a um alfabeto apenas com dois símbolos. É, com efeito, na base de um alfabeto binário que funcionam os computadores actuais e o valor da quantidade de informação desse alfabeto, que serve de unidade de medida, é denominado bit.

Da função de Shannon resulta que a informação é uma quantidade abstracta, mensurável, cujo valor não depende do conteúdo que carreia, mas da probabilidade associada à ocorrência de um acontecimento: a informação associada a um evento é tanto maior quanto menor for a sua probabilidade de ocorrência.

Esta definição de informação revela-se extremamente útil e prática no contexto das telecomunicações. Contudo, ela encerra uma limitação, no que respeita à medida da quantidade de informação em organizações complexas. Com efeito, a informação, como grandeza absoluta, possui o mesmo valor numérico para qualquer observa-

dor. Pelo contrário, o seu valor humano é uma grandeza relativa que terá valores diferentes segundo o observador que a analisar e utilizar posteriormente.

A teoria de Shannon encerra, para além do conceito de informação e da sua medida, o conceito de “entropia de mensagem”.

A entropia num canal de comunicação advém do facto de ocorrerem, na prática, erros de transmissão que determinam que a mensagem recebida difira da mensagem enviada. Diz-se então que a via tem ruídos e as consequências a nível da mensagem designam-se por equívocos e por ambiguidades.

A noção de entropia de mensagem foi proposta por Shannon para avaliar o potencial informacional de uma situação antes da realização do acontecimento, ou dito de outro modo, será a propensão de uma fonte ou de um canal a emitir ou veicular uma certa quantidade de informação.

5. INFORMAÇÃO, TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO

A informação consiste num conjunto de dados, colocados num contexto útil e de grande significado, que são comunicados a um receptor que os usa para tomar decisões. A informação envolve a recepção e comunicação de inteligência e conhecimento humano (REIS, 1993).

O conhecimento não é, contudo, sinónimo de harmonia, pois que comporta diferentes níveis que podem combater-se e contradizer-se a si mesmos. Conhecimento contempla necessariamente informação, ou seja, possibilidade de responder a incertezas. Mas o conhecimento não se reduz a informações, necessita de estruturas teóricas que validem a informação. Excesso de informação pode conduzir a estrangulamentos no processo de decisão, por insuficiência de estruturas mentais capazes de absorver e assimilar toda a informação. “*Existindo cada vez mais a consciência de que na sociedade em que vivemos e nas organizações em que trabalhamos, informação é poder, e decidir sobre informação é a mais potente forma de exercício desse poder, a implantação das práticas sistemáticas de gestão da informação nas organizações despoleta jogos de poder, tanto maiores quanto mais ambicioso for o plano de intervenção*” (ZORRINHO, 1995).

Frequentemente tem-se oposto a concepção do mundo do homem de sociedade do século XVII à do homem moderno: o homem de sociedade do século XVII tinha um aprovisionamento de informações limitado sobre si próprio, a vida e o mundo, o que lhe permitia articular o manancial de informação disponível com as teorias teológicas, racionalistas, cépticas: tinha tempo para reler, meditar e reflectir. O homem de sociedade do século XX, particularmente na segunda metade deste século, ou aquele que quereria ser “um homem de sociedade” depara com um tal conjunto de informações que não pode conhecer nem sequer controlar; as suas possibilidades de articulação são fragmentárias, ou seja, dependem de competências especializadas. Além disso, as suas possibilidades de reflexão são limitadas pela escassez de tempo. *Portanto, vemos bem que se levanta um problema: demasiadas informações obscurecem o conhecimento. Mas há outro problema: demasiada teoria também obscurece* (MORIN, 1994).

Na noite de 2 para 3 de Dezembro de 1552, Francisco Xavier, missionário morre em Malaca, face à China com que tanto sonhou. Seis meses mais tarde, o seu amigo e superior, Inácio de Loyola, escreve-lhe para que regresse à Europa. Seria preciso esperar até ao Outono de 1555 para que a morte de Francisco Xavier fosse conhecida em Roma (WOODROW, 1996). Hoje, quatro séculos decorridos após a morte de Francisco Xavier, a informação circula à velocidade da luz. Sem sair de casa o homem, instalado numa poltrona, assiste em directo à chacina de um povo com a mesma serenidade e apatia com que vê um desfilar de imagens de um casamento real, ou a tomada de posse de um novo governo. Tranquilamente, liga o computador e emana ordens de realização de transacções financeiras, no lado oposto do globo, encomenda o filme mais premiado com Oscars, nesse ano, e uma ementa de comida chinesa para o jantar; por fim, prepara os diapositivos que irá transmitir na videoconferência para que foi convidado a participar no dia seguinte.

Para todas estas situações apenas necessitou de premir teclas de um telemando ou de um computador.

O *media* electrónico revolucionou completamente as noções de tempo e de espaço; a rádio, a televisão, o satélite e a informática, realizaram o “milagre” de abolir a distância. A televisão aperfeiçoou a técnica que permite ir buscar uma imagem a qualquer parte do mundo e de a trazer à velocidade da luz, para qualquer outro ponto do globo. Assiste-se por outro lado, ao casamento da televisão com o computador, o qual permite a compressão de imagens físicas, o armazenamento e a modificação antes de as transmitir. Por outro lado, esta rapidez permitiu e desenvolveu a criação primeiro e, depois, o acesso à distância, a bancos de imagens e, por exemplo, o aperfeiçoamento das ilustrações de um livro antes da sua impressão. O apuramento desta técnica foi aplicado à imagem animada, a filmes e outros produtos vídeo veiculados em suportes informáticos e visionados nos ecrãs dos computadores pessoais.

Segundo Woodrow (1991) as crianças passam cerca de novecentas horas por ano nas aulas e mil e duzentas frente a um televisor! Daqui pode aferir-se a importância desta revolução da informação pela imagem no que respeita ao devir intelectual de um país¹³. Ainda segundo este autor, os inquéritos sociolinguísticos revelam que a televisão fornece uma parte cada vez mais importante dos recursos linguísticos dos jovens. É a partir de exemplos televisivos que formam a estrutura dos seus discursos, o seu vocabulário e a própria sintaxe. Com efeito, a televisão desempenha um papel fundamental no domínio da informação. A instantaneidade não pode ser tratada como um artigo de jornal, porque ela é espetacular e imediata, atraente ou repugnante, mas sem nuances. Por isso deve ser “vestida”, “montada”, encenada, promovida a espetáculo (WOODROW, 1996).

5.1. O Conhecimento da Tecnologia

Do ponto de vista da teoria do conhecimento, é impossível isolar a noção de tecnologia, porque se sabe que existe uma relação que vai da ciência à técnica, da técnica à indústria, da indústria à sociedade e, de novo, da sociedade à ciência. Trata-se com efeito de um circuito, em que cada termo retroactua sobre o precedente, isto é, a indústria retroactua sobre a técnica e orienta-a e a técnica retroactua sobre a ciência e orienta-a. Portanto, um primeiro problema que se coloca é o de evitar isolar o termo tecnologia. Ora, para não isolar o termo tecnologia, este deve estar ligado a um macroconceito que reagrupa em constelação outros conceitos interdependentes. O conceito tecnologia não pode portanto ser dissociado da ciência e da indústria e, no fundo, trata-se, globalmente, de um conceito circular, porque uma das maiores características da civilização ocidental é de que é neste circuito que a sociedade evolui e se transforma. Assim, associado ao desenvolvimento da humanidade, aparece sempre o desenvolvimento tecnológico. Mas este desenvolvimento da técnica não provoca somente processos de emancipação: potencia também novos processos de manipulação do homem pelo homem, ou dos homens, pelas entidades sociais.

Com a tecnologia emergiram novos modos subtils de manipulação, através dos quais a acção exercida sobre as coisas materiais, acarreta também a subjugação do próprio homem pela técnica de manipulação. Assim, fazem-se máquinas ao serviço do homem e põem-se homens ao serviço das máquinas. Deste modo, e citando Helder Coelho (1986): pode desi-

¹³ Isto no que respeita aos países ditos desenvolvidos.

gnar-se tecnologia como a capacidade de solucionar os problemas e de responder às necessidades. A tecnologia é, assim, a “*ciência da técnica*”, o discurso sobre a técnica, isto é, o estudo dos processos técnicos no que eles têm de geral e nas suas relações com o desenvolvimento das civilizações (COELHO, 1986)

A outro nível, Morin (1982) vê: “*a infiltração da técnica na epistemologia da nossa sociedade e da nossa civilização, no sentido em que é a lógica das máquinas artificiais que se aplica cada vez mais às nossas vidas e à nossa sociedade. É justamente aqui que reside a origem de uma nova manipulação. Por outras palavras, não aplicamos só os esquemas tecnológicos ao trabalho manual, ou mesmo à máquina artificial, mas também às nossas próprias concepções da sociedade, da vida e do homem. Aqui, penso que o aparecimento da cibernetica e da teoria da informação tem uma importância capital. Temos de falar da cibernetica como de todo o grande sistema de pensamento; apresenta-se em duas vertentes: há a vertente onde existe uma mensagem nova, uma complexidade nova que nos levam a modificar e a enriquecer o nosso olhar; há a vertente da redução de qualquer outro aspecto do real a favor do elemento novo que deixa de ser complexo porque reduz tudo a si*” (MORIN, 1994).

Na sua vertente fecunda, a cibernetica restaurou a ideia de totalidade, não no sentido global, difuso, vago ou imperialista, mas no sentido de organização de um todo que não se reduz à soma das suas partes; enriqueceu a causalidade com as ideias de retroacção negativa e positiva. Mas por outro lado, reduziu tudo o que é social, humano, biológico, à lógica unidimensional das máquinas artificiais, ou seja uma lógica que não integra nem tolera a desordem. Mas não há ordem sem desordem porque esta, se por um lado representa destruição, por outro representa liberdade e criatividade e, portanto, evolução. O que é impressionante na mais ínfima matéria viva é que é capaz de se auto-reproduzir, de se autoproduzir e de se

auto-reparar à medida que as moléculas que a constituem se degradam, enquanto que as máquinas artificiais não têm generatividade, isto é, não podem regenerar-se nem reproduzir-se por si próprias (MORIN, 1994).

A grande diferença entre a máquina artificial e as *máquinas vivas*, é que a primeira aplica um programa, ele próprio, fruto do desenvolvimento humano, enquanto as segundas autoproduziram o seu próprio programa e elaboram e modificam estratégias de acordo com o meio envolvente em que se inserem.

A sobrevivência das sociedades comporta uma grande parte de desordem e de acaso. Tudo se passa como se a sociedade se baseasse numa espécie de simbiose de duas fontes absolutamente diferentes. Uma, é a inclusão numa comunidade onde todos os membros se sentem absolutamente solidários em relação às agressões exteriores. Mas por outro, no interior desta comunidade assistem-se a jogos de conflitos e rivalidades. Pode então considerar-se que a sociedade se encontra bipolarizada: num pólo está o conflito e a concorrência; no pólo oposto a comunidade. A partir desta bipolarização, as sociedades reorganizam-se e produzem-se incessantemente (MORIN, 1994).

5.2. O Desafio Empresarial das Tecnologias de Informação e de Comunicação

A inovação tecnológica, baseada na informação, consiste na criação de um novo tipo de ferramenta cujo valor acrescentado em relação às anteriores máquinas ferramentas, é a inteligência. As novas ferramentas definem por si próprias um novo contexto, quer a nível industrial, quer a nível dos serviços e por sua vez esboçam as fronteiras do

sector da informação (ou sector quaternário) que penetra profundamente nos outros sectores (COELHO, 1986).

Com efeito, a utilização das tecnologias de informação e de comunicação¹⁴ mudaram radicalmente a maneira de negociar em qualquer parte do globo. Não há sector de actividade, desde a banca e a transacção de títulos de crédito, passando pelo sector da indústria transformadora e do *design* que possa sobreviver sem o domínio das TIC's.

A dinâmica actual de uma economia caracterizada pela globalização, destruiu os conceitos tradicionais de tempo, geografia, concorrência e vantagem estratégica. Os empresários deparam-se com o reconhecimento de que uma economia global exige novas estruturas, novos estilos de gestão e novas abordagens de inovação. A globalização está em plena actividade na movimentação mundial de capitais e nos desenvolvimentos de tecnologias e de mercados e talvez não haja outro sector de actividade onde a transformação criada pela globalização tenha sido tão grande, como a que os serviços financeiros sofreram. Recorrendo à tecnologia informática, um responsável financeiro num determinado ponto do globo, pode inteirar-se dos fluxos de pagamentos e recebimentos de filiais espalhadas por todo o planeta e acompanhar a evolução de carteiras de investimento e de opções sobre divisas. A convergência da concorrência global, dos produtos personalizados e de tecnologias acessíveis, redefiniu as práticas de gestão de um dos recursos mais valiosos : o dinheiro (DANIELS, 1997).

Gerir as TIC's implica compreender as consequências do aumento da esfera de actividade da empresa no mercado global, produzir na área

¹⁴ Adiante designadas apenas por TIC

mais vantajosa e distribuir com eficiência. Todos estes processos dependem, em grande medida, da gestão bem sucedida das TIC's e da integração nos objectivos e práticas da empresa (DANIELS, 1997). No entanto, o incremento da utilização das TIC's trouxe acréscimos de custos consideráveis para as empresas pela criação ou multiplicação de centros informáticos e de Departamentos de Sistemas de Informação. “Estes departamentos estão preocupados não só com as TI, mas também com a gestão da informação enquanto recurso escasso, dispendioso e estratégico. É importante equacionar os problemas resultantes da abundância de dados que terão que ser tratados, armazenados e transmitidos ou colocados à disposição dos potenciais interessados no interior da organização” (SERRANO, 1997).

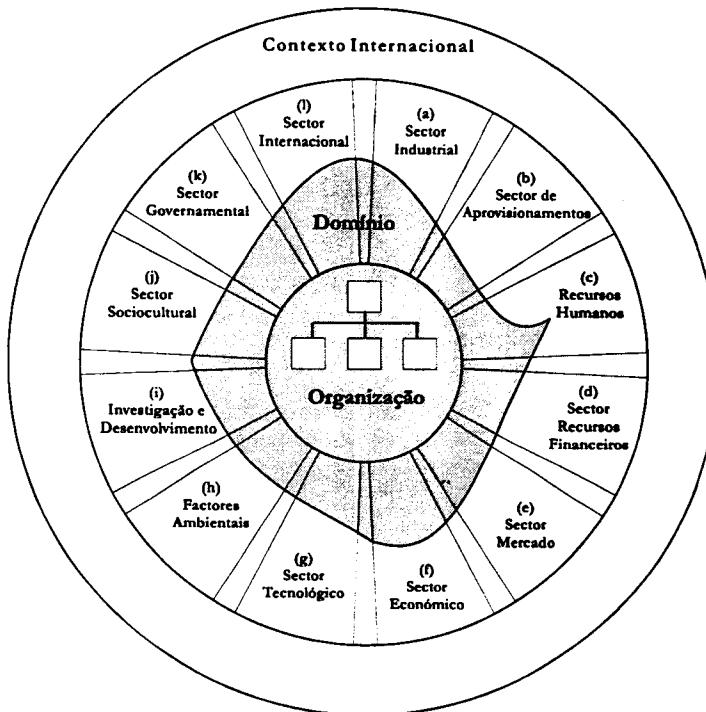
“A disponibilidade de informação fiável e oportunamente sobre as diversas variáveis significativas do negócio tende a construir um factor crítico de sucesso em todas as actividades que, pela sua natureza, estão expostas à turbulência dos mercados e à consequente agressividade concorrencial.

Como factor crítico de sucesso, a gestão da informação assume um papel estratégico fundamental no domínio do conhecimento dos mercados, da eficiência da resposta às suas necessidades e da eficiência de divulgação de eventuais capacidades diferenciadas.

Este papel da informação como instrumento estratégico explica a relação directa e interactiva entre a velocidade da evolução das tecnologias e da informação e a velocidade de mudança e de acréscimo da complexidade dos cenários onde se exerce a actividade económica” (ZORRINHO, 1991).

Quem pretender entrar no comércio internacional, ou simplesmente manter-se no mercado (neste último caso podem exceptuar-se as micro ou pequenas empresas artesanais) terá de dispor de sistemas de comunicação internacionais. O intercâmbio electrónico de dados (EDI - Electronic Data Interchange) é uma necessidade. Boas comunicações glo-

bais são fundamentais para o êxito do negócio, tanto no que respeita à engenharia, à concepção e desenvolvimento de novos produtos e à selecção de mercados, quer ainda quanto a potenciais clientes ou no tocante a fornecedores e tantos outros domínios (fig. 5.1.).



Fonte: Adaptado de Daft, 1998

Fig. 5.1. : Ambiente Organizacional

Na realidade, a tecnologia tem vindo a tornar quase irrelevantes as barreiras impostas pela distância. Como argumenta Penzias (1992), hoje as barreiras físicas são, de longe, muito menos significativas que as barreiras lógicas que separam as fontes dos utilizadores de dados. Para demonstrar esta ideia, analisa a situação de um hipermercado onde a tecnologia utilizada está habilitada a fornecer ao gerente

da cadeia das diferentes sucursais um relatório completo e instantâneo das vendas da empresa, artigo por artigo, a partir dos dados coligidos pelos leitores ópticos dos códigos de barras com que a maioria das caixas registadoras estão equipadas. Todavia, recolher e transmitir as listas de registo de compras de milhares de caixas em todo o país representa um desafio muito menor do que o de converter esses dados em informação com base na qual alguém possa tomar decisões. À medida que computadores e *software* se tornam mais poderosos e acessíveis, cada nova entidade de processamento de dados, nos diversos pontos de venda, vai-se transformando em fonte e utilizadora potencial de informação. As caixas registadoras computerizadas através de ligações electrónicas, permitem aos gestores fazer uma gestão *on line*, através da evolução das vendas e ajustamentos de preços, com vantagens para a empresa e para os próprios clientes. No entanto, tal somatório de pequenos contributos interdependentes complica significativamente a vida dos responsáveis pelo bom funcionamento conjunto da empresa como um todo. Para poderem tomar decisões sensatas acerca de tabelamentos de preços, publicidade, localização e reserva de recursos, os gestores têm de possuir um maior conhecimento da crescente complexidade das respectivas funções e atribuições profissionais.

Para tirarem vantagem da informação criada com diferentes propósitos e em diferentes condições, os utilizadores necessitam de interfaces, convenientemente adequadas aos sistemas que fornecem os dados. Por último, o conjunto dos meios tecnológicos envolvidos na aquisição dessas interfaces deverá ser suficientemente flexível para aceitar informação expressa em qualquer formato proporcionado pela

fonte e suficientemente poderoso para comunicar a informação num formato acessível à compreensão do utilizador (PENZIAS, 1992).

5.3. A Evolução dos Sistemas de Informação nas Organizações

Segundo Rivas (1989) a expressão *sistemas de informação* está na moda desde há alguns anos e cada vez com maior intensidade. A sua crescente utilização reflecte a importância que a informação adquiriu no mercado actual. Assim, quando perante uma empresa, qualquer que seja o seu tipo, se obtêm informações que relacionam umas decisões com as outras, surge a organização sob a aparência de um Sistema de Informação. *Um Sistema de Informação não é então algo que umas empresas têm e outras não; é uma forma de entender qualquer empresa* (RIVAS, 1989). Esta forma de compreender as empresas é sintetizada por Rivas (1989), do seguinte modo:

1. as relações de autoridade entre as funções de uma empresa representam-se sob a forma de organograma; esta prática encontra-se fortemente enraizada na cultura da empresa e conduz a, normalmente, agrupar o recurso informação em “sistemas de informação” tão estanques entre si como se encontram distanciadas as correspondentes actividades – por razões geográficas, hierárquicas ou inclusivamente pessoais;
2. por outro lado, a estrutura de um organograma difere substancialmente da representação da relações de informação existentes entre os diversos processos de tomada de decisão, onde a complexidade apresenta níveis consideravelmente elevados; e,
3. a tradição instalada e as dificuldades acrescidas incitam a continuidade de análise de necessidades, em termos de informação, numa

perspectiva departamental e não global, como seria desejável mas só possível com uma mudança de mentalidades (RIVAS, 1989).

5.3.1. As organizações empresariais

Um dos fenómenos mais característicos a que a Humanidade tem assistido desde a Revolução Industrial é o formidável aumento – em número, dimensão e complexidade – de todos os tipos de organizações empresariais. É costume associar-se a origem desta evolução com a descoberta da máquina a vapor, a qual esteve na origem do grande desenvolvimento industrial e, indissociavelmente, das sucessivas ideologias que proporcionaram a aventura humana até aos nossos dias. Segundo Rivas (1989), os estudiosos convergem no ponto de considerarem, na origem do conceito moderno de empresa como uma forma concreta de organização humana, o papel da reforma protestante, o espírito de concorrência e *laissez faire* personalizados por Adam Smith, o darwinismo social, o pensamento de Marx, o nascimento dos movimentos sindicais, etc. (RIVAS, 1989).

5.3.1.1. Precursors da administração científica

Talvez os primeiros a utilizarem uma perspectiva científica aplicada à administração tenham sido, nos finais do século XVIII, James Watt, Jr. e Mathew Robinson Boulton, filhos dos pioneiros que inventaram e desenvolveram o motor a vapor. Watt prestou particular atenção à organização e administração, enquanto que Boulton dava especial atenção às vendas, isto é, às actividades comerciais.

No início do século XIX , Robert Owen, foi um dos principais pioneiros da administração. Durante o período entre 1800 e 1828, Owen realizou o que foi considerada uma experiência sem precedentes no grupo de fábricas de tecidos que administrava na Escócia, tendo ficado conhecido como o “pai da moderna administração de pessoal”. Nos primeiros anos da Revolução Industrial, quando os trabalhadores não eram considerados como mais do que simples instrumentos inertes, Owen melhorou as condições de trabalho na fábrica, elevou a idade mínima de trabalho infantil, reduziu o número de horas de trabalho, proporcionou refeições nas fábricas, abriu lojas para venda de artigos de primeira necessidade, a preço de custo e procurou melhorar toda a comunidade em que os seus empregados viviam, construindo casas e abrindo ruas, e melhorando a aparência visual da comunidade e da fábrica. A sua filosofia assentava em: “*muitos de vocês já puderam sentir, nas operações fabris, as vantagens de máquinas bem projectadas e bem construídas. Sendo assim, se uma atenção, cuidada, ao estado de máquinas inanimadas pode produzir resultados benéficos, o que não se pode esperar de igual atenção às suas máquinas vivas, que são construídas de uma maneira ainda mais maravilhosa?*” (citado em KOONTZ et al (1986)).

Na segunda metade do século XIX, aparece um dos percursores mais importantes de Taylor, Henry Varnum Poor, editor do “American Railroad Journal”. As recomendações de Poor parecem extremamente modernas. Poor achava necessário um “sistema” de administração, com uma clara estrutura organizacional em que as pessoas eram responsáveis e podiam ser completamente responsabilizadas – uma estrutura com um adequado sistema de comunicação em toda a organização, para que a alta administração pudesse saber o que estava

ocorrendo – e a necessidade de um conjunto de relatórios de operações sumariando custos, receitas e índices. Entretanto, ele reconheceu o perigo que tal sistematização pudesse fazer com que as pessoas se sentissem como engrenagens numa máquina, e a sua solução foi recomendar uma espécie de liderança, partindo do topo de uma empresa, que eliminaria a rotina e o tédio por meio de um sentimento de unidade, valorização do trabalho e espírito de grupo em toda a organização. “*Muito antes de Frederick Taylor, ele recomendou um sistema; muito antes de Elton Mayo, ele pediu o reconhecimento do factor humano; e muito antes de Chris Argyris, ele clamou por uma liderança que removesse a rigidez da organização formal*” (KOONTZ et al, 1986).

5.3.1.2. Abordagem clássica da administração

As abordagens clássicas foram fundamentalmente um contributo histórico baseado em análises e estudos sobre a racionalidade do comportamento humano nas organizações. Elas emergem num contexto perpassado pela arbitrariedade dos métodos de gestão, do empirismo e da discretionaryade do exercício da autoridade no domínio da execução de tarefas e funções que eram relevantes para as empresas da sociedade capitalista dos finais do século XIX e princípios do século XX.

As suas análises e estudos empíricos centravam-se em aspectos racionais, técnicos e económicos do comportamento das organizações. Embora subsistam diferenças entre os autores clássicos, para Taylor e Fayol, as organizações deveriam ser um espaço

de estandardização, de hierarquização e de especialização na execução das tarefas.

A grande preocupação de Taylor, consistiu na realização de um estudo científico do trabalho, com particular incidência no estudo de movimentos, pausas, gestos e tempos necessários para a execução de tarefas. Com base nesse estudo, eram então seleccionado cada trabalhador. Ou seja: o homem certo no lugar certo. Taylor defendia o princípio da dissociação entre concepção e execução de tarefas. Aos gestores competia exclusivamente a preparação, o planeamento e o controlo de todo o processo produtivo. Aos operários competia exclusivamente a execução das tarefas. Taylor tinha uma visão fortemente economicista e newtoniana da sociedade, ou seja, o ser humano não era mais do que uma entidade que se realizava em função de um trabalho de características racionais e técnicas, com incidência nas suas capacidades psicofisiológicas. A especialização e a estandardização da execução de tarefas permitiam que os operários maximizassem as suas capacidades produtivas e, logicamente, estivessem motivados para receber o máximo de contrapartidas salariais para satisfazerem as suas necessidades básicas.

Segundo Rivas (1989), Taylor orientou o seu pensamento em face da falta de eficácia que observou nas oficinas que estudou. Além disso, manteve sempre um espírito crítico perante a falta de fundamentos e de princípios que os empresários dessa época faziam gala. Algumas contribuições da escola tayloriana, embora ultrapassadas, são hoje ainda vigentes. No que respeita à teoria da informação no papel da tomada de decisão, os contributos de Taylor

e dos seus seguidores são praticamente nulos, tendo-se limitado a salientar os fluxos verticais de comunicação – da administração até aos trabalhadores – como veículo de instruções e normas (RIVAS, 1989).

Fayol concebia a empresa por semelhança com um organismo vivo, com as suas estruturas e funções, o que, de algum modo, associava então uma certa perspectiva sistémica. Nesta perspectiva, na estrutura administrativa assentava a base de governação, de controlo e de coordenação de toda a cadeia hierárquica da autoridade formal, das estratégias, objectivos, funções e tarefas da empresa. A administração tinha um lugar privilegiado no conjunto das seis funções: comercial, financeira, administrativa, contabilidade, segurança e produção. Fayol estabeleceu 14 princípios de administração (centralização, linha e *staff*, etc.) e cinco elementos: previsão, organização, mando, coordenação e controlo. Esta descrição sumária da obra de Fayol permite apreciar a essência da sua escola: distribuição departamental do conjunto de tarefas a realizar. Esta perspectiva revela-se muito mais estrutural que a de Taylor com ele compartilhando, apenas, o esquecimento do ser humano como alguém que toma decisões baseado em informação (RIVAS, 1989).

5.3.1.3. O aparecimento das ciências comportamentais

Praticamente no mesmo período em que Taylor e Fayol, entre outros, concentravam a sua atenção na administração científica, outros reflectiam e escreviam sobre psicologia industrial e te-

oria social. “*Considerar o homem como mera engrenagem dos processos produtivos e motivados unicamente por incentivos económicos revelou-se uma simplificação demasiado grosseira da sociedade*” (RIVAS, 1989) Entre os estudiosos neste campo, destaca-se o trabalho realizado por Hugo Münsterberg, considerado o “pai da psicologia industrial”. Münsterberg, deixou claro que os seus objectivos eram descobrir: (i) como encontrar pessoas cujas qualidades mentais melhor se adaptam ao trabalho que devem realizar; (ii) em que condição máxima pode ser obtida a produção máxima e mais satisfatória do trabalho de cada pessoa; e, (iii) como uma empresa pode influenciar os seus trabalhadores de modo a obter deles os melhores resultados possíveis. A obra de Münsterberg foi complementada pelo pensamento pioneiro de Lillian Gilbreth, que procurou aplicar os conceitos psicológicos iniciais à prática de administração científica no seu livro “Psychology of Management”, publicado em 1914 (KOONTZ et al, 1986).

No campo das ciências comportamentais e muito no seguimento da obra de Taylor e Fayol, quatro nomes, no âmbito do pensamento e pesquisa social, surgem ligados à teoria da organização. São eles Max Weber, Émile Durkheim, Vilfredo Pareto e Elton Mayo (KOONTZ et al, 1986).

Weber, cujas análises empíricas da Igreja, de governos, de forças armadas e empresas o levaram à crença de uma racionalidade comportamental prescrita por regras, regulamentos e uma autoridade formal. Segundo esta nova abordagem da gestão, de conceção estruturalista, a acção social que melhor se enquadaria na eficiência das organizações capitalistas, seria a desenvolvida de

uma forma racional relativamente a determinados fins e valores específicos. A racionalidade dessa acção social, deduzida da identidade entre os meios e os fins das empresas, permitiria uma padronização conducente à maximização da rendibilidade e eficiência. Assim, Weber concebe três tipos de dominação e autoridade: tradicional, racional e carismática. A autoridade racional de características burocráticas assumia uma função de primeiro plano no contexto da sociedade capitalista moderna. As organizações atingiam o máximo de eficiência com a adopção de uma administração do tipo burocrático, porque através da racionalidade comportamental assente na lei, regras e regulamentos, disciplinam-se e prescrevem-se normativamente os membros das organizações, constrangendo-os a descodificar e codificar as linguagens organizacionais de forma rotineira e padronizada. A aplicação do pensamento sociológico de Weber, às empresas, evidenciou as acentuadas diferenças entre estruturas formais e informais (KAST et al., 1985).

Para Émile Durkheim a tónica era colocada na noção de grupo. Os grupos através dos seus valores e normas, controlam a conduta humana em qualquer organização social. Por sua vez, Pareto (1968) considerava a sociedade como um aglomerado intrincado de unidades ou elementos interdependentes, ou seja, como um sistema social com muitos sub-sistemas. De entre as suas muitas ideias destaca-se a tendência de sistemas sociais para encontrar uma posição de equilíbrio, após serem perturbados por influências endógenas ou exógenas. Defendia a tese de que a “classe dominante” tinha como tarefa, em qualquer sociedade, proporcionar a liderança para manter o sistema social.

Mayo e os seus colegas desenvolveram estudos baseados em experiências realizadas numa fábrica em Hawthorne, de 1927 a 1932. Nestes estudos verificaram que os aumentos de produtividade eram devidos a factores sociais tais como moral, inter-relacionamentos satisfatórios entre membros de um grupo de trabalho e administração eficaz. Uma espécie de administração que entenderia o comportamento humano, em especial o comportamento em grupo, e o ajudaria através de habilidades interpessoais tais como motivação, aconselhamento, liderança e comunicação. Este fenómeno recebeu o nome de “efeito de Hawthorne”. O que este estudo realçaram foi a natureza social do ser humano, ou seja, que as operações das empresas não envolvem apenas máquinas e métodos, mas também a conjugação desses elementos com o sistema social no desenvolvimento de um sistema sociotécnico completo (KAST et al, 1985).

5.3.1.4. Teoria de sistemas

A primeira abordagem sistémica no campo da administração, ocorre em 1937, na obra intitulada “the Functions of Executive”, escrita por Chester I. Barnard¹⁵. Nesta análise Barnard, atribui aos executivos (termo pelo qual designou todos os tipos de administradores) a tarefa de manutenção de um sistema de esforço cooperativo numa organização formal. A lógica da sua análise baseia-se nos seguintes pontos:

¹⁵ Obra citada em “Administração – Fundamentos da Teoria Científica”

1. as limitações físicas e biológicas dos indivíduos leva-os a cooperar e a trabalhar em grupo; a partir do momento em que começam a cooperar intervêm as limitações psicológicas e sociais, que passam também a desempenhar um certo papel na promoção da cooperação;
2. o acto de cooperar leva ao estabelecimento de sistemas cooperativos em que estão presentes factores ou elementos físicos, biológicos, pessoais e sociais; a continuação da atitude de cooperação depende da eficiência com que é desempenhada;
3. qualquer sistema cooperativo pode ser dividido em duas partes: *organização*, que inclui somente as interacções das pessoas no sistema, e *outros elementos*;
4. as organizações podem, por sua vez, ser classificadas em duas categorias: a organização formal, que é o conjunto das interacções sociais conscientemente coordenadas e que têm uma finalidade deliberada e conjunta; e a organização informal, interacções sociais sem uma finalidade comum ou conjunta conscientemente deliberada;
5. a organização formal não pode existir a menos que haja pessoas que: (i) sejam capazes de comunicar entre si; (ii) estejam dispostas a contribuir para a acção do grupo; e, (iii) tenham um propósito consciente comum;
6. toda a organização formal deve conter os seguintes elementos: (i) um sistema de competências funcionais; (ii) um sistema de incentivos eficazes e eficientes; (iii) um sistema de poder que leve os membros do grupo a aceitarem as decisões dos executivos; e, (iv) um sistema lógico de tomada de decisões;

7. as funções do executivo nesta organização formal são as seguintes: (i) a manutenção de comunicação dentro da organização, adicionado a pessoas leais, responsáveis e capazes e uma organização informal compatível de executivos; (ii) manutenção de serviços essenciais dentro dos membros da organização; e, (iii) formulação e definição de objectivos, isto é planeamento;
8. as funções executivas participam do processo através do trabalho de integração do todo pelo executivo e na obtenção do melhor equilíbrio entre forças e acontecimentos conflitantes; e,
9. para que um executivo seja eficaz, é preciso um alto grau de liderança responsável, ou seja, o processo criativo é cooperativo, não liderança; mas a liderança é o impulsor indispensável de suas forças (KOONTZ et al, 1986).

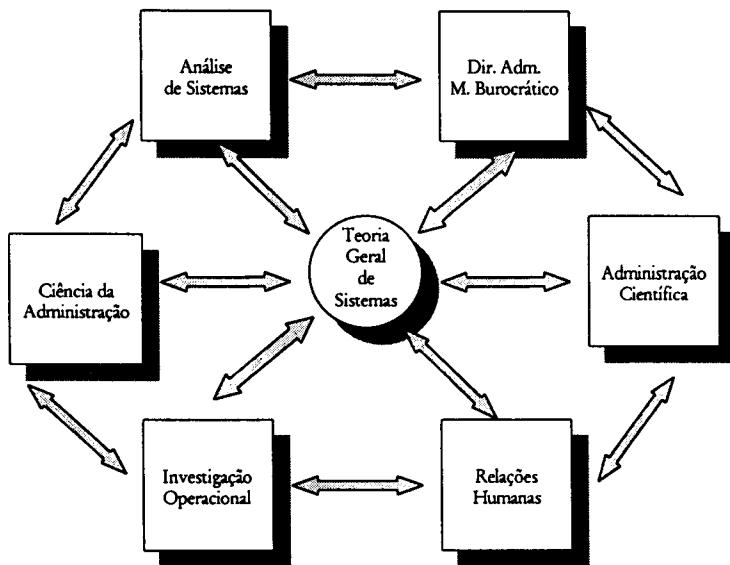
Barnard desenvolveu um modelo conceptual baseado na experiência prática, obtida na empresa Bell onde desempenhava funções, e pela conjugação de uma gama alargada de diversos conceitos de diferentes ramos da ciência como a economia, a sociologia, a psicologia e a filosofia, entre outros. A hipótese central do seu livro, utilizando o conceito de análise de sistemas cooperativos, está imbuída na definição de uma organização formal como um sistema coordenador de actividades ou de forças entre duas ou mais pessoas (KAST et al, 1985).

5.3.1.5. Teoria geral dos sistemas e abordagem contingencial

As empresas como sistemas sociais são organizações resultantes de uma construção de sínteses assente na interdependência e na interacção entre os seus sistemas estruturais e funcionais, nomeadamente na execução de tarefas, no processo de tomada de decisão e na organização do trabalho. A abordagem contingencial apoia-se, como define Rivas (1989), na seguinte acepção: um objecto ou uma proposta são contingentes quando não são necessária e universalmente certos. Esta teoria sustenta que: (i) não existe a melhor forma organizativa; e, (ii) nem todas as formas de se organizar são igualmente eficazes. O ponto de vista contingente defende a consideração conjunta de todos os factores em jogo, interliga os factores das diferentes escolas e o estudo das múltiplas relações entre eles, com vista a determinar quais os fundamentos essenciais para uma dada situação (RIVAS, 1989).

Um dos autores que estudou as contribuições das principais Escolas e efectuou estudos comparativos entre diferentes variáveis foi Jay Galbraith. “*Galbraith é o teórico da organização que mais deliberadamente estuda as relações entre estrutura e capacidade de informação, considerando esta relação uma das variáveis fundamentais para a estruturação das organizações.*

Esta ideia-base, de que a resposta de natureza contingencial da estrutura aos condicionalismos estratégicos ditados pelo meio envolvente depende da manipulação da capacidade de processamento da informação, constitui o suporte dum nova filosofia de gestão da informação, como instrumento de gestão do design organizacional” (ZORRINHO, 1991).



Fonte: Adaptado de Rivas, 1989

Fig. 5.2 : As Organizações Humanas

A conceptualização das empresas como sistemas complexos, permite um melhor entendimento global do modo de funcionamento e das interacções com o meio envolvente. Nesta perspectiva as empresas são sistemas por natureza dinâmicos e abertos. Entendo-se por sistema, um conjunto de elementos dinamicamente relacionados, formando uma actividade (processamento) e interagindo com um dado ambiente, no qual obtém recursos (entradas) e disponibiliza o resultado do seu processamento (saídas) com o fim da alcançar uma determinada finalidade (VARAJÃO, 1998).

Nesta perspectiva, um sistema de informação deverá congregar os muitos sub-sistemas, ou actividades de negócio, que formam uma organização empresarial. Mantendo uma constante interacção entre os diversos elementos ou acontecimentos, endógenos ou exógenos, o sistema de informação resulta num instrumento estratégico fundamental capaz de se ajustar e adaptar à evolução do meio envolvente, revestindo desta forma as características de um sistema aberto e dinâmico (fig. 5.2.).

5.4. Dinheiro – O Bem Virtual por Excelência

Em nenhum outro campo as tecnologias de informação assumem tão grande importância como no campo da economia financeira. Com efeito, os desenvolvimentos tecnológicos nesta área vieram mostrar a existência de mercados e sobretudo de bens virtuais. Hoje, é possível realizar qualquer tipo de negócio utilizando apenas dinheiro de uma forma virtual, isto é, intangível. Movimenta-se dinheiro, muda a posse dos detentores mas de uma forma invisível, apenas por circulação electrónica, ou seja o dinheiro passou a um bem digital.

Mas em que consiste o dinheiro digital? *Dinheiro digital é um substituto electrónico do dinheiro. Ele pode ser armazenado, transferido e não pode ser falsificado. Ele é a escrita cuneiforme de uma nova era. Como está escrito na "home page" da DigiCash, o dinheiro digital é "Números que são dinheiro"* (LYNCH et al, 1996).

O dinheiro foi inventado nos tempos da Suméria há cerca de cinco mil anos. A moeda começou numa economia primitiva como um meio de troca. Um mercador podia tentar trocar as suas mercadorias por um bem intermediário e facilmente comercializável, como um pedaço de bronze de valor equivalente ao *shay* sumério ou a uma medida de cevada (de onde vem o nome da primeira moeda, o *shekel*), se muitos outros mercadores aceitassem esse bem em troca de outros bens, surgia um meio de troca generalizado, ou seja uma forma de moeda. Nas sociedades modernas, o ouro permaneceu como meio de troca generalizado durante séculos. No entanto, o ouro era pouco práctico para ser utilizado nas transacções comerciais. Por isso, as moedas de ouro gradualmente foram substituídas por papel-moeda resgatável e depois por papel-moeda não resgatável em ouro. No entanto, apesar das alterações que sofreu ao longo de milhares de anos, o dinheiro conservou sempre as características de objecto palpável, reserva de valor e unidade de conta.

O dinheiro foi completamente modificado. Para além de objecto palpável, actualmente o dinheiro é um sistema, uma rede formada por centenas de milhares de computadores de todos os tipos conectados em lugares inacessíveis, como os bancos centrais e comuns como as milhares de bombas de gasolina e hipermercados em todo o mundo que aceitam cartões de crédito e de débito. A rede do dinheiro inclui todos os mercados do mundo – acções, obrigações, futuros, moedas, taxas de juro, opções e outros produtos derivados. Neste novo mundo do dinheiro, nem mesmo os bancos precisam de cofres.

A nova rede do dinheiro é muito mais volátil que o sistema monetário de cinco mil anos que ela substitui. Taxas de juro, preços de acções, valor de moedas, preços de títulos – tudo flutua como nunca. Esta

nova forma do dinheiro dividiu o mundo em duas economias. A menor delas, a *economia real*, ou seja a economia da produção, do consumo, dos serviços e da investigação e desenvolvimento. A outra, a *economia financeira*, 20 a 50 vezes superior, em valor, à economia real. Não é uma economia de transacções (no sentido de permuta directa de bens ou serviços), mas de especulação e de comércio de instrumentos financeiros. Basicamente, lida com títulos patrimoniais, como acções e títulos de dívida, obrigações e outros papéis. Do ponto de vista técnico, o tipo de título menos comercializado na economia financeira é o dinheiro (KURTZMAN 1994).

Assente na mais moderna tecnologia, a economia financeira movimenta vários triliões de dólares por dia entre os diversos “nós” da rede e com um elevado grau de desregulamentação. Nos últimos 20 anos, o mundo e a economia passaram e continuam a passar por violentos processos de transformação. Essa transformação alterou praticamente todos os aspectos das vidas humanas. Alteraram-se as noções de sector público e privado, o modo de avaliação da produção e redefiniu-se completamente o conceito de propriedade e de riqueza. Em 20 anos, novos países nasceram e grandes potências morreram.

O que mudou? O dinheiro. Não as notas ou as moedas. Hoje esse tipo de dinheiro –dinheiro tangível – representa apenas a mínima parte de todo o dinheiro em circulação no mundo. No seu lugar, existe uma espécie inteiramente nova de dinheiro, que se baseia não no papel ou no metal, mas na tecnologia, na matemática e na ciência e que percorre o mundo incessantemente numa velocidade equivalente à da luz. E tal como a hipótese de Einstein de que um fotão de luz cria o universo onde quer que vá, este novo dinheiro digital cria um mundo diferente onde quer que ele surja (KURTZMAN, 1994).

O dinheiro deixou de ser uma unidade padrão de valor – um activo fixo e limitado, uma “verdade” absoluta e substancial – para se transformar em algo intangível, volátil e electrónico. Transformou-se numa combinação de zeros e uns, que são as unidades de computação. Esses zeros e uns, que representam o dinheiro, são transportados por milhares e milhares de quilómetros de fios de redes de fibra óptica, retransmitidos por satélites e projectados de uma estação retransmissora para outra. Esse novo dinheiro é como uma sombra. A sua forma cinzenta pode ser vista, mas é intocável; não tem dimensão táctil, nem massa, nem peso.

Actualmente, o dinheiro não está localizado em parte alguma e não precisa de cofre para ser guardado em segurança. Contudo, embora o dinheiro não tenha uma localização real, criou paradoxalmente um ambiente omnipresente, mesmo sem ocupar um lugar físico. Nestas circunstâncias, milhares de investidores, operadores, banqueiros, gestores de carteiras de investimento, correctores de acções, analistas, órgãos fiscalizadores e autoridades governamentais, observam e manipulam dinheiro, através de diferentes terminais de computador em todo o mundo. Constitui-se assim uma comunidade em que vizinhos, colegas e concorrentes são contactados unicamente por meios electrónicos.

Neste novo ambiente, milhões de computadores estão ligados numa vasta rede de transacções e intercâmbio de informações de uma complexidade extrema, que operam 24 horas por dia. *O dinheiro, na sua nova forma electrónica, passa de computador para computador e de cada vez que um electrão dá um salto, unidades de poder de compra – grandes e pequenas – permitem de proprietários. Bens, riquezas, sonhos e poder são transacionados electronicamente. Em cada três dias, uma soma de dinheiro equivalente à produção total anual de todas as empresas mundiais é movimentada.*

sas norte-americanas e de toda a sua força de trabalho passa pela rede subterrânea de fibras ópticas das ruas escavadas de Nova York. E em cada duas semanas, o produto anual do mundo passa pela rede de Nova York. Triliões e triliões de uns e zeros que representam todo o trabalho, suor e artimanhas de todos os esforços honestos e de todas as loucuras da humanidade (KURTZMAN, 1994).

Somas de magnitude semelhante passam pelas ruas de Tóquio, Londres, Frankfurt, Chicago e Hong Kong. Estas somas de dinheiro viajam sob o mar e são retransmitidas pela ionosfera. O sistema financeiro, utilizando o dinheiro desvinculado do ouro, realiza diariamente transações milhares de vezes superiores às da chamada economia real - a parte do trabalho da humanidade em que os bens são produzidos e os serviços prestados (KURTZMAN, 1994).

As tecnologias informáticas tornaram possíveis a existência dessas redes neurais de dinheiro. Com estas tecnologias, as distâncias e o tempo são irrelevantes. O dinheiro passou do padrão ouro para o padrão digital: um padrão baseado em *microships*, memória electrónica e tecnologia de alta velocidade. E esse processo de despir o dinheiro de sua dimensão física, permitiu que ele se transformasse em algo completamente novo, pleno de novas potencialidades. A era da informação deslocou as finanças de sua antiga função estática, até mesmo passiva, de comprar activos, fazer investimentos e conservá-los, para algo novo: ganhar dinheiro.

5.5. Síntese do Capítulo

5. INFORMAÇÃO, TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
 - 5.1. O Conhecimento da Tecnologia
 - 5.2. O Desafio Empresarial das Tecnologias de Informação e de Comunicação
 - 5.3. A Evolução dos Sistemas de Informação nas Organizações
 - 5.3.1. As organizações empresariais
 - 5.3.1.1. Precursors da administração científica
 - 5.3.1.2. Abordagem clássica da administração
 - 5.3.1.3. O aparecimento das ciências comportamentais
 - 5.3.1.4. Teoria de sistemas
 - 5.3.1.5. Teoria geral dos sistemas e abordagem contingencial
 - 5.4. Dinheiro - O Bem Virtual por Excelência

A informação consiste num conjunto de dados que, comunicados a um receptor reduzem a incerteza e potenciam, por parte deste, a tomada de decisão.

A capacidade do receptor para usar correctamente a informação depende do seu conhecimento e da sua inteligência. Um excesso de informação pode, por conseguinte, transbordar as capacidades de assimilação e provocar um estrangulamento da organização.

Consequentemente, decidir sobre a informação, ou dito de outro modo, implementar práticas sistémicas de gestão da informação, constitui um imperativo estratégico, no contexto do exercício do poder e no quadro da competição em que as organizações gravitam.

As tecnologias de informação e comunicação (TIC) revolucionaram as noções de tempo e de espaço e vieram alterar radicalmente, não só os hábitos sociais e as opções intelectuais, como potenciaram, em direcções antagónicas, quer a emancipação do homem e o seu desenvolvimento cultural, quer a manipulação e a subjugação do homem pelo homem.

A nível empresarial, as TIC's induziram a globalização da economia e, nesse novo contexto, alteraram profundamente a maneira de negociar.

Para tirarem proveito da informação, as empresas entendidas como organizações complexas abertas, necessitam de estabelecer interfaces adequadas à recepção e tratamento da informação. Neste campo de forças, as empresas organizam-se por forma a constituírem-se, elas próprias, como sistemas de informação, isto é, de maneria a congregarem-se os diversos sub-sistemas ou actividades de negócio. Mantendo uma constante interacção entre os diversos elementos ou eventos endógenos ou exógenos, o sistema de informação resulta num instrumento estratégico fundamental capaz de se ajustar e adaptar à evolução do meio envolvente.

No contexto do grande desenvolvimento recente das TIC's, o dinheiro perdeu o seu tradicional carácter tangível para se tornar virtual. A par da instantaneidade e do encurtamento de distâncias, a transformação do dinheiro numa realidade virtual em suporte

electrónico, constitui uma das consequências mais revolucionária proporcionada pelas TIC's e com maiores repercussões na economia, particularmente na economia financeira.

6. O PAPEL DA INFORMAÇÃO NOS PROCESSOS DE TOMADA DE DECISÃO

Se Deus jogasse aos dados... ganhava

(STEWART, 1991)

Quando Adam Smith descreveu o conceito de mercado no seu livro “A Riqueza das Nações”, em 1776, apresentou uma teoria segundo a qual, se todos os compradores soubessem os preços praticados por todos os vendedores e todos os vendedores soubessem quanto é que todos os compradores estariam dispostos a pagar por um determinado bem ou serviço, todos os participantes no mercado poderiam tomar decisões bem fundamentadas e os recursos da sociedade poderiam ser distribuídos de forma eficaz. Até à data, ainda não foi possível concretizar o ideal de Smith porque os potenciais compradores e os potenciais vendedores raramente possuem informação completa acerca uns dos outros (SAMUELSON, 1980).

Alguns mercados já trabalham de uma forma relativamente aproximada do *ideal* de Smith. Por exemplo, os investidores que negoceiam divisas e outros tipos específicos de mercadorias participam em mercados electrónicos eficazes que fornecem informação instantânea quase completa sobre a oferta, a procura e os preços praticados a nível mundial. Os negócios acabam por ser relativamente idênticos para todos os participantes, uma vez que as notícias sobre todas as ofertas, propostas e transacções são rapidamente transmitidas

para os escritórios comerciais de todo o mundo através de fios (GATES, 1995).

“Gerir é, antes de mais, processar informação. É com base em informação que os colaboradores da empresa tomam decisões e é sob a forma de informação que muitas dessas decisões são definidas e despoletadas” (ZORRINHO, 1995).

Denomina-se processo de tomada de decisão todo aquele que converte informação em acção. Informação é, então, tudo o que influencia a decisão, independentemente do modo como, quando e para quem é obtida. A informação acumulada reveste a forma de conhecimento e este – estruturado e executado de forma automática – conduz ao conceito de “tecnologia intelectual”. Todo o sistema produz uma reacção ou resultado ou, com maior generalidade, uma saída. Desta, interessarão determinadas características que serão dadas a conhecer sob a forma escrita, verbal ou visual. Essa informação constitui a entrada do processo de decisão; este por sua vez, produz informação correspondente à alternativa que foi escolhida e, de acordo, com esta, actua-se sobre a entrada no sistema que é objecto de decisão (RIVAS, 1989).

Decidir significa actuar sobre informação. A tomada de decisão foi constante ao longo de toda a história da Humanidade. De modo consciente ou não, o Homem fez as suas opções tendo por base a informação disponível. Informação e decisão foram sempre processos indissociáveis. Exceptuando casos de pura sorte, a qualidade de uma decisão não pode ser melhor do que a informação que lhe está subjacente. A probabilidade de sucesso aumenta quando o processo de decisão é fundamentado em informação considerada fidedigna. Informação de qualidade resulta do delineamento de uma estratégia de informação, da capacidade de resolução de problemas e das opções tecnológicas, em suma de uma combinação de cérebro e tecnologia de informação.

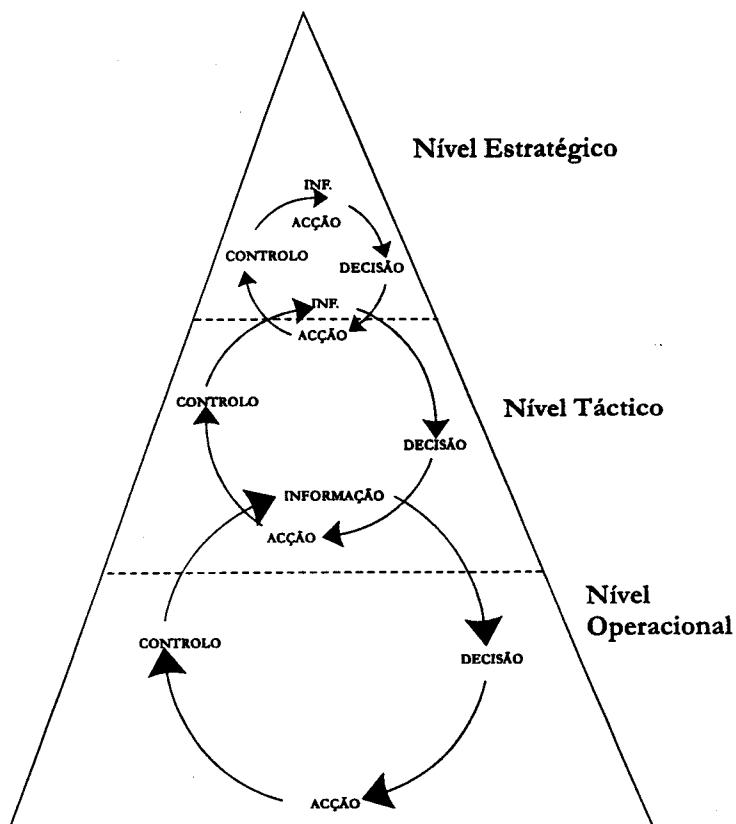
Grande parte da informação flui através da visão de tal modo que, frequentemente, se diz: estou a ver querendo dizer “compreendo”. Sem dúvida, a poderosa capacidade de extrair dados de imagens visuais está na base do emprego cada vez mais difundido de gráficos como meio de informação. As tecnologias de informação têm auxiliado essa destreza de processamento de informação visual de duas formas: em primeiro lugar melhorando o acesso à informação gráfica; em segundo, reduzindo o esforço despendido em tarefas rotineiras de reconhecimento de imagens. A tarefa de representação requer trabalho de processamento e, tal como nas palavras, consiste em converter a imagem em números, numa forma que o utilizador possa processar, escrevendo programas que operem sobre os números memorizados.

O cérebro deixou de ser o único instrumento de processamento de informação com o aparecimento do computador. Os computadores são a via alternativa para lidar com muitos tipos de informação – graças a métodos de programação que refundem os símbolos portadores dessa mesma informação de modo a serem manipulados pelas máquinas. No mundo moderno o impacto das decisões administrativas pode estender-se muito para além dos limites da própria empresa. Um fluxo saudável de informação é o factor que separa as organizações bem sucedidas, das condenadas ao fracasso.

6.1. Informação de Suporte à Decisão

Segundo Zorrinho (1995) podem-se considerar três níveis de tomada de decisão: nível estratégico, nível táctico e nível operacional. Em todos eles repete-se idêntico ciclo de informação/ação em que intervém a tomada de decisão e o retro controlo da acção sobre a informação.

“A gestão dos ciclos informação/decisão em contexto de turbulência e incerteza implica uma ponderação equilibrada entre risco e oportunidade e entre antecipação e reactividade, tendo em atenção o custo associado à informação previsional e à informação de controlo reactivo” (ZORRINHO, 1995) (fig. 6.1.).



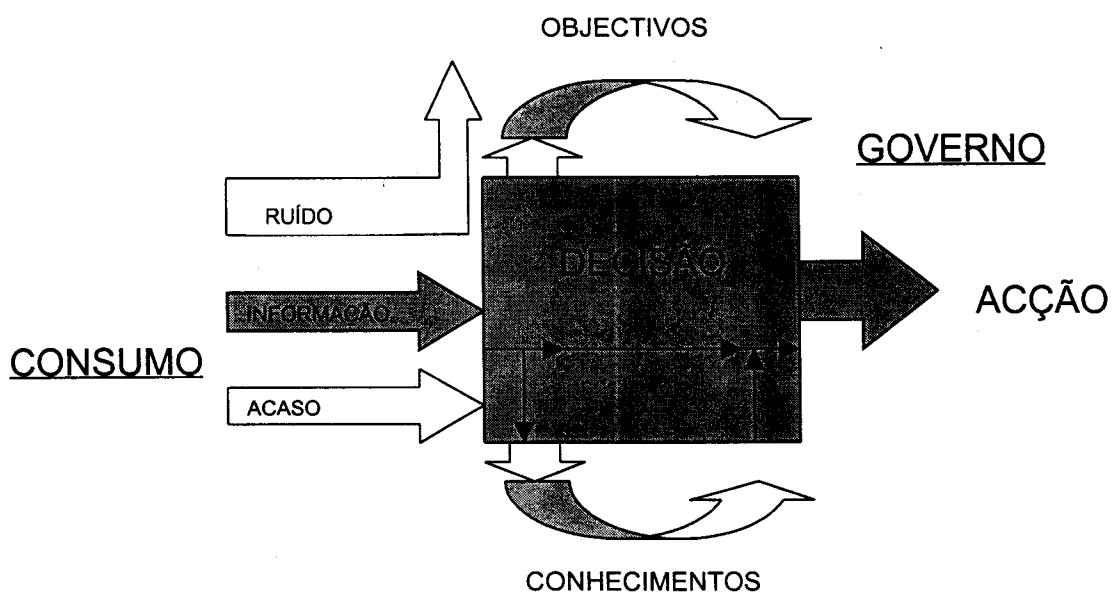
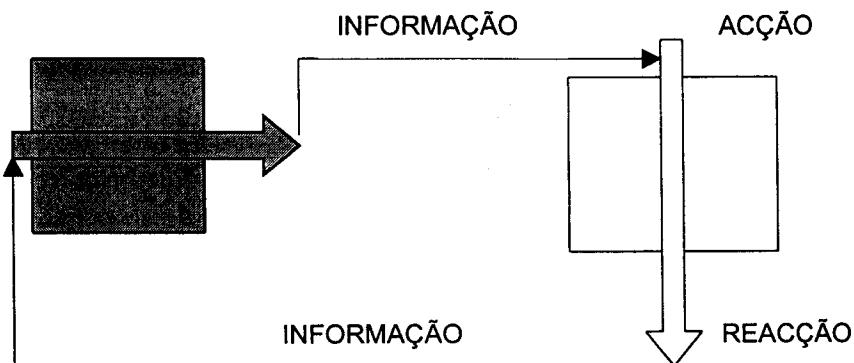
Fonte: Zorrinho, 1995

Fig. 6.1 : O Ciclo de Informação/Decisão

No seu livro *Estruturas Organizativas e Informação na Empresa*, Rivas (1989), distingue dois tipos essenciais de informação: informação de governo e informação de consumo. A informação de governo encerra todo o tipo de informação que serve de suporte ao processo de tomada de decisão. Não reflecte, deste modo, nenhuma realidade circundante, mas expressa uma vontade: objectivos e metas a alcançar, segundo os quais, devem ser submetidas as decisões subsequentes.

Por outro lado, a informação de consumo identifica o estado das coisas e dos factos, é então a informação necessária para cada tomada de decisão. Deste conjunto de informação, no entanto, apenas uma determinada parcela é relevante, devendo ser desprezada a restante considerada como ruído.

Rivas (1989), considera no entanto outros componentes que devem ser tomados em consideração nos processos de tomada de decisão tais como o conhecimento, o factor sorte, as motivações pessoais e o próprio estado de espírito de quem toma a decisão. Embora o conhecimento seja um componente menos susceptível de ser formalizado, representa um conjunto de valores tão essenciais como a formação, a experiência, etc.. O conhecimento enriquece-se cada vez que se decide e, ao mesmo tempo, constitui “uma entrada” no processo de decisão. “*Neste sentido, o conhecimento é informação acumulada, da mesma forma que se considera o Capital como Trabalho acumulado*” (RIVAS, 1989) (fig. 6.2.).



Fonte: Rivas, 1989

Fig 6.2 : Informação, decisão, acção

6.2. Estratégia Empresarial e Estratégia Informacional

O funcionamento e a manutenção das empresas depende da capacidade de inserção no meio e da capacidade com que se movimentam junto das entidades que a influenciam, directa ou indirectamente, e das ligações que conseguem manter com clientes e fornecedores.

Cada vez mais, as empresas actuam em ambiente de turbulência e incerteza, o que implica uma gestão pautada pelo equilíbrio entre risco e oportunidade, ou, como diz Carlos Zorrinho (1995), uma gestão *entre antecipação e reactividade, tendo em atenção o custo associado à informação previsional e à informação de controlo reactivo*. Deste modo, no plano da gestão para decisão, os objectivos complementares das organizações são, em geral, melhorar simultaneamente a capacidade de reacção e a capacidade de antecipação. Quanto à primeira, importa reduzir o tempo de reacção e incrementar a mobilidade dos recursos. No que respeita à segunda, os factores essenciais são o alargamento do campo de observação e o desenvolvimento da capacidade de interpretação dos sinais relevantes (ZORRINHO, 1995).

Diagnosticar a empresa, conhecer a sua missão, identificar objectivos e delinear as estratégias, são os pilares essenciais de um processo interativo conducente ao desenvolvimento de uma empresa flexível assente em sistemas de informação adaptáveis aos fins da empresa. Quais os objectivos que devem presidir à gestão integrada nos processos de tomada de decisão? Segundo Carlos Zorrinho (1995), estes dividem-se em quatro grandes grupos.

O primeiro grande grupo contempla a melhoria da velocidade de reacção a factos conhecidos, concretamente através de:

- melhoria da velocidade de recolha, tratamento e distribuição da informação;
- integração de processos permitindo a decisão em paralelo, em detrimento da decisão casuística e sequencial;
- desenvolvimento de rotinas de solução para casos previsíveis.

Em segundo lugar, aponta a melhoria da mobilidade dos recursos, por:

- descentralização da capacidade de decisão;
- motivação permanente para o desenvolvimento duma cultura de mudança;
- formação e desenvolvimento de competências polivalentes para facilitar a reafectação.

Em terceiro lugar, propõe o alargamento do campo de observação da realidade, concretamente:

- pela recolha sistemática de informação relevante, das diversas origens disponíveis;
- pelo estudo sistemático dos concorrentes, clientes, fornecedores e outros agentes participativos do ambiente mediato da empresa.

Finalmente, no último grupo, propõe o desenvolvimento da capacidade organizacional de interpretação da realidade através de:

- formação e disseminação do conhecimento pela organização;
- melhoramento do sistema informal de comunicação, troca de ideias e pontos de vista e fomento da criação de uma linguagem comum na organização (ZORRINHO, 1995).

6.3. Novas Perspectivas de Pensamento Estratégico

Ao longo da história, o mundo tem-se pautado por transformações sucessivas, decorrentes sempre da disponibilidade e da utilização da informação. Desde a invenção da roda até ao mais moderno sistema informático, inovação, informação e mudança transformaram o mundo de simples comunidades agrícolas em complexos industriais e tecnológicos.

As fronteiras políticas, económicas e culturais foram-se pouco a pouco esbatendo, ao mesmo tempo que se acentuaram as interligações donde resultou a emergência de uma linguagem global, ou seja, de um novo pensamento estratégico. A capacidade para receber, processar e incorporar nova informação criou um ambiente global que é com efeito, um vasto sistema com diferentes elos de ligação entre si.

No seu livro *A Essência do Caos*, Edward Lorenz (1993), demonstrou com o seu modelo meteorológico, que um pequeno acontecimento num sector pode causar uma tremenda turbulência num outro (LORENZ, 1996). Do mesmo modo, uma pequena alteração nas condições sociais, económicas ou tecnológicas pode ter um impacto significativo a nível das organizações empresariais. Este tipo de sensibilidade a novas influências constitui o grande desafio para qualquer organização: encontrar o caminho que permita processar e incorporar nova informação antes que a crise ocorra.

A indústria bancária, constitui o exemplo por excelência deste tipo de situação. A banca teve de adaptar-se às alterações ambientais: novas tecnologias, necessidades e expectativas dos clientes, atendimento *on line*, alterações regulamentares e novas formas de competição, entre outros as-

pectos. Em cada dia, a banca parece actuar na fronteira do caos. Estes períodos de forte instabilidade empurraram para uma série de megafusões. De igual modo, o desenvolvimento tecnológico teve repercussões a nível das agências de viagens, seguradoras e outro tipo de empresas fortemente sensíveis a alterações nos serviços de informação electrónica.

Na possibilidade de concepção de uma imagem gráfica detalhada do ambiente global ocupado pelos sistemas, cada um é representado por um único padrão ou um atrator¹ estranho. Se a partir daqui, se pudesse visualizar as interacções entre indústrias, sistemas, fluxos e novos desenvolvimentos, encontrar-se-iam atractores estranhos colidindo entre si e criando mudança, adaptação e novas relações de interacção. Organizações e sociedades são influenciadas e reestruturadas por este *efeito borboleta*, como Lorenz o denominou. Em adição, os atractores estranhos, já completamente preenchidos, propiciaram condições, ou princípios emergentes, para que outros possam chegar ao sistema. Deste modo, introduziram novos estímulos dentro do sistema, os quais desenvolvem processos muito superiores ao próprio efeito borboleta (SANDERS, 1998).

Irene Sanders (1998) utiliza o termo informação “recuperada” para identificar novas condições iniciais que podem ser sensitivas, ou seja, mudanças ou desenvolvimentos que começam a assumir forma mas que apenas, podem ser percepcionados por uma visão periférica ou por modelos de previsão muito bem concebidos. Trata-se de situações aparentemente sem importância mas que perante um pequeno estímulo podem desenvolver situações incontroláveis (SANDERS, 1998).

¹ O conceito de atractor será desenvolvido na Parte II, capº 10, deste trabalho.

O sucesso empresarial passa então por aprender a identificar situações emergentes. Esta identificação permite antecipar a mudança, responder prontamente ou influenciar de modo a tirar a melhor vantagem. É importante reconhecer as condições iniciais, ou emergentes, do sistema antes que surjam como um atrator estranho inesperado. Este atrator é uma resultante de um acontecimento ou de um novo desenvolvimento face ao qual um determinado sector é sensível. Assim, há três aspectos que devem ser tomados em consideração. O primeiro, respeita às condições emergentes que podem derivar a qualquer momento para um atrator estranho, dando pouco ou nenhum tempo para influenciar o que está a emergir. Esta situação acarreta custos em termos de tempo e dinheiro face à adaptação rápida que se impõe.

O segundo aspecto prende-se com o papel que pode ter a informação “recuperada” na ajuda da identificação de um *gap* num produto ou serviço, ou num campo desconhecido para qualquer *caixa negra*. Finalmente, o mais importante, trata-se do reconhecimento no sistema de condições iniciais tendencialmente emergentes, dando assim oportunidade de influenciar o que começa a assumir forma. Por outras palavras, a pretensão de influenciar necessita da identificação de sistemas de informação adaptados à mudança e da afectação de recursos, o que constituirá o novo efeito de alavanca.

As novas correntes da ciência, através nomeadamente das teorias da complexidade, em geral, e da teoria do caos, em particular ajudam a compreender o ambiente empresarial dum modo coerente e realista. Neste novo quadro de pensamento estratégico, adoptou-se a metodologia seguida por Sanders (1998) e que assenta em sete pilares fundamentais:

1. olhar o sistema como um todo e não como uma resultante da soma das suas partes;
2. considerar a relação ordem/desordem onde a auto-organização ocorre como resultado destas interacções;
3. um pequeno acontecimento num sector pode ter efeitos exponenciais num outro;
4. gráficos, modelos e imagens podem tornar mais fácil a percepção de conexões, relações e interacções;
5. fazer o cruzamento transdisciplinar e sectorial é a chave para detectar condições emergentes, paradigmas, mudanças e oportunidades de negócio;
6. um pensamento não linear é critico no reconhecimento de regras sobre mudanças no ambiente; e,
7. a perspectiva é importante quando se vislumbram acontecimentos caóticos (SANDERS, 1998).

6.4. Síntese do Capítulo

- 6. O PAPEL DA INFORMAÇÃO NOS PROCESSOS DE TOMADA DE DECISÃO
 - 6.1. Informação de Suporte à Decisão
 - 6.2. Estratégia Empresarial e Estratégia Informacional
 - 6.3. Novas Perspectivas de Pensamento Estratégico

Gerir é processar informação. É com base, pois, em informação que, nas empresas se desenvolve o processo de tomada de decisão, isto é, a conversão de informação em acção.

Desde sempre, de modo consciente ou não, o homem decidiu com base em informação disponível, pelo que decisão e informação foram sempre processos indissociáveis. A probabilidade de sucesso de uma decisão aumenta naturalmente quando o processo de decisão é fundamentado em informação de qualidade (fidedigna). A disponibilidade de informação de qualidade é, porém, fruto, ela própria, da capacidade de decisão em sede de delineamento da estratégia informacional bem como das opções tecnológicas.

As empresas (e as organizações fundadas pelo homem, em geral) actuam em ambiente de turbulência, isto é, em situação onde os parâmetros de referência variam aparentemente de forma aleatória. Nestas condições, a incerteza implica, no acto de tomada de decisão uma ponderação equilibrada entre risco e oportunidade, qualquer

que seja, aliás, o nível de decisão: estratégico, táctico ou operacional.

A tomada de decisão “acontece” no contexto de uma determinada estratégia empresarial e informacional. O delineamento destas resulta, porém, de um processo interactivo e inteligente entre o conhecimento da missão e dos objectivos da empresa, por um lado, e entre a atitude de antecipação ou de reactividade (“jogo de cintura”), por outro, que não poderá deixar de levar em conta o custo da informação (informação previsional e informação de controlo reactivo).

A gestão integrada de processos de tomada de decisão deve assentar em objectivos de organização que se podem resumir em quatro grupos: (i) melhorar a velocidade de reacção a factos conhecidos; (ii) melhorar a mobilidade dos recursos, designadamente através da descentralização da capacidade de decisão; (iii) alargar o campo de observação através da recolha de informação pertinente, em vários azimutes; e, (iv) reforçar as capacidades endógenas de interpretação da realidade.

Uma postura empresarial que leve em conta estes objectivos de organização, posiciona-se favoravelmente para actuar em ambiente de turbulência, que constitui a regra, actualmente. Com efeito, como o esbatimento de fronteiras e o alastramento do processo de globalização com particular incidência na economia, assiste-se não só à densificação das interligações e dependências, como ao global

acesso à informação. Nestas condições, a ocorrência de uma qualquer pequena alteração dos parâmetros socioeconómicos ou tecnológicos, num ponto, pode ter um impacto significativo sobre organizações empresariais geograficamente distantes e, deste modo, desempenhar o papel de atrator (ou indutor de perturbação). A simultaneidade e sequencialidade de ocorrência destas perturbações gera o estado de turbulência, atrás referida, no qual, necessariamente, se têm que tomar decisões.

O sucesso empresarial, neste novo contexto, dependerá da organização interna, como se referiu, e da capacidade de aprender a identificar as situações emergentes que podem derivar de um atrator estranho. As novas correntes da ciência, nomeadamente as Teorias da Complexidade e do Caos, ajudam a compreender o ambiente empresarial e a delinear uma nova metodologia de pensamento estratégico, holístico e transdisciplinar.

7. CONCLUSÃO DA PRIMEIRA PARTE: *GERIR EM TURBULÊNCIA*

Das galáxias aos átomos, a matéria estrutura-se em organizações de diferente grau de complexidade. Entre estes, destacam-se, pela sua enorme complexidade, as organizações vivas, as quais, apresentam como característica própria, a autoreplicação, a adaptabilidade e a capacidade de evolução.

Todas as organizações obedecem a leis gerais que decorrem em última análise do Segundo Princípio da Termodinâmica. Nesta perspectiva, energia e informação constituem os dois factores determinantes da existência e da funcionalidade das organizações.

As organizações, das simples às mais complexas, são formadas por conjuntos de elementos particulares (componentes) entre os quais se estabelecem inter-relações estruturantes de tal modo que ao todo são reconhecidas propriedades, não redutíveis nem deduzíveis das propriedades dos componentes, que lhe conferem uma nova unicidade. O grau de complexidade resulta da multiplicidade e da diversidade dos componentes.

A ordem inerente à estrutura das organizações gera a sua própria antítese, a desordem. A tendência natural para a degradação da energia

tende a conduzir as organizações em geral, para um estado de equilíbrio caracterizado pela máxima desordem em que a entropia é máxima. Excepcionalizam-se a este “destino” as organizações vivas, ou de forma geral, as organizações produtoras-de-si, isto é, as que são capazes de mediante captação de energia e processamento de informação, se autoregenerar, de produzir ordem própria componentes e substituir componentes e estrutura degradada. Nestas organizações estabelece-se transitatoriamente um equilíbrio diferente, dito equilíbrio dinâmico, que resulta da contenção da entropia, pela neguentropia.

A compreensão do funcionamento das organizações produtoras-de-si naturais (seres vivos), que a Biologia, a Física e a Química, proporcionam, ajudam a entender o funcionamento das outras organizações produtoras-de-si que o próprio homem cria, das sociedades às empresas.

Nas sociedades humanas, pela razão de o homem ser o seu próprio observador, os mecanismos de criação de ordem e de desordem são objecto da ciência e facilmente identificáveis. Naquelas, a energia e a informação constituem factores chave que sustentam a ordem das organizações. A informação acumulada constitui o conhecimento e este, interrelacionado, constitui, por sua vez, a cultura a qual gera novos conhecimentos e ainda os mecanismos que actuam no sentido neguentrópico.

Todas as organizações vivas, designadamente as criadas pelo homem, se defrontam em conflito não só pela sobrevivência mas também pela primazia. Energia e informação são os factores determinantes

do equilíbrio dinâmico do binómio ordem/desordem, do diálogo entropia/neguentropia, ou, dito de outro modo, do sucesso e da sobrevivência.

Excluído, neste trabalho, o factor energia, o foco recai sobre o factor informação. Tal como a energia, também a informação deve poder ser medida, transportada, formatada e utilizada. A ciência e a técnica proporcionam os instrumentos tecnológicos de informação e comunicação com os quais se transporta e se processa a informação de que as empresas, em particular, necessitam para a sua funcionalidade.

Para tirarem proveito da informação disponível, as empresas necessitam de se estruturarem (adquirirem a forma) de maneira apropriada ao estabelecimento das interfaces adequadas à recepção e ao processamento da informação (sistemas de informação). Contudo, nos tempos actuais de globalização, nomeadamente da economia e da informação, não basta estar-se ciente que as funções de estado, entropia e neguentropia, se aplicam às organizações produtoras-de-si, que são as empresas, do modo semelhante ao dos seres vivos, mas importa ter em conta uma outra realidade objecto igualmente da Física e da Matemática, que se designa por turbulência. A turbulência afecta de forma aparentemente aleatória os ambientes e os referenciais em que gravitam as empresas e gera maior incerteza. A tomada de decisão, acto unitário de gestão, em ambiente de turbulência carece, por conseguinte, de mais e melhor informação (informação ampla, informação fidedigna) e ponderação entre risco e oportunidade, entre antecipação e reactividade.

Neste contexto de turbulência, o sucesso empresarial dependerá da organização interna e da capacidade de compreender as situações emergentes que podem derivar de um atrator estranho.

As novas correntes da Ciência, nomeadamente as Teorias da Complexidade e do Caos, ajudam a compreender o ambiente empresarial e o delineamento de uma nova metodologia de pensamento estratégico, holístico e transdisciplinar.

Referências Bibliográficas

- ALLEN, Peter M. et. al. *La Mort de Newton*. Paris, Maisonneuve & Larose, 1996. (Colecção “Prometheus”).
- ATLAN, H. *L'organisation biologique et la théorie de l'information*. Paris, Hermann, 1992.
- BERTALANFFY, L. VON *General System Theory*. 2.ed. New York, George Braziller, 1998.
- BOUTOT, A. *L'invention des formes : chaos, catastrophes, fractales, structures dissipatives, attracteurs étrangers*. Paris, Éditions Odile Jacob, 1993.
- CARVALHO RODRIGUES, F. *As novas tecnologias, o futuro dos impérios e os quatro cavaleiros do apocalipse*. Lisboa, Publicações Europa-América, 1994. (Colecção “Forum da Ciência”).
- CARVALHO RODRIGUES, F. *As novas tecnologias, o futuro dos impérios e os quatro cavaleiros do apocalipse*. Lisboa, Publicações Europa-América, 1994. (Colecção “Forum da Ciência”).
- COELHO, H. *Tecnologias da informação*. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1986. (Colecção “Universidade Moderna”).
- CRICK, F. *Vida: o mistério da sua origem e natureza*. Trad. (I./P.) de M. Magalhães. Lisboa, Gradiva, 1988. (Colecção “Ciência Aberta”).
- DAFT, R. L. *Organization Theory and Design*. 6.ed. Cincinnati, Ohio, South-Western College Publishing, 1997.
- DANIELS, N. C. *Estratégias Empresariais e Tecnologias da Informação*. Trad. (I./P.) de M. L. Santos. Lisboa, Caminho, 1997. (Colecção “Biblioteca de Economia e Gestão”).

- DION, E. *Imitation à la Théorie de l'Information*. Paris, Édition du Seuil, 1997. (Série “Point Sciences”).
- ECCLES, J. C. *Évolution du cerveau et création de la conscience*. Trad. (I/Fr) de J.-M. Luccioni. Paris, Flammarion, 1994. (Colecção “Champs”).
- GATES, B. Rumo ao Futuro. Trad. (I./P.) de Acento 22. Lisboa, McGraw Hill de Portugal, 1995.
- GELL-MANN, M. *O Quark e o Jaguar: aventuras no simples e no complexo*. Trad. (I./P.) de J. L. Malaquias. Lisboa, Gradiva, 1997. (Série “Ciência Aberta”).
- GÓMES, F. e RIVAS, P. *Estruturas Organizacionais e Informação na Empresa*. Trad. (E./P.) de A. Tomás e R. Oliveira. Lisboa, Editorial Domingos Barreira, 1989. (Colecção “Biblioteca de Gestão”).
- HOYLE, F. *O Universo Inteligente: uma nova perspectiva da criação e da evolução*. Trad. (I./P.) de C. Jardim e E. Nogueira. 3.ed. Lisboa, Editorial Presença, 1993.
- KAST, F. E.; ROSENZWEIG, J. E. *Organization & Management: a Systems and Contingency Approach*. 4.ed. New York, McGraw-Hill, 1985.
- KOONTZ, H., O'DONNELL, C. e WEIHRICH, H. *Administração: Fundamentos da Teoria e da Ciência*. Trad. (I./P.) de A. Z. Sanvicente. 14. ed.,2 Vols. S. Paulo, Livraria Pioneira Editora, 1986.
- KURTZMAN, J. *A Morte do Dinheiro: como a economia electrónica desestabilizou os mercados mundiais e criou o caos financeiro*. Trad. (I./P.) de G. G. Goldschmidt. São Paulo, Editora Atlas, 1995.

- LE MOIGNE, J.-L. *A Teoria do Sistema Geral*. Trad. (Fr./P.) de J. Pinheiro. Lisboa, Inst. Piaget, 1996. (Colecção “Pensamento e Filosofia”).
- LORENZ, E. N. *A Essência do Caos*. Trad. (I./P.) de C. B. David. Brasília, Editora Univ. Brasília, 1996.
- LYNCH, D. C. e LUNDQUIST, L. *Dinheiro Digital: o comércio na internet*. Trad. (I./P.) Follow-Up. Rio de Janeiro, Editora Campus, 1996.
- MORIN, E. *O Paradigma Perdido: a natureza humana*. Trad. (Fr./P.) Hermano Neves. Lisboa, Publicações Europa-América, 1973 (Colecção “Biblioteca Universitária”).
- MORIN, E. *Ciência com Consciência*. Trad. (Fr./P.) de M. G. de Bragança e M. G. Pinhão. Lisboa, Publicações Europa-América, 1994. (Colecção “Biblioteca Universitária”).
- MORIN, E. *O Método: 1. A natureza da natureza*. Trad. (Fr./P.) de M. G. de Bragança. 3.ed. Lisboa, Publicações Europa-América, 1997. (Colecção “Biblioteca Universitária”).
- MORIN, E. *O Método: 2. A vida da vida*. Trad. (Fr./P.) de M. G. de Bragança. 3.ed. Lisboa, Publicações Europa-América, 1999. (Colecção “Biblioteca Universitária”).
- MORIN, E. *O Método: 4. As ideias - a sua natureza, vida, habitat e organização*. Trad. (Fr./P.) de E. Campos Lima. Lisboa, Publicações Europa-América, 1992. (Colecção “Biblioteca Universitária”).
- PELT, J.-M. *Do Universo ao Ser: reflexões sobre a evolução*. Trad. (Fr./P.) de T. F. Coelho. Lisboa, Inst. Piaget, 1998. (Colecção “Epistemologia das Ciências”).
- PENZIAS, A. *Ideias e Informação*. Trad. (I./P.) de J. Casimiro. Lisboa, Gradiva, 1992. (Série “Ciência Aberta”).

- PESSIS-PASTERNAK, G.** *Será Preciso Queimar Descartes? : Do caos à inteligência artificial.* Trad. (Fr./P.) de M. Alberto. Lisboa, Relógio D'Água Editores, 1993.
- PRIGOGINE, I. e STENGERS, I.** *A Nova Aliança: metamorfose da ciência.* Trad. (Fr./P.) de M. Faria, M. M. Trincheira. 2.ed. Lisboa, Gradiva, 1986. (Série “Ciência Aberta”).
- QUINTELA VARAJÃO, J. E.** *A Arquitectura da Gestão de Sistemas de Informação.* Lisboa, FCA-Edit. de Informática, 1998.
- REEVES, H.; DE ROSNAY, J.; COPPENS, Y. SIMONNET, D.** *La Plus Belle Histoire du Monde: Les secrets de nos origines.* Paris, Éditions du Seuil, 1996.
- REIS, C.** *Planeamento Estratégico de Sistemas de Informação.* Lisboa, Editorial Presença, 1993. (“Biblioteca de Gestão Moderna”).
- RITTER, James et al** *Elementos para uma História das Ciências: I. Da Babilónia à Idade Média.* Trad. (Fr./P.) de R. Pacheco et al. Lisboa, Terramar, 1995.
- SAMUELSON, P. A.** *Economia* (Vol. I).Trad. (I./P.) de M. Ferreira. 4.ed. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1980.
- SANDERS, T. I.** *Strategic Thinking and the New Science: Planning in the midst of chaos, complexity and change.* New York, The Free Press, 1998.
- SERRANO, A.** *Sistemas de Informação de Potencial Estratégico: Modelo Referencial para Exploração em PME.* Évora. Tese de Doutoramento, 1997.

- SERRES, M. (Direcção) *Elementos para uma História das Ciências: I. Da Babilónia à Idade Média.* Trad. (Fr./P.) de R. Pacheco et al. Lisboa, Terramar, 1995.
- STRUIK, D. J. *História concisa das matemáticas.* Trad. (I./P.) de J. Guerreiro. 3.ed. Lisboa, Gradiva, 1997. (Série "Ciência Aberta").
- THUAN, T. X. *Le Chaos et l'Harmonie: la fabrication du réel.* Paris, Fayard, 1998.
- WOODROW, A. *Informação, Manipulação.* Trad. (I./P.) de J. M. Barata-Feyo. 2.ed. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1996.
- ZORRINHO, C. *Gestão da Informação - Condição para vencer.* Lisboa, IAPMEI, 1995. (Coleção "Mediateca PME").
- ZORRINHO, C. *Gestão da Informação.* Lisboa, Editorial Presença, 1991.

SEGUNDA PARTE

Do Caos à Ordem, da Ordem ao Caos

“A história das ciências parece seguir, de facto, umas vezes, linhas regulares de expansão ou de crescimento, espirais de repetição ou círculos de invariância, outras vezes sofrer quedas bruscas, retrocessos, ou rupturas, por negligência, ou estabilidades, por longa conservação... Dez modelos diferentes de paragem de regressão ou de progresso, discretos ou contínuos, poderão compor-se de tal modo que se perde o sentido do seu desenvolvimento, desde que se observe a variedade complexa destes diferentes fluxos, redes ou leques.

Nós duvidamos, portanto, do sentido da história da ciência: devemos nós procurar, para começar uma ciência da história? Sim: isto atrasou-me trinta e cinco anos”.

Michel Serres

8. A EVOLUÇÃO DO PENSAMENTO E AS TEORIAS CIENTÍFICAS

“ *Tudo o que não é pensamento é puro nada; pois não podemos pensar senão o pensamento e todas as palavras de que dispomos para falar das coisas apenas podem exprimir pensamentos; dizer que há mais do que pensamento é uma afirmação que não pode ter sentido. E, contudo – estranha contradição para aqueles que acreditam no tempo –, a história geológica mostra-nos que a vida não é senão um curto episódio entre duas eternidades de morte e que, nesse mesmo episódio, o pensamento consciente não durou nem durará mais do que um instante. O pensamento não é senão um relâmpago no meio de uma longa noite. Mas é esse relâmpago, que é tudo”* (POINCARÉ, 1970).

Um sistema de ideias é constituído por uma constelação de conceitos associados de maneira solidária e harmónica cuja arrumação é estabelecida por laços lógicos (ou aparentemente lógicos), resultantes da conjugação de axiomas, postulados e princípios de organização subjacentes. No seu campo de competência, um tal sistema produz enunciados que têm valor de verdade e, eventualmente, previsões quanto a todos os factos e acontecimentos que aí deverão manifestar-se.

As ideias reunidas em sistemas podem ser consideradas unidades informacionais/simbólicas que se juntam umas às outras em função de afinida-



des comuns ou de princípios organizacionais (lógicos, paradigmáticos). Uma ideia isolada só adquire consistência quando integrada num sistema. Morin (1991), recorre a metáforas físicas (modelo do átomo) e biológicas (modelo da célula) para a concepção de um sistema de ideias, o qual comporta:

- um núcleo (axiomas que legitimam o sistema, regras fundamentais de organização, ideias mestras) ou um complexo polinuclear, no caso do sistema reunir no seu seio vários sistemas anteriormente independentes, os quais sob o seu domínio, se tornam subsistemas;
- subsistemas dependentes/interdependentes, dos quais os mais periféricos constituem, eventualmente, uma cintura de segurança; e,
- um dispositivo imunológico de protecção (MORIN, 1992).

Segundo esta perspectiva, um sistema de ideias comporta então, uma auto-organização e uma autodefesa. Todo o sistema de ideias é simultaneamente um sistema fechado e um sistema aberto. É fechado porque se defende contra as degradações ou agressões externas. É aberto porque se alimenta de confirmações e verificações externas. No entanto, e apesar da não existência de uma fronteira nítida e estável entre uns e outros, pode-se distinguir e opor dois tipos ideais: os sistemas em que há prioridade da abertura em relação ao encerramento, denominados *teorias*, e os sistemas em que o encerramento é prioritário, denominados *doutrinas* (MORIN, 1992).

Ainda segundo Morin (1991), todo o sistema de ideias, incluindo uma teoria aberta, como uma teoria científica, comporta o seu próprio encerramento, a sua opacidade e a sua cegueira:

1. O núcleo duro é constituído por postulados indemonstráveis e por princípios ocultos (paradigmas); estes são indispensáveis à constituição de qualquer sistema de ideias, incluindo o científico. O nú-

cleo determina os princípios e regras de organização das ideias, comporta os critérios que legitimam a veracidade do sistema e selecciona os dados fundamentais nos quais se apoia; determina a rejeição ou ignorância que contradiz a sua verdade e escapa aos seus critérios; elimina tudo o que, em função dos seus axiomas e princípios, parece destituído de princípio ou de realidade. Toda a teoria comporta portanto no seu núcleo, uma zona cega. Assim, os axiomas/princípios das teorias científicas actuais interditam a concepção de uma acção terapêutica de uma substância extremamente diluída e ministrada em doses infinitesimais (homeopatia). No entanto, e completamente distinta de uma doutrina, uma teoria científica é capaz de modificar os seus subsistemas e de reconhecer os desacordos existentes entre as suas predições e os dados colhidos no seu campo de pertinência. Contudo, embora aceitando a crítica/refutação exterior, não dispõe de aptidão reflexiva para se autocriticar nos seus fundamentos e na sua natureza. *Uma teoria rende-se, mas não se suicida.*

2. Um sistema de ideias resiste às críticas e refutações externas, não só através da capitalização das provas anteriormente estabelecidas da sua pertinência, mas também se apoiando na sua própria coerência lógica. Quando a lógica de um sistema teórico não pode integrar os dados empíricos que a contradizem, o sistema fecha-se então à perturbação empírica para salvaguardar a sua própria lógica; a sua racionalidade torna-se racialização.
3. Um sistema de ideias elimina tudo o que tende a perturbá-lo e a desregulá-lo. Desencadeia dispositivos imunológicos que repelem ou destroem todo o dado ou ideia perigosa para a sua integridade.
4. Um sistema de ideias é autocêntrico: situa-se por si próprio, no centro do seu universo; é autodoxo, isto é, comporta-se em função

dos seus princípios e das suas regras e tende a tornar-se ortodoxo; é monopolista e vem ocupar sozinho o seu terreno de verdade. É autoritário (mesmo uma teoria científica dispõe da autoridade soberana das Leis da Natureza, cujo segredo penetrou). É agressivo em relação a qualquer rival que o venha contestar no seu terreno (MORIN, 1992).

Assim, os sistemas de ideias são autoconservadores, resistem a tudo o que possa não só ameaçar a sua existência, mas alterar a sua homeostasia. Resistem à contestação, à inovação e até à informação. O coração desta resistência encontra-se no núcleo, onde estão concentrados os princípios de organização do sistema (paradigmas, lógica, categorias). Se é verdade que uma teoria científica deve obedecer à regra superior que a manda desaparecer se o meio científico a rejeita, fica ainda o facto de os seus princípios organizadores ocultos, que não estão submetidos directamente ao controlo empírico, produzirem novas teorias, melhor adaptadas que as anteriores, mas comportando as mesmas cegueiras cognitivas. É por isso que o conhecimento científico, por mais elucidante e crítico que seja, comportou e comporta ainda uma cegueira em profundidade, de origem paradigmática.

Com a força do seu carácter autoritário e da sua pretensão monopolista, uma teoria tende sempre a recusar um desmentido dos factos, uma experiência que lhe é contrária, uma teoria melhor argumentada. Por isso, para que uma teoria se desintegre, é raro bastar uma experiência decisiva, um argumento “imbatível”. É necessária uma longa série de provas acumuladas das carências e insuficiências evidenciadas, e o aparecimento de uma nova teoria que evidencie uma maior pertinência. *Assim, na história das ciências, as teorias resistem dogmaticamente como doutrinas, mas, finalmente, a regra do jogo competitivo e*

crítico, levá-as a emendarem-se e depois, a retirarem-se para o grande cemitério das ideias mortais (MORIN, 1992).

O que é próprio da teoria é admitir a crítica exterior, segundo regras aceites pela comunidade filosófica ou científica que cuida, suscita, e critica as teorias. O campo de existência das teorias constituiu-se há vinte e cinco séculos, em Atenas, onde a instauração da filosofia abriu uma esfera de debate livre de ideias, sem sanções, exclusão ou liquidação daqueles que eram admitidos no debate. Depois, a ciência europeia criou o seu próprio campo, no qual toda a teoria deve obedecer a regras empíricas/lógicas limitativas e aceitar as verificações/refutações que poderiam diminuir-lhe a autoridade.

Assim, um sistema de ideias continua a ser teoria enquanto aceitar a regra do jogo competitivo e crítico, enquanto evidenciar maleabilidade interna, isto é, capacidade de adaptação e modificação na articulação entre os seus subsistemas, como a possibilidade de abandonar um subsistema e de o substituir. Por outras palavras, uma teoria é capaz de modificar as suas variáveis (que se definem nos termos do seu sistema) mas não os seus parâmetros (os próprios termos que definem o sistema). Assim, as características “fechadas” de uma teoria são contrabalançadas pela procura de acordo entre a sua coerência interna e os dados empíricos que ela evidencia. Aqui reside a sua racionalidade.

Por outro lado, a teoria é um sistema aberto porque depende do mundo empírico onde se insere. É a sua característica de sistema aberto que dá à teoria uma resistência constitutiva ao dogmatismo e à racionalização. Mas este tipo aberto está correlativamente relacionado com as regras pluralistas do meio que a alimenta, isto é as sociedades/comunidades filosóficas ou, melhor, científicas. A esfera filosófica e a esfera científica são esferas de existência

democrática/liberal para as teorias. Na esfera científica há, além disso, provas e um veredito de promoção ou eliminação. Assim, a teoria aceita a crítica no quadro filosófico, mas é no quadro científico que admite o princípio da sua biodegradabilidade: uma teoria aberta é uma teoria que aceita a ideia da sua própria morte (MORIN, 1992).

8.1. Os Filósofos de Mileto – Os Precursors

No período que decorreu entre o século VII e o século III a.C., o domínio científico registou um impulso pela compreensão racional do mundo material, até ao limite das possibilidades da época.

Na bacia do Mediterrâneo e à sua volta, deram-se grandes transformações económicas e políticas durante os últimos séculos do segundo milénio antes de Cristo. Numa atmosfera turbulenta de migrações e guerras, a idade do bronze foi substituída pela a idade do ferro. A substituição do bronze pelo ferro não só transformou a arte da guerra, mas baixou o custo dos instrumentos de produção, aumentou o excedente social, estimulou o comércio, o que permitiu uma maior participação dos cidadãos nas questões económicas e de interesse público. Estes aspectos traduziram-se em duas grandes inovações: a substituição da escrita grosseira do antigo Oriente por um alfabeto de fácil aprendizagem e a introdução da moeda cunhada, que ajudou a estimular o comércio. Surgiram cidades comerciais, onde os antigos senhores feudais, proprietários de terras, tinham de lutar contra uma classe de mercadores independentes e politicamente conscientes.

Durante os séculos VII e VI a.C., esta classe mercantil ganhou influência e teve de lutar com os pequenos comerciantes artesãos. Como resultado deu-se a ascensão da *polis* grega, ou seja, a cidade estado autónoma, facto que constituiu uma experiência social nova completamente diferente da experiência das antigas cidades estado da Suméria e de outros países orientais.

As mais importantes destas cidades desenvolveram-se na Jónia, na costa da Anatólia. O seu crescimento comercial ligou-as a toda a costa mediterrânea, à Mesopotâmia, ao Egipto, à Cítia e a outras regiões mais distantes. Neste contexto, Mileto ocupou durante muito tempo, o lugar principal. Outras cidades costeiras também enriqueciam e ganhavam importância no continente grego, como Corinto primeiro, depois Atenas; na costa italiana Crotona e Tarento; na Sicília, Siracusa.

A nova organização social criou também um novo tipo de homem, os mercadores. Estes nunca tinham desfrutado de tanta independência, embora a mesma fosse resultado de uma luta constante e dura. Viviam num período de descobertas geográficas, comparáveis às que viriam a ocorrer apenas no século XVI no Ocidente europeu. Não aceitavam a monarquia absoluta ou o poder conferido por uma divindade estática. Usufruíam de um certo lazer, resultado da riqueza e do trabalho dos escravos, o que lhes permitia filosofar acerca do mundo. A ausência de uma religião instituída conduziu muitos habitantes destas cidades costeiras a uma certa forma de misticismo, mas também em sentido oposto, estimulou o desenvolvimento do racionalismo e da visão científica do mundo.

Para os filósofos de Mileto, a mais antiga escola da Grécia, a constituição da matéria foi uma questão primordial. Embora incipiente em

conteúdo factual, a cosmologia primitiva detinha o mérito de conceber um sistema do mundo integrado numa visão global do universo¹⁶. O primeiro iconoclasta ao serviço da razão humana foi Tales de Mileto (624-645 a.C.), um mercador que visitou a Babilónia e o Egipto na primeira metade do século VI a.C.. Figura lendária, simboliza as circunstâncias sob as quais foram estabelecidos os fundamentos não só da nova matemática, mas também da ciência e da filosofia moderna. A partir da transmissão de conhecimentos por ele veiculado, destacaram-se outros homens que fizeram com que o património de conhecimento da humanidade registasse um assinalável avanço qualitativo. Tradicionalmente conhecido como o pai da matemática grega, Tales de Mileto foi o primeiro dos Gregos a estudar matemática, bem como as outras ciências com ela interligadas, com interesse puramente científico. Os primeiros estudos de matemática grega tinham como objectivo principal compreender o homem no universo de acordo com um esquema racional. A matemática ajudava a encontrar a ordem no caos, a ordenar as ideias em sequências lógicas, a encontrar princípios fundamentais (ROSMORDUC, 1983).

Tales não se resignou a aceitar respostas de teor mágico mitológico sobre os fenómenos da Natureza. Para este filósofo, o princípio de todas as coisas era a água e a diversidade da matéria deveria ser atribuída às várias formas que a água podia assumir. A chuva representava o regresso do ar ao estado de água, o desaparecimento das nuvens o processo inverso. Tales considerava a água como sinónimo e essência da própria natureza (em grego *physis*, termo de que derivou a palavra física). As concepções de Tales trouxeram enorme e fundamental contributo para os progressos

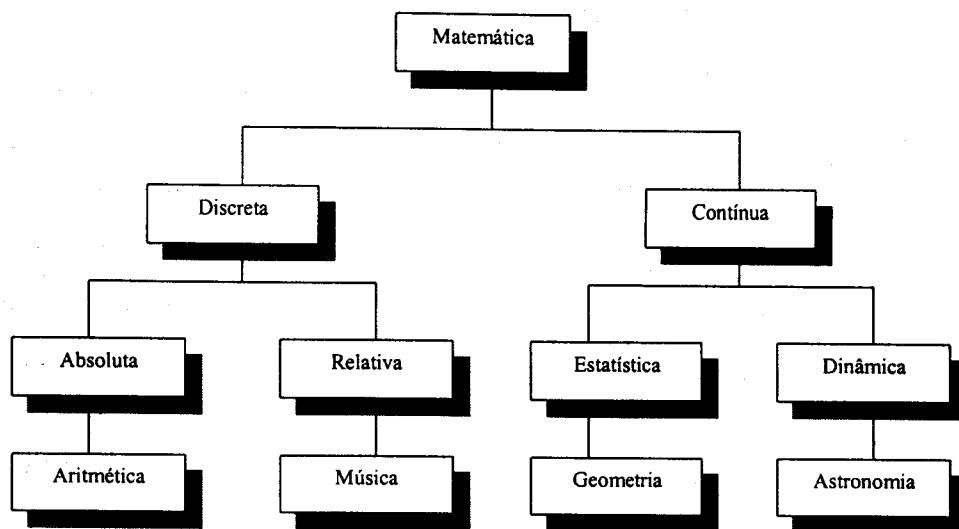
¹⁶ Para Tales a terra era “um disco plano flutuando sobre a onda”, Anaximandro comparava-a “a uma base de coluna” e Anaxímenes idealizava-a “plana e semelhante a uma mesa”. A hipótese de uma terra esférica foi provavelmente desenvolvida por Pitágoras. Esta linha de pensamento veio a ser retomada por Platão (ROSMORDUC; 1983).

cognitivos do Homem. Em vez de explicar os fenómenos naturais e a sua diversidade por meio de representações esotéricas, Tales considerou como princípio, uma realidade verificável pela experiência. A Tales se deve também a primeira observação de um fenómeno eléctrico: a fricção de uma pedra de âmbar (*elektron*, em grego, de onde derivam as palavras electricidade e electrão) e a consequente propriedade de esse material atrair pêlos, fragmentos de folhas de papiro e de outros materiais.

A teoria de Tales segundo a qual o elemento único era a água, não resistiu muito tempo e foi aliás um antigo discípulo seu -Anaximandro (610 a 546 a.C.) -, que a destronou, introduzindo-lhe uma substituição fundamental. Empenhou-se em investigar um outro princípio do mundo, bem mais vasto e misterioso do que a água: o *apèiron* (ou infinito em linguagem actual). Anaximandro sustentava que todos os céus e os mundos eram gerados no infinito e que o espaço infinito era também a expressão mais completa da Natureza (SERRES, 1997). Da concepção de Tales, baseada numa substância concreta passa-se para uma abstracção quanto à infinitude dos aspectos sob os quais a matéria se manifesta aos nossos sentidos. Anaximandro pode ainda ser considerado o inventor das cartas geográficas pois foi o primeiro a aconselhar o desenho sobre “quadros” de perímetros e áreas das regiões então conhecidas e civilizadas. Um outro pensador da escola de Mileto, Anaxímenes (582 a 524 a.C.), substituiu a concepção de que todo o Universo era constituído ou por água, ou gerado no espaço infinito, pela concepção de que toda a matéria do mundo provém do ar (THÉODORIDÈS, 1965).

Em oposição à escola de Tales distinguiu-se a escola de Pitágoras (580-500 a.C.), que desenvolve a distinção entre corpo e alma. Esta, é um princípio imortal que reside em todos os seres vivos, homens ou animais,

até que obtém a purificação e a libertação que a conduzem ao mundo imaterial dos deuses. Os *pitagóricos* salientavam o estudo dos elementos imutáveis da natureza e da sociedade. Na procura de leis eternas do universo, estudavam geometria, aritmética, astronomia e música, o que mais tarde viria a ser denominado como *quadrivium*. Todos os estudos derivavam de um ramo comum, a matemática, e esta por sua vez dividia-se em quatro ramos da seguinte forma:



A esta escola é atribuída a primeira classificação de números: ímpares, pares, pares vezes pares, ímpares vezes ímpares, primos e compostos, perfeitos, amigos, triangulares¹⁷, quadrados pentagonais, etc. Os discípulos da escola de Pitágoras investigavam as propriedades dos números, acrescentando-lhes uma marca de misticismo e colocando-os no centro de uma filosofia cósmica que reduzia todas as relações

¹⁷ Os números triangulares representam uma ligação entre a geometria e a aritmética:

• ••
• •• •••
• 1, •• 3, ••• 6, •••• 10, etc.

fundamentais, a relações numéricas (*tudo é número*) assumindo particular importância as razões entre eles. A igualdade de razões formava uma proporção que podia ser interpretada segundo um ponto de vista social ou filosófico, podendo matematicamente assumir três tipos diferentes: aritmética — $2b=a+c$; geométrica — $b^2=ac$; e, harmónica — $2/b=(1/a)+(1/c)$ (STRUJK; 1997).

Ainda durante o século VI a.C., as duas correntes de pensamento -escolas de Tales e de Pitágoras - defrontaram-se com uma nova teoria de um outro discípulo da escola de Mileto - Heraclito (séc. VI a.C.). Para Heraclito a mutabilidade é a própria essência da existência, tendo defendido uma nova teoria sobre a constituição da matéria: “ Nem água, nem ar, nem infinito. Não é verdade que tudo se transforma e que as transformações da matéria se dão através do fogo? Pois bem: o elemento fundamental do Universo é o próprio fogo.” Um século decorrido, outro filósofo, Empédocles de Agrigento (492 a 432 a.C.), repudiou a ideia de infinito de Anaximandro e insatisfeito na escolha dos três elementos - água, ar e fogo - optou pela solução de adicionar um quarto elemento, a terra.

Segundo aquele filósofo os três estados sob os quais a matéria se apresenta poderiam ser sintetizados no estado líquido (água), no estado gasoso (ar) e no estado sólido (terra), sendo o fogo o elemento fundamental de todas as transformações. Nos seus poemas, abordou diversas questões biológicas: distinção dos caracteres sexuais, formação do feto, respiração dos animais, etc. Foi, além disso, um dos primeiros a associar os órgãos e as funções nos reinos animal e vegetal (por exemplo, as penas e as escamas seriam comparáveis às folhas e aos filamentos). Segundo ele, todos os fenómenos biológicos seriam

regidos por causas mecânicas e mudanças das condições do meio, que impuseram ao ser vivo uma adaptação por meio dos órgãos apropriados. Se tais condições mudarem, também o órgão se modifica, ou então o organismo terá que adquirir órgãos novos. Empédocles é, portanto um precursor da ecologia. Na sua análise foi ainda mais longe: os seres vivos inadaptados têm que perecer, havendo aqui, de forma obscura, um pressentimento longínquo da teoria darwiniana da selecção natural (THÉODORIDES, 1965).

8.2. Platão e a Orientação Pitagórica

Apesar dos diferentes estudos desenvolvidos pelos filósofos de há cerca de vinte e três séculos, a grande revolução religiosa e científica, que só viria a ser cabalmente reconhecida através de Isaac Newton no século XVII, inicia-se com Platão (428-348 a.C.) através da tentativa de conveniente dos Gregos da adopção de deuses inteiramente novos e da afirmação de que o comum dos mortais era capaz de compreender os movimentos divinos.

Platão liderou uma revolta contra os deuses tradicionais que viviam no cimo do Olimpo. Tinham deixado de ser dignos de louvor, queixava-se o filósofo, por se terem tornado de sobremaneira, malévolos, imorais e indignos. Esses deuses mostravam-se antiquados e demasiado provincianos para um império helénico. Esta vasta civilização necessitava de divindades de prestígio mundial. “*Podem-se formular quaisquer explicações sobre Zeus, Hera e o resto do panteão tradicional*”, dizia Platão, mas estava na altura de os Gregos alargarem os seus horizontes religiosos olhando para os céus, reconhecendo “a superior dignidade dos deuses visíveis, os corpos celestes”. Implorou também aos seus

concidadiões que “afugentassem o medo supersticioso de espreitar o divino... dedicando-se a obter um conhecimento científico dos seus [isto é, dos astros] movimentos e períodos. Sem este conhecimento astronómico”, argumentava no seu estilo sublime de retórica, “as cidades nunca poderão ser governadas com verdadeiro sentido de estado e a vida humana jamais será verdadeiramente feliz” (citado em GUILLEN, 1998).

Os filósofos naturais que se tinham como *platónicos*, acreditaram na racionalidade subjacente do universo e na importância de a descobrir e, assim, sustentaram aquilo que tomavam como sendo as convicções de Platão. O Sol, a Lua e as estrelas comportavam-se impecavelmente aparentando sempre descrever círculos perfeitos em torno da Terra, situada no centro do universo. Os círculos, de entre todas as curvas conhecidas, eram considerados divinos devido à sua simetria imaculada e, em virtude de não terem princípio nem fim, serem eternos.

No entanto, uma excepção à regra constituída por cinco pontos de luz fixa (ao contrário dos restantes, todos brilhantes) que ziguezagueavam pelo céu, confundia os astrónomos. Para Platão este comportamento errático ameaçava a sua reforma religiosa com o descrédito total. Os astrónomos gregos começaram a referir-se a estas divindades de comportamento errático como planetas¹⁸ e concentraram-se no sentido de explicar os seus movimentos aparentemente imperfeitos, tendo concluído que os planetas moviam-se com muito mais liberdade sobre a superfície de *esferas* imaginárias. Sendo as esferas igualmente simétricas e perfeitamente eternas, o movimento planetário não era menos divino do que o movimento do Sol, da Lua e das estrelas (GUILLEN, 1998).

¹⁸ Planeta, palavra grega que significa vagabundo.

O compromisso com a filosofia de Platão tendeu a reforçar a orientação pitagórica em direcção à ciência. De facto, a orientação pitagórica tornou-se importante entre os cristãos ocidentais como resultado da união do *Timenê* de Platão com a Sagrada Escritura. No *Timenê*, Platão descreveu a criação do universo por um benevolente Demiurgo que imprimiu o modelo matemático numa matéria primordial e informe. Os apologistas cristãos apoderaram-se deste relato que identificaram com o Divino Plano da Criação e ocultaram a ênfase dada à matéria primordial. Para os que aceitaram esta síntese, o trabalho do filósofo natural é descobrir o modelo matemático segundo o qual o universo está ordenado (LOSEE, 1998).

Posteriormente, Eudoxo (406-355 a.C.), um influente matemático, a quem se deve a primeira teoria rigorosa dos números irracionais, apercebeu-se de que o movimento observado dos planetas relativamente às estrelas não se ajustava ao ideal platónico. As trajectórias descritas pelos planetas eram inclinadas e frequentemente pareciam mover-se para trás. Eudoxo concebeu uma descrição matemática que considerava os planetas montados numa série de vinte e sete esferas concêntricas, cada uma girando em torno de um eixo suportado pela vizinha. Este sistema viria a ser aperfeiçoado pelos seus sucessores através da adição de novas esferas.

8.3. Sistematização Dedutiva

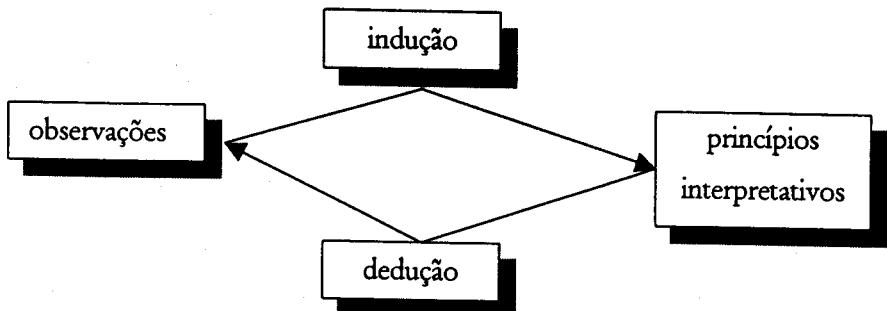
As guerras contínuas entre cidades e os confrontos políticos no interior das próprias cidades, minaram progressivamente o poderio grego. Em alternativa, a organização de um verdadeiro centro intelectual surge e desenvolve-se em Alexandria, após a coroação de Ptolomeu, em 329 a.C.. Neste centro foram instalados progressivamente uma escola, um museu e

uma biblioteca e aí conservados milhares de manuscritos. O conjunto constituiu um poderoso organismo de ensino e investigação para onde se deslocou o escol de pensadores de todo o mundo helénico. A sua irradiação estendeu-se a toda a bacia mediterrânea e persistiu mesmo quando a influência política helénica diminuiu até desaparecer.

8.3.1. O Método Indutivo-Dedutivo de Aristóteles

Nos primórdios da escola de Alexandria, a influência de Aristóteles (384-322 a.C.) era dominante. Antigo discípulo de Platão e durante algum tempo, preceptor de Alexandre, Aristóteles fundou um liceu em Atenas em 335 a.C. onde, com exclusão das matemáticas, ensinou doutrinas que abarcaram a quase totalidade das ciências. Após a morte de Platão, em 347 a.C., Aristóteles daria continuidade, a níveis mais amplos, à revolução iniciada por Platão.

Aristóteles encarou a investigação científica como uma progressão a partir das observações até aos princípios gerais e destes, de novo, até às observações. Sustentou que o cientista deveria induzir princípios interpretativos a partir dos fenómenos a interpretar e, a seguir, deduzir afirmações sobre os fenómenos a partir de premissas que incluam estes princípios. O procedimento indutivo-dedutivo de Aristóteles, pode representar-se da seguinte forma:



Aristóteles acreditava que a investigação científica começa com o conhecimento de que certos eventos ocorrem ou de que certas propriedades coexistem. A interpretação está terminada quando as afirmações acerca desses eventos ou propriedades são deduzidas dos princípios interpretativos. A interpretação científica é assim, transição entre o conhecimento de um facto do diagrama acima e o conhecimento das razões para esse facto.

Aristóteles concebeu uma explicação extraordinariamente detalhada da razão pela qual os novos deuses celestiais de Platão eram superiores aos seres humanos e a todas as coisas terrenas. A teoria aristotélica concebia o universo dividido em duas regiões distintas: a *região central* que compreendia a Terra e a atmosfera; e, a *região celestial*, situada no exterior do perímetro descrito pela Lua, onde se localizavam todos os corpos celestes do universo – Sol, Lua, planetas e estrelas – todos eles girando em torno da Terra, a qual se encontrava completamente imóvel.

Para Aristóteles o reino terreno era corruptível e mutável porque o quarteto de elementos básicos – húmido e seco, quente e frio,

nas quais se baseavam todas as coisas terrestres¹⁹, incluindo os quatro elementos que para os seus contemporâneos constituíam a essência da realidade física - e respectivas qualidades básicas, eram em si corruptíveis e mutáveis.

No reino *celestial*, inteiramente constituído por um quinto elemento básico, uma quintessência protoplasmica chamada éter, tudo se passava de modo diverso. O éter podia assumir vários graus de densidade, formando desde o Sol, passando pela Lua, as estrelas e os restantes planetas, a um conjunto articulado de esferas sobre cujas superfícies invisíveis evoluíam os corpos celestes, nas suas órbitas imaculadas.

O Sol, a Lua e as estrelas estariam circunscritos a esferas que giravam sempre no mesmo sentido, donde a explicação das suas órbitas perfeitamente circulares. Quanto aos planetas, circunscrever-se-iam a esferas que giravam em várias direcções de uma forma ordenada, mas complexa, o que explicava os seus movimentos mais variados no céu nocturno. Para Aristóteles, o éter era incorruptível, o que implicava a perfeição e a imutabilidade eternas do céu.

A teoria desenvolvida por Aristóteles, causou entusiasmo entre os seus concidadãos, devido ao facto de o seu universo se adaptar perfeitamente à ideia de um *cosmos*, palavra grega que significa ordem, beleza e decência – tudo o que seria de esperar dos novos deuses. Por outro lado, esta teoria satisfazia plenamente a filosofia ocidental porque cada efeito que se faz sentir no universo correspondente obrigato-

¹⁹ O que chamavam terra era essencialmente seco e frio; a água era fria e húmida; o ar húmido e quente; o fogo, quente e seco (GUILLEN; 1998)

riamente uma causa racional. Aristóteles possuía uma explicação plausível e reverente para as causas do movimento das gigantescas esferas celestes. Cada uma, explicava, era arrastada por um vento etéreo provocado pelo movimento da esfera imediatamente superior, sendo a esfera superior a todas as outras impelida pelo *Primum Mobile*, ou seja, Deus Todo-Poderoso.

Segundo Aristóteles, cada coisa particular é a união da matéria e da forma. A matéria é o que torna individuais as coisas e a forma é o que as torna membros de um conjunto de coisas similares. Especificar a forma de uma coisa é especificar as propriedades que ela partilha com outras coisas. Aristóteles sustentou que é por indução que, a partir das experiências sensoriais, se fazem generalizações sobre a forma. O primeiro tipo de indução consiste numa simples enumeração de afirmações sobre objectos ou acontecimentos individuais que servem de base para generalizações. O segundo tipo é uma intuição directa dos princípios gerais que aparecem exemplificados nos fenómenos. No segundo estádio da investigação científica, as generalizações obtidas por indução são usadas como premissas para a dedução de afirmações acerca das observações iniciais. Aristóteles acreditava que as leis gerais da ciência devem ser auto-evidentes. Sabia que um argumento dedutivo não contém mais informação do que a existente nas suas premissas e defendeu que os princípios primeiros de uma demonstração eram, pelo menos, tão evidentes como as conclusões deles saídas (LOSEE, 1998).

Aristóteles, seguindo a linha de pensamento de Platão, envolve de forma duradoura religião e ciência. Por um lado, a ciência pintava uma imagem favorável dos céus e corroborava a existência de um deus

supremo. Por outro lado, a religião expandia o domínio da ciência e elevava-lhe a reputação, de valor duvidoso das épocas antecedentes. Do período de influência aristotélica, destacam-se ainda os trabalhos matemáticos de Euclides²⁰, de Diofanto, de Aristarco, de Apolónio de Perga, de Arquimedes; as astronomias de Aristarco de Samos, de Erastótenes de Hiparco e de Cláudio Ptolomeu. Com as suas convicções, estes pensadores legaram às gerações seguintes, o princípio de que os fenómenos da Natureza são mais facilmente detectáveis e identificáveis numa linguagem matemática.

8.3.2. Os Modelos Matemáticos de Ptolomeu

Para os astrónomos clássicos, todos os sistemas do mundo eram combinações mais ou menos engenhosas de circunferências e movimentos uniformes. Aristarco de Samos, suplantou o sistema desenvolvido por Eudoxo através da concepção de uma teoria de epíciclos em que colocava o Sol no centro do mundo, com os planetas a descreverem órbitas circulares em torno dele. Cláudio Ptolomeu, que viveu em Alexandria de 100 a 160 d.C., melhorou o sistema de epíciclos e ajustou-o de tal modo às observações que nenhum progresso notável seria realizado, nesta área científica, ao longo de catorze séculos. A partir da adaptação complexa dos desenvolvimentos de Aristóteles, Ptolomeu concebeu um sistema geocêntrico com a Terra imóvel no centro do universo. A partir da imagem do movimento circular uniforme - um ponto movendo-se sobre uma circunferência a velocidade constante.

²⁰ Euclides, matemático grego que ensinava em Alexandria no reinado de Ptolomeu I (cerca de 300 -283 a.C.). Os *Elementos* de Euclides constituem como que a base da geometria plana e contêm o famoso postulado do seu nome.

dade constante - o sistema de Ptolomeu, como Ekeland descreve, *resposta sobre três invenções geniais:*

O epiciclo. Trata-se de uma pequena circunferência cujo centro se desloca uniformemente sobre um grande círculo fixo. Se um pequeno ponto se deslocar uniformemente sobre a circunferência pequena, o seu movimento, dum ponto de vista fixo, terá as mesmas alternâncias de aceleração e desaceleração, mesmo de movimento retrógrado, que os planetas vistos da Terra.

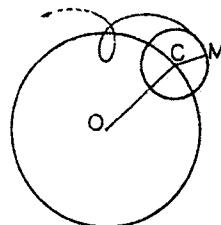


Fig. 8.1: Um epiciclo. O centro C do círculo pequeno desloca-se uniformemente sobre o grande. Entretanto o ponto M desloca-se uniformemente sobre o círculo pequeno. A composição dos dois movimentos imprime ao ponto M uma sucessão de acelerações e de desacelerações

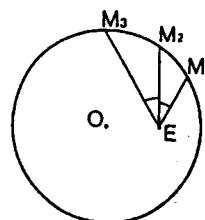


Fig. 8.2.: Um ponto equante. O ponto M desloca-se sobre um círculo de centro O. Visto do ponto E, percorre ângulos iguais em tempos iguais. Não sucederia o mesmo se, por exemplo se medissem os ângulos a partir do centro O.

O equante. Imagine-se uma circunferência fixa e um ponto interior, que não o centro: este será o ponto equante. Imagine-se um movimento sobre uma circunferência, uniforme não relativamente ao centro, mas ao equante, isto é, a velocidade angular medida no ponto equante é constante. Então, o ponto móvel não terá uma velocidade constante sobre a circunferência: acelera quando se aproxima do equante, abranda quando se afasta, tal como os planetas sobre a sua órbita.

O excêntrico. A Terra não está necessariamente colocada no centro do sistema. Ptolomeu atribui-lhe uma posição simétrica da do ponto do equante para cada órbita planetária (EKELAND, 1993).

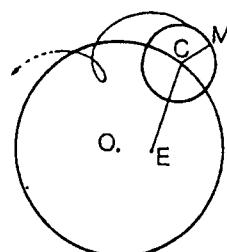
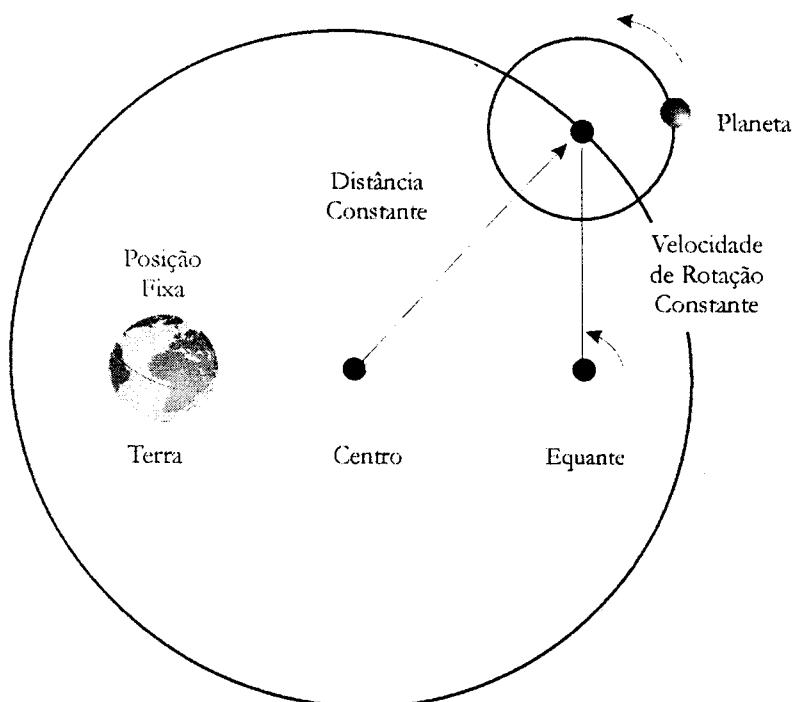


Fig. 8.3.: O sistema de Ptolomeu: composição de um epíclo e de um equante.



Fonte: Peterson, 1995

Fig. 8.4.: Sistema Planetário de Ptolomeu

No sistema do universo desenvolvido por Ptolomeu, a Terra encontra-se deslocada do centro do círculo sobre o qual gira o centro

do epiciclo. O aspecto notável deste sistema é o de que escolhendo convenientemente os raios e as velocidades de rotação, Ptolomeu consegue reproduzir com uma precisão assinalável os movimentos aparentes dos planetas (PETERSON, 1995).

8.4. O Declínio da Escola de Alexandria e a Ascensão do Império Muçulmano

Mesmo ao longo do período de domínio do império romano a escola de Alexandria continuou a ser o principal pólo da vida científica. A sua produção científica foi notável, distinguindo-se da anterior pela relativa especialização verificada e pela maior distinção entre ciência e filosofia. Neste aspecto, foi particularmente importante o papel desempenhado por vários engenheiros (Arquimedes, Cetsíbio, Héron de Alexandria, Fílon de Bizâncio,...) que aliaram a investigação teórica à prática. Nos começos da escola de Alexandria a influência de Aristóteles (384-322 a.C.) era dominante. Com o desaparecimento do império romano, no século V, a actividade científica conheceu um período de declínio embora aquela escola tenha continuado a funcionar sem que todavia a qualidade do ensino e dos trabalhos realizados possam, de algum modo, ser comparáveis com a notoriedade passada.

No século VII aparece e cresce uma nova força política e religiosa, construindo rapidamente um império e que, particularmente no domínio científico, prossegue a Antiga Grécia: o Islão.

O período antigo da história e do pensamento científico chega ao termo em 640, com a conquista de Alexandria e a destruição da biblioteca,

do museu e da dispersão de todos os tesouros e manuscritos aí existentes. Nesta época, o império árabe estendia-se dos Pirinéus à China, sendo posteriormente conquistados o sul de Itália, a Sicília e a Sardenha. Estas conquistas fizeram dos muçulmanos herdeiros de todos os contributos da cultura antiga: grega, persa, hindu, etc. Durante o período de domínio árabe que durará até ao século XI, a vida cultural e científica, na Europa, tornou-se praticamente inexistente verificando-se o oposto no império muçulmano. Excepto em certas épocas e em certas regiões dominadas por seitas muçulmanas integralistas, os sábios foram frequentemente apoiados pelo poder político-religioso. Os califas financiaram observatórios e universidades, o que se traduziu num grande saldo científico.

8.5. O Despertar da Europa

Do século XI ao século XIII, com particular incidência neste último, a Europa Ocidental conheceu um período de intensa actividade tecnológica, sendo uma das épocas mais fecundas em invenções. São fundadas várias universidades (Bolonha, Montpellier, Paris, Oxford,...). Por volta do século XIII, os estudantes de toda a Europa começavam a aprender tudo acerca da retórica platónica, da lógica aristotélica e da geometria euclidiana. Sobretudo, os líderes cristãos iam ficando a saber que o rabi Maimonides tinha reconciliado a cosmologia de Aristóteles com o judaísmo e que o filósofo Averróis fizera outro tanto em relação à religião islâmica (GUILLEN; 1998).

Para não se deixar ficar para trás, o brilhante teólogo dominicano S. Tomás de Aquino ajudou o universo geocêntrico de Aristóteles a acomodar-se ao cristianismo. Este processo envolvia uma miríade de subtile-

zas, mas a ideia-base era a de que os corpos celestes, desta feita não adorados como semideuses, seriam sustentados sobre esferas cujo movimento de rotação era mantido por anjos, e não ventos etéreos. Acima de tudo, o *Primum Mobile* de Aristóteles era identificado como o Deus judaico-cristão único, e não como uma mera divindade genérica (GUILLEN; 1998). A partir da lição de Aristóteles, revista por Tomás de Aquino, edifica-se o pensamento escolástico. Neste período, salientam-se o progresso científico da matemática, o renovar das concepções sobre a natureza da luz, as primeiras experiências sobre o magnetismo bem como a publicação de diversas encyclopédias. Este progresso científico induziu um intenso desenvolvimento tecnológico.

A partir do século XI as cruzadas sucessivas incrementaram significativamente o comércio no Mediterrâneo oriental, particularmente entre certas cidades italianas (Veneza, Génova,...) e os países muçulmanos. No domínio científico, estas permutas permitiram aos ocidentais resgatar a herança grega enriquecida pelo saber árabe, no que viria a resultar o movimento renascentista. Este movimento acentua-se a partir do século XII, tendo-se manifestado de início pela tradução em latim, de obras gregas (Ptolomeu, Arquimedes, Apolónio,...) e posteriormente, por obras árabes, entre os quais se incluem os dez trabalhos de al-Khorezmi²¹: *Kitab az-zij al-sidhind*, um conjunto de tábuas astronómicas, incluindo as primeiras tábuas de senos e co-tangentes; *Kitab hisab al-'adad al-hindi*, um texto aritmético; *Kitab al-muhtasar fi hisab al-gabr w'al-muqabalah*, texto sobre resolução de equações. Duas das suas obras foram latinizadas como *Ludus algebrae et almucrabalaque*, de onde resultaria a palavra “álgebra” e uma outra como

²¹ Muhammad ibn Musa abu Abdallah al-Khorezin al-Madjusi al-Qutrubulli nasceu por volta de 810 d.C., em Khorezm, actualmente Urgench, República do Urbequistão. Trabalhou como astrônomo do califa Abd-Allah al-Mamum (o fidedigno), que herdou a ayt al-Hikmah (Casa da Sabedoria, ou Academia das Ciências), em Bagdade, do seu pai, Harun ar-Rashid (o justo), e a elevou à sua máxima fama (STEWART, 1996).

Algorithmi de numero Indorum, que trouxe o sistema numérico hindu para o mundo Árabe e o resultante sistema numérico hindu-árabico para a Europa , o actual sistema de centenas, dezenas e unidades com um símbolo para o zero e mais nove dígitos e cujo valor depende da posição que ocupa.

Na época medieval, a aritmética era identificada com o seu nome, interpretado como “*Algorismus*”. A fórmula *dixit Algorizmi* , como o expressou al-Khorezmi, era marca reconhecida de clareza e autoridade. O seu texto sobre aritmética incluía todos os processos aritméticos básicos através dos quais os números podem ser somados, subtraídos, duplicados, divididos ao meio, multiplicados, divididos e extraídas as raízes quadradas, continha ainda um capítulo sobre cálculos comerciais. O termo algoritmo como a descrição de qualquer procedimento claro e preciso de resolução de um dado problema sobreviveu ao longo dos tempos.

Hoje em dia, o termo algoritmo assume-se como um conceito no âmago das ciências matemáticas e da computação, em termos práticos e teóricos. Exemplos de algoritmos foram todavia, conhecidos antes do livro de al-Khorezmi, um dos quais data do tempo da Grécia antiga (300 a.C.), sendo agora referenciado como algoritmo de Euclides para determinar o máximo divisor comum de dois números naturais não ambos nulos, isto é, o maior número que divide ambos de forma exacta.

8.6. Os Primórdios da Emancipação da Ciência

Os séculos XIV e XV são caracterizados por um grande desenvolvimento das actividades industrial e comercial associado a um progresso

extraordinário na arte de navegação. Surge uma nova classe capitalista, composta por industriais que fazem trabalhar assalariados (agrupados ou ao domicílio), poderosos mercadores e banqueiros. Esta nova classe escapa às regulamentações corporativas dos ofícios, às autoridades municipais e tem frequentemente ligações com os reis, a quem concedem empréstimos de dinheiro. A sua actividade tem como objectivo único, a procura de lucro.

Recorrendo aos conhecimentos de astronomia, diversos navegadores descobrem novos e importantes territórios. Em 1487 Bartolomeu Dias contorna o Cabo da Boa Esperança; onze anos mais tarde Vasco da Gama contorna a África, atinge a Índia e abre uma nova rota marítima para o comércio com o Leste; Cristóvão Colombo descobre a América em 1492. Os descobrimentos abrem a era das grandes viagens, das descobertas de territórios até então desconhecidos e das transformações económicas e sociais favorecidas pela importação para a Europa das riquezas apoderadas nas regiões conquistadas. A época torna-se propícia em todos os domínios a transformações do modo de produção, das relações económicas, do modo de vida e das mentalidades. É o tempo de questionamento, de contestação e como consequência, de grande desenvolvimento intelectual.

No entanto, o poderio da Igreja, a nível do domínio científico sofre um novo revés a partir do século XIV, o qual porá fim ao matrimónio – religião ciência - idealizado por Aristóteles. A maior parte do mundo habitado foi devastado por uma sucessão de terríveis surtos de peste bubónica, pelo menos um terço da população europeia foi dizimada entre os anos de 1347 e 1350. Os sobreviventes culpavam os líderes espirituais de não os terem alertado para esta reprimenda apocalíptica de Deus e o clero criticava o comportamento pecaminoso do povo que provocara a ira

divina. Curiosamente tinham sido as igrejas e os mosteiros cristãos, por toda a Europa, mais atingidos pela peste que a generalidade da população. Cerca de metade dos servos do Senhor desaparecera da face da Terra, o que veio provocar grandes debilidades no seio da Igreja.

Atraídos pelas consideráveis quantias de dinheiro oferecidas pelas aldeias despojadas de líder religioso, crescia o número dos que aderiam ao sacerdócio de todo falhos de vocação. Foi nesta condição de abandono e fraqueza, que a igreja católica foi fustigada por dois dos seus membros mais desiludidos. Em 1517, o cônego Martinho Lutero, (1483-1546), encabeçou uma histórica reforma religiosa, ao implorar aos colegas que retornassem a um cristianismo sustentado pela fé pueril e por boas acções e não pelas extravagâncias de um mundo temporal. Em 1543 seria a vez de o teólogo polaco Nicolau Copérnico, (1473-1543), despoletar uma revolução científico-religiosa ao proclamar o divórcio de Aristóteles, alegando que o centro do universo era ocupado pelo Sol, e não pela Terra.

"Copérnico era um astrónomo amador, embora não possuisse quaisquer provas empíricas para defender a sua opinião; simplesmente acreditava que a teoria geocêntrica era desnecessariamente complicada, devido à presunção pouco sensata de se estar a observar os céus a partir de um local privilegiado e inamovível, bem no meio de toda a ação.

Por exemplo, especulava Copérnico, o movimento dos planetas vagabundos parecia ser complicado devido apenas ao facto de nós próprios estarmos a percorrer o espaço de uma forma complicada, a bordo da nave terra, que girava sobre o seu eixo como uma bailarina, à medida que completava revoluções em torno do Sol.

À criança que gira no ar suspensa pelos braços, tudo à volta parece oscilar e rodar. Será que é realmente assim? A resposta da criança teria sido "é claro que não", e isso se apenas admitisse que era ela quem estava a girar, e não tudo o resto. Este era

o argumento simples mas contundente de Copérnico" (citado em GUILLEN; 1998).

8.7. A Refutação à Filosofia Aristotélica

Uma das componentes principais da transformação do pensamento científico, no século XVI, de que Copérnico, Versálio, (1514-1564), e Galileu, (1564-1642), são os principais autores, resulta da contestação ao aristotelismo medieval. O renascimento abriu desde o início, um período de crise intelectual no Ocidente, ao qual não é estranho o conhecimento de obras não cristãs e muito diferentes das de Aristóteles. Tais factos conduziram à propensa negação do sistema aristotélico e cristão, defendido por São Tomás e adoptado pela Igreja.

Rompendo com o misticismo medieval e impondo uma referência geral para o conhecimento, o desenvolvimento científico passou a centrar-se na criação e desenvolvimento de padrões legítimos de comunicação e validação social. Como sistematiza Louçã (1997), em "Turbulência na Economia", "*a ciência moderna organizou-se em torno de três dogmas*:

- (1) *O naturalismo, i.e., a comparação e a associação epistemológica do conjunto do universo de elementos conhecíveis, nomeadamente da sociedade, à Natureza. Tal asserção significa: (a) que a observabilidade implica a reproduzibilidade das experiências; (b) que a observação é a génese do conhecimento completo, dado que permite a descrição de fenómenos sob leis gerais; (c) que o objectivo da ciência é a definição de leis correspondendo ao objectivo de controlar a Natureza; (d) que existe uma relação unívoca de submissão do objecto da investigação ao seu sujeito. O cientismo é uma forma mais familiar e difundida do naturalismo, que enfraquece ou trans-*

forma a segunda e a terceira destas proposições. Na realidade, trata-se de uma ideologia.

- (2) *O universalismo, i.e., a generalização das leis definidas pela observação e experiência, incluindo o conjunto do universo dos elementos disponíveis sob o mesmo critério de investigação. Tal proposição inclui a quantificação como a condição necessária e suficiente para a definição e descrição.*
- (3) *A objectividade, i.e., a neutralidade ética e prescritiva da investigação científica, que não diria respeito nem seria influenciada por nenhum tipo de valores sociais ou morais.*

A consequência geral destes dogmas é a abordagem reducionista ou atomista que ainda prevalece hoje nas ciências sociais, e em particular na economia.” (LOUÇÃ, 1997).

8.7.1. Os compromissos pitagóricos de Copérnico e Kepler

Desde a Antiguidade, o sistema cosmológico, conhecido e aceite, continuava a ser o de Ptolomeu. Para os antigos, o movimento dos planetas era descrito de uma maneira essencialmente fenomenológica. Na Antiguidade era generalizada a opinião de que os astros seguiriam, por ser o mais perfeito, um movimento circular uniforme (PETTERSON; 1995). O aperfeiçoamento das observações astronómicas vieram evidenciar discrepâncias cada vez maiores em relação aos modelos desenvolvidos com base em sistemas de epiciclos. Por outro lado, as grandes viagens tinham demonstrado na prática, a existência de grandes erros na outra grande parte da obra de Ptolomeu: a geografia. O sistema de Ptolomeu tornava-se cada vez menos aceitável e a visão do universo muda consideravelmente com as descobertas de Copérnico e Kepler.

Em 1473 Copérnico verifica que grande parte dos epiciclos da teoria ptolemaica poderiam ser eliminados se se admitisse que a Terra girava em volta do Sol. É neste contexto que publica em 1543 “*De revolutionibus orbium coelestium*”, onde argumenta a favor de um universo centrado no Sol, com a Terra girando, como qualquer outro planeta, num movimento circular em torno do astro central.

Copérnico simplifica consideravelmente a organização do sistema planetário propondo um sistema heliocêntrico onde todos os planetas se movem em volta do Sol. Os movimentos complexos de retroacção dos planetas vistos da Terra explicam-se mais facilmente, o que resulta num sistema muito mais simples. Com base neste sistema, Kepler desenvolve o modelo mais regular do movimento dos planetas e que constitui a visão mais simples e mais perfeita do movimento dos planetas. Seduzido pela elegância do sistema de Copérnico, Kepler partilha igualmente das convicções de Pitágoras e dos seus discípulos da Grécia Antiga, quanto à existência de uma ordem natural e de uma harmonia numérica subjacente aos fenómenos celestes. Para Kepler, se os movimentos planetários pareciam discordantes era, segundo ele, por não se saber *escutar a sua música*. O universo físico tinha sido concebido segundo um plano matemático simples e acessível à razão humana, tal como o movimento de um relógio (PETERSON; 1995). Tal como ele próprio escreveu:

“Estou agora muito empenhado na investigação das causas físicas; o meu objectivo é demonstrar que a máquina celestial não é semelhante a um ser divino, mas sim que é semelhante a um relógio (e quem acredita que um relógio é animado subscreve a glória do fabricante da peça). Nesta máquina, quase toda a variedade

do movimento fluí de uma força muito simples, precisamente como, num relógio, todos os movimentos fluem de um simples peso." (citado em LOUÇÃ, 1997: 22/23).

Beneficiando das teorias de Ptolomeu e de Copérnico e das observações precisas de Tycho Brahé, Kepler oferece uma resposta completa a questões que mobilizaram os astrónomos que desde os tempos mais recuados e os lugares mais diversos, dos Chineses aos Maias, dos Caldeus aos Árabes, persistiram no trabalho de encontrar harmonia onde não viam nenhuma (EKELAND; 1993). Os astrónomos clássicos até Kepler, recusaram-se a considerar outra figura além da circunferência e outro movimento além do uniforme. Para estabelecer uma relação numérica precisa entre a velocidade orbital e a distância ao Sol, Kepler investiga sobre as formas geométricas das duas órbitas para que uma recta unindo Marte à Terra e prolongada até às estrelas determine sempre a posição exacta de Marte relativamente às estrelas fixas, tal como se observa a partir da Terra.

Para a solução do problema, Kepler tira partido da natureza periódica das órbitas e das observações efectuadas por Tycho Brahé ao longo de trinta anos. Este terá sido o grande contributo científico de Tycho, a compreensão de que o estudo da astronomia exigia dados precisos e contínuos, o que permitiu determinar as posições planetárias, não apenas nos alinhamentos cruciais mas também, em diversos outros pontos das suas órbitas. Tycho elaborou tabelas e regras indicando a quantidade a somar ou a subtrair para ter em conta a refracção e outros efeitos ópticos. Kepler apesar da sua miopia e da sua pouca experiência em matéria de observação astronómica conhecia bastante bem o comportamento da luz: ao mesmo tempo que estava ocupado

com o problema de Marte, publica, em 1604, uma importante obra de óptica que contém várias descobertas fundamentais.

A posição de cada planeta era determinada em função da sua distância angular em relação a uma estrela de referência: ele necessitava, para comparar os movimentos planetários e localizá-los na carta, converter estas medidas em longitude e latitude definidas a partir da eclíptica. O utensílio matemático necessário para efectuar estas operações, a trigonometria esférica, estava disponível na época em que Kepler iniciou o seu trabalho. Para resolver o problema de Marte, Kepler tinha necessidade de bastante mais que a trigonometria.

As matemáticas da época, essencialmente a aritmética e a geometria euclidiana, aplicavam-se a problemas nos quais as distâncias variam de maneira mais monótona. O cálculo com números árabes tinha sido introduzido na Europa durante o século XIII, mas 300 anos mais tarde, a manipulação de fracções e a prática de divisões colocava ainda grandes dificuldades. As fracções decimais aparecem apenas em 1585. Os cálculos trigonométricos, exigiam horas de trabalhos e verdadeiras equipas de calculadoras humanas. Kepler lutava com dificuldades de dinheiro e a oposição dos herdeiros de Tycho, o que o obrigava a adicionar, subtrair, multiplicar e dividir sucessões intermináveis de números.

Antes de estudar a evolução das órbitas, Kepler tinha também de conceber os métodos que permitissem introduzir a variável tempo na geometria estática dos antigos matemáticos, de modo a descrever o mais fielmente possível as geometrias variáveis dos movimentos planetários. Outros problemas surgiram. Para provar a sua teoria do mo-

vimento orbital de Marte, antes de o aplicar a outros planetas, devia seleccionar os dados que validassem ou rejeitassem os seus conceitos. Tinha igualmente de fixar o intervalo máximo entre as medidas verificadas e os valores previstos, de modo a que a validade da teoria não fosse posta em causa.

Os prodigiosos esforços de Kepler para descobrir a harmonia dos movimentos planetários surgiram em 1609, com a publicação de uma volumosa obra, se bem que em 1605 tivesse já estabelecido os elementos chave que determinavam as posições de Marte. O seu livro, intitulado *Astronomia nova, aitiogetos seu physica colestis* (Astronomia Nova “explicando as causas” ou física celeste), não só resolvia o problema de Marte, como apresentava um convincente argumento contra as antigas astronomias descriptivas de Ptolomeu e de Copérnico em benefício de uma nova astronomia fundada sobre a física. Esta obra continha duas das três leis conhecidas como leis de Kepler: um planeta descreve uma órbita elíptica em torno do Sol, com o Sol num dos focos, e a órbita de um planeta varre áreas iguais em tempos iguais. Por outras palavras, um planeta desloca-se mais lentamente sobre a sua órbita elíptica quando está mais afastado do Sol e mais rapidamente quando está próximo. Estas conclusões representam um desafio radical da maior parte da mecânica celeste tal como se praticava na época de Kepler. Reduzem a órbita circular a um caso particular e colocam o Sol no centro geométrico, sobretudo físico, do Sistema Solar. Kepler descobriu que os planetas descreviam órbitas com a forma de *ovais* e não de círculos. Das três revelações, esta última era a que mais chocava com a ultrapassada visão aristotélica da perfeição celeste e constituiu um ataque audacioso contra a predominância do círculo no pensamento da astronomia. Aristóteles tinha ensinado que “o que é eterno é

circular, e o que é circular é eterno". O movimento circular era considerado como o único movimento natural e perfeito, e os séculos de dogmatismo tinham santificado esta interpretação, conferindo ao círculo o estatuto de objecto sagrado.

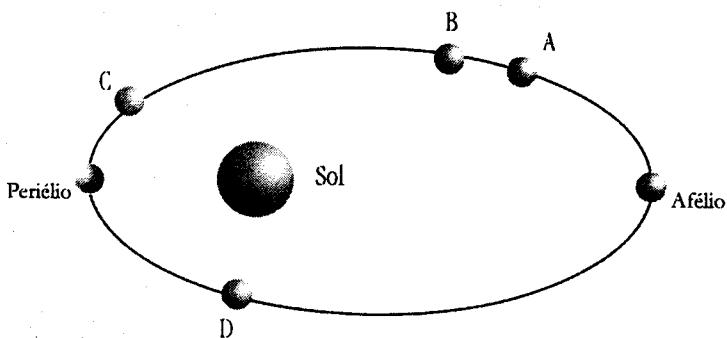


Fig. 8.5.: Órbita elíptica de Kepler

A publicação dos 70 capítulos de *Astronomia nova*, não teve o impacto esperado por Kepler. Mais intimidados do que impressionados, poucos leitores se arriscaram a navegar nos desenvolvimentos matemáticos do livro e para a maior parte dos sábios da época, o livro não se distinguia dos outros tratados revolucionários sobre astronomia. Em 1618, Kepler publica o seu *Harmonices mundi* (A harmonia do mundo), que contém o que se denomina hoje em dia como terceira lei de Kepler. Esta relação numérica liga um período de um planeta - o tempo necessário para percorrer uma órbita em torno do Sol - à sua distância ao Sol. Para qualquer planeta, o cubo da distância é proporcional ao quadrado do período orbital:

$$T^2 = \text{constante} \times d^3 \quad (1)$$

em que: T é a duração do ano planetário (tempo necessário ao planeta para completar uma revolução em torno do Sol; e, d a distância do planeta ao Sol. Assim, e de acordo com a expressão (1) o quadrado do ano planetário seria sempre igual a um determinado múltiplo da distância do planeta ao Sol. Ou seja, os planetas mais afastados do Sol teriam anos maiores, enquanto os planetas mais próximos teriam anos mais curtos²².

Kepler demonstrou que a sua teoria planetária e as suas técnicas matemáticas revolucionárias funcionavam melhor que as teorias tradicionais num ponto essencial: a previsão do movimento dos planetas. Apesar das suas descobertas serem perigosamente sacrílegas, conseguiu evitar os inquisidores católicos e concentrar-se, nos anos seguintes, no aperfeiçoamento da defesa do heliocentrismo. Segundo ele, os planetas mantinham-se nas respectivas órbitas por acção de uma determinada força magnética emanada pelo Sol, contrariando assim a teoria das esferas etéreas²³.

Kepler desenvolveu toda uma teoria descritiva sobre o sistema solar. Maiores avanços na cosmologia só seriam possíveis se voltasse à Terra, como descreve Stewart em “*Deus Joga aos Dados?*”:

“Um sistema de lei natural para os assuntos celestes, outro para os mundanos. Kepler com os olhos no céu, Galileu com o ouvido no chão. Era quase impensável que

²² Mercúrio, o planeta mais próximo do Sol, tem um ano de 88 dias terrestres; Plutão, o mais afastado, tem um ano de duração igual a 90 410 dias terrestres (GUILLEN; 1998).

²³ Esta teoria não era partilhada por todos os seus contemporâneos, como por exemplo René Descartes, para quem os corpos celestes se situavam na base de tornados gigantes e invisíveis. O facto dos planetas girarem em torno do Sol era devido unicamente a serem capturados pelo remoinho solar. Do mesmo modo, a Lua giraria em torno da Terra porque teria sido captura-

pudesse haver uma ligação entre os dois domínios. O céu era puro, imaculado, a casa de Deus e dos anjos, a Terra, a casa do homem pecador" (STEWART; 1991, p.57). Kepler e Galileu transformaram esta concepção para sempre.

8.8. O Ataque à Filosofia Aristotélica

Galileu Galilei (1564-1642) inicialmente seguidor de Aristóteles, viria a afastar-se do pensamento aristotélico. A principal causa desta dissociação, assentou na compreensão do *movimento*. Os gregos antigos comprehendiam bem coisas estáticas – formas geométricas rígidas, ou corpos em *equilíbrio* – mas não possuíam uma noção correcta das leis que regem o modo como os corpos se movimentam; faltava-lhes uma teoria do movimento. Em parte, esta insuficiência resultava da inexistência de um método suficientemente preciso para medir o tempo, de modo a poder cronometrar rigorosamente as mudanças das posições dos corpos e a determinar com precisão as suas velocidades e acelerações. Em 1583, Galileu verificou que a utilização de um pêndulo constituía um instrumento fiável de medição do tempo e de cronometragem precisa do movimento. Posteriormente, em 1619, concebeu e desenvolveu um pequeno e tosco telescópio. Com o auxílio desta nova ferramenta pôde contemplar quatro diminutas Luas²⁴ a circularem à volta de Júpiter, exactamente como Copérnico tinha imaginado a Lua a circular à volta da Terra.

O seu talento para raciocínios claros e a preferência por explicações lógicas simples, a argumentos floreados, levaram-no a questionar a explicação dos acontecimentos em termos de designio religioso: a chuva

da pelo tornado invisível terrestre. Os corpos *caíam* para a Terra sempre que não tinham a infelicidade de serem *sugados* pelo tornado (GUILLEN, 1998)

cai *porque* tem como objectivo regar as searas, uma pedra lançada ao ar cai *porque* este é o lugar natural de repouso (STEWART; 1991). Galileu encontrara motivos poderosos, nos fenómenos ocorridos na Terra, para duvidar de Aristóteles. As investigações sobre os objectivos das coisas não dariam à humanidade qualquer controlo sobre os fenómenos naturais. Em vez de se interrogar sobre o *porquê*, procurou uma descrição exacta de *como* cai a pedra, ou seja preocupou-se com o controlo dos fenómenos naturais.

Ao medir a velocidade a que diferentes esferas metálicas de dimensões diferentes desciam planos com diferentes inclinações, descobriu que os objectos mais pesados não caem mais depressa do que os leves. Galileu verificou que a força que actua num corpo (força gravítica) controla a aceleração do corpo, mas não controla directamente a sua velocidade, contrariamente ao senso comum e à tão divulgada teoria de Aristóteles, todos os objectos caíam em direcção à Terra com velocidades idênticas.

Para provar a sua teoria concentrou a atenção num pequeno número de quantidades-chave: tempo, distância, velocidade, aceleração, momento, massa e inércia, o que o levou a concluir que a força que actua sobre um corpo determina a sua *aceleração* e não a sua velocidade - duas grandezas vectoriais distintas. A *velocidade* de uma partícula - ou de um ponto de um corpo - é a taxa de variação temporal da posição desse ponto. A velocidade é normalmente considerada uma grandeza vectorial, o que significa que se deve ter em conta, não só o seu valor, mas também o seu *sentido*. A aceleração é a taxa de variação da velocidade em ordem ao tempo - e portanto a aceleração é, na realidade, a *taxa de variação da taxa de variação* da posição em ordem ao tempo. Em particular, se não há forças a actuar no corpo, a velocidade mantém-se constante - e portanto da au-

²⁴ Os primeiros corpos celestes que se soube não orbitarem a Terra.

ência de força resulta um movimento rectilíneo e uniforme. Os corpos em movimento livre continuam a deslocar-se uniformemente, sem precisarem de forças para os manterem em movimento. Na ausência de resistência do ar, uma massa leve e outra pesada cairão com igual velocidade e um corpo em movimento no vácuo tende a conservar indefinidamente o mesmo movimento (*princípio da inércia*).

Na verdade, uma das consequências das leis da dinâmica de Galileu, e posteriormente de Newton, é que o movimento rectilíneo uniforme é, do ponto de vista físico, completamente não distinguível do estado de repouso (isto é, a ausência de movimento): não há forma local de distinguir o repouso do movimento uniforme. Galileu descreveu esta imagem por comparação com um navio que navega no mar:

"Feche-se com alguns amigos na cabina principal de um grande navio, abaixo da coberta, levando consigo umas moscas, borboletas e outros pequenos animais voadores. Leve uma grande taça de água com peixes dentro; pendure uma garrafa que pingue, gote a gota, para um recipiente grande colocado debaixo dela. Com o navio parado, observe cuidadosamente como os animaizinhos voam com a mesma velocidade para todos os lados da cabina. Os peixes nadam indiferentemente em qualquer sentido; as gotas caem no recipiente;... Quando tiver observado tudo isto com cuidado... mande avançar o navio com a velocidade que quiser, desde que o movimento seja uniforme, e não oscile para um lado ou para o outro. Não conseguirá descortinar a mínima alteração em qualquer dos fenômenos referidos, nem poderá distinguir, por qualquer deles se o navio se move ou está parado... As gotas cairão como antes no recipiente, sem se desviarem para a popa, embora o navio ande muitos palmos enquanto elas estão no ar. Os peixes, dentro de água, nadarão para a frente da sua taça com o mesmo esforço com que o farão para trás, dirigindo-se com a mesma facilidade a iscas colocadas junto do bordo da taça. Por último, as borboletas e as moscas continuarão os seus voos indiferentemente para qualquer lado, sem

que alguma vez aconteça concentrarem-se do lado da popa, como se estivessem cansadas de acompanhar o navio, do qual estão separadas por longos períodos de tempo enquanto andam no ar." (citado em PENROSE, 1997, pág. 218).

Este facto notável conhecido como *princípio de relatividade de Galileu*, veio dar credibilidade, em termos de dinâmica, ao modelo heliocêntrico desenvolvido por Copérnico. No "Diálogo sobre os Dois Sistemas do Mundo" sobre a teoria heliocêntrica, Galileu escreveu:

"Parece-me que considerar mais razoável que o universo se move a fim de permitir que a Terra permaneça fixa será bem mais irracional do que subir ao topo de uma cúpula para obter uma vista melhor da cidade e dos subúrbios e ordenar então a toda a paisagem que gire em redor, para não ter a maçada de rodar a cabeça" (citado em STEWART; 1991, pág. 57).

Antes de Galileu propor a sua teoria da dinâmica, os defensores do modelo heliocêntrico defrontavam-se com o problema de não se aperceberem do movimento da Terra. Se a anterior dinâmica aristotélica - *a velocidade de um sistema em movimento no espaço afecta o seu comportamento dinâmico* - fosse correcta facilmente seria perceptível o movimento da Terra. O princípio de relatividade de Galileu explica como a Terra pode estar em movimento sem que esse movimento se aperceba directamente²⁵. Galileu evidenciou uma notável perspicácia para o essencial, sobretudo se se atender que muitas daquelas variáveis não se prestavam na altura a uma medição quantitativa.

²⁵ Em rigor, isto só é verdade se se puder considerar que o movimento da Terra é aproximadamente rectilíneo e uniforme e, em particular, que ela não roda. O movimento de rotação da Terra tem, de facto, efeitos dinâmicos detectáveis (relativamente pequenos), o mais importante dos quais consiste na deflexão dos ventos em "sentidos contrários" no hemisfério Norte e no hemisfério Sul (PENROSE; 1997).

De acordo com o espírito da geometria grega – em que todos os objectos são idealizados de tal modo que uma linha não tem largura e um plano não tem espessura - Galileu idealizou a sua mecânica, optando por desprezar, na pesquisa das simplicidades subjacentes, efeitos como a resistência do ar. Para desembaraçar a meada de influências inter-relacionadas que controlam o mundo natural é preferível começar por estudar um fio de cada vez (STEWART; 1991).

Nos tempos medievais descrevia-se a trajectória de um projéctil em três partes: uma linha recta inicial, uma porção de círculo e uma queda vertical. Galileu descobriu que a velocidade de um corpo em queda aumenta a uma taxa constante, ou seja, a *aceleração* é constante, o que permitiu deduzir a trajectória correcta de um projéctil como uma parábola. Estes princípios levariam, três séculos mais tarde, Einstein à generalização do princípio de relatividade a referenciais acelerados, tornando-se na pedra angular da sua teoria relativística.

Galileu inaugurou a ciência moderna opondo-se ao obscurantismo do seu tempo, lutou pela verdade e *forjou* para a ciência, o direito de afirmação (THOM, in *Será Preciso Queimar Descartes?*, 1993). Embora condenado e derrotado, com Galileu, iniciou-se a passagem do misticismo antigo para a ciência moderna. As teorias desenvolvidas por Copérnico, Brahe, Kepler e Galileu vieram substituir toda a perfeição de um *reino celestial* idealizado por Platão e Aristóteles, constituído por uma essência miraculosa designada por éter sob a direcção sublime de Deus, por um céu invadido de cometas, órbitas e uma Terra em movimento de translação e rotação.

Nos últimos oito anos de vida Galileu foi colocado sob prisão domiciliaria, cegou e faleceu em 1642, ano de nascimento de Isaac Newton, que consolidou o distanciamento crescente entre ciência e religião.

8.9. Síntese do Capítulo

8. EVOLUÇÃO DO PENSAMENTO E DAS TEORIAS CIENTÍFICAS
 - 8.1. Os filósofos de Mileto
 - 8.2. Platão e a orientação pitagórica
 - 8.3. Sistematização dedutiva
 - 8.3.1. O método indutivo-dedutivo de Aristóteles
 - 8.3.2. Os modelos matemáticos de Ptolomeu
 - 8.4. O declínio da Escola de Alexandria e o avanço do império muçulmano
 - 8.5. O despertar da Europa
 - 8.6. Os primórdios da emancipação da ciência
 - 8.7. A refutação à filosofia aristotélica
 - 8.7.1. Os compromissos pitagóricos de Copérnico e Kepler
 - 8.8. O ataque à filosofia aristotélica

A preocupação em identificar o princípio, ou os princípios unificadores, à sombra dos quais tudo pode ser explicado, desde o movimento dos astros até à gênese da vida, atravessa a história do pensamento científico e dá lugar, consoante a maior ou menor abertura ou tolerância à informação externa, a teorias e doutrinas.

No período entre os séculos VII a III a.C. ocorreram dois factos, a substituição da escrita grosseira por uma escrita baseada em alfabeto e a introdução da moeda cunhada, que estimularam o comércio e fizeram emergir uma nova classe de mercadores. Surgiram as cidades estado autónomas, entre as quais se destaca Mileto, na Grécia, pelas escolas filosóficas que nela se desenvolveram.

Para os filósofos de Mileto, a constituição da matéria foi uma questão primordial, em torno da qual se confrontaram as escolas de Tales e de Pitágoras.

Com Platão, inicia-se uma revolução religiosa e científica. Os filósofos platónicos, observando o comportamento regular do sol, da lua e das estrelas, afirmaram a racionalidade subjacente do universo e acreditaram na importância de a descobrir.

Entretanto, ao abrigo das guerras, a cidade de Alexandria acolheu pensadores e estudiosos. Em consequência, desenvolveu-se nesta cidade uma escola que viria a desempenhar um papel determinante na evolução do pensamento científico e filosófico. Aristóteles, discípulo de Platão, exerceu uma influência dominadora. Introduziu o método de pensamento lógico, indutivo-dedutivo, e concebeu o primeiro modelo do universo, o qual seria geocêntrico e dividido em duas partes distintas: a parte central, ocupada pela Terra e pela atmosfera, a parte celestial, onde se situavam os corpos celestes, todos eles girando em torno da Terra, em órbitas perfeitamente circulares. No reino terreno, tudo era corruptível, tal como os quatro elementos básicos que constituem a realidade física. Pelo contrário, o reino celestial era inteiramente constituído por um quinto elemento, o éter, o qual, assumindo diversos graus de densidade, formava o sol e as estrelas, a lua e os restantes planetas.

Esta ordem perfeita decorria do poder dos deuses os quais garantiam a plena harmonia do movimento dos corpos celestes. Seguindo a linha de pensamento de Platão, Aristóteles alia, de forma duradoura, ciência e religião.

O movimento erradio dos planetas, relativamente à ordem representada pelas estrelas, levou Ptolomeu a conceber um sistema de universo não exactamente geocêntrico. Recorrendo a três figuras da geometria, Ptolomeu construiu uma explicação cuja validade perdurou durante catorze séculos.

Com o desaparecimento do Império Romano, no sec. V, a Escola de Alexandria inicia um longo período de declínio que terminaria, em 640, com a conquista da cidade e a destruição da biblioteca e outras dependências da Escola, pelos muçulmanos. Nesta época, o Império Árabe estendeu-se, por conquistas sucessivas, dos Pirinéus à China. Estas conquistas proporcionaram a transferência, para as mãos dos muçulmanos, dos contributos da cultura antiga, não só grega, como também hindu, persa, etc.

A partir do sec. XI, inicia-se o despertar da Europa. As cruzadas sucessivas incrementaram o comércio no Mediterrâneo oriental entre certas cidades italianas e os países muçulmanos. Estas permutas permitiram aos ocidentais resgatar a herança cultural grega enriquecida pelo saber árabe.

Do sec. XI ao sec. XIII, a Europa conheceu um período de intensa actividade científica e tecnologica. Foram fundadas, nesse período, várias Universidades europeias, onde se ensinava, a par da matemáticas e da geometria euclidiana, a retórica de Platão e a lógica de Aristóteles. Graças à intervenção de S. Tomás de Aquino, a

Igreja recuperou as teorias aristotélicas do universo, substituindo as divindades gregas pelo Deus único, Judaico-cristão.

Os séculos XIV e XV são caracterizados por um grande desenvolvimento das actividades comercial e industrial associado a um notável progresso na arte de navegar. Surge uma nova classe capitalista, composta por mercadores, banqueiros e industriais que faziam trabalhar assalariados. Inicia-se então o progressivo divórcio entre a religião e a ciência, que seria consumado com Galileu.

De permeio, o geocentrismo do universo, viria a ser posto em causa, primeiro por Copérnico e depois por Kepler. Copérnico altera radicalmente a organização do sistema planetário, propondo um sistema heliocêntrico. Kepler, seduzido pelas ideias de Copérnico, desenvolve o modelo heliocêntrico, substituindo as órbitas circulares por órbitas elípticas e admitindo que os planetas se mantêm nas suas órbitas por uma força emanada do sol.

Galileu, por sua vez, introduz a medida do tempo com recurso ao pêndulo e, consequentemente, a cronometragem do movimento dos corpos. Formula as leis da queda dos grãos, que veio dar credibilidade ao heliocentrismo.

Galileu inaugurou a ciência moderna opondo-se ao obscurantismo do seu tempo. Embora condenado, com Galileu inicia-se a passagem do misticismo antigo à ciência moderna.

9. A CONCEPÇÃO MECANICISTA – A era Newtoniana

A metáfora profundamente enraizada de um mundo mecânico vem de tempos muito remotos podendo indicar-se por ventura como ponto de partida a Grécia Antiga, com Tales de Mileto, e culminado em Newton que arquitectou o universo como uma máquina gigantesca, funcionando *como um mecanismo de relógio*, para representar o auge em fiabilidade e perfeição mecânica.

Com Descartes (1596-1650) e com Newton (1642-1727), inicia-se o período da revolução científica que estabelece a fronteira entre a Idade Média e a ciência moderna. Na Idade Média, Igreja e Estado estavam profundamente ligados como mestre e servidor. Os monarcas atribuíam-se ou reivindicavam um direito divino como fundamento do seu poder. O Estado era a emanação da Igreja, um instrumento de gestão de negócios seculares por conta de uma autoridade superior, administrada por homens que falavam em nome de Deus.

Ao longo dos três séculos que separam Newton da era actual, a ciência destronou a Igreja, tornando-se ela própria um tipo de religião secular. Pouco a pouco a ciência assumiu as funções pertencentes ao foro da Igreja medieval. Com o decorrer do tempo, a ciência e o Estado estabeleceram por seu turno

relações de mestre e de servidor. A fonte de legitimidade para a política de um Estado é tudo o que apresenta um aspecto propriamente científico. Durante os três séculos que nos separam de Newton, o método científico tornou-se um modo de pensamento de tal forma divulgado que as suas metáforas entraram nas novas formas de olhar a humanidade, a economia, a guerra e a paz. Tal foi o poder desta revolução científica: a visão do mundo dos políticos, dos filósofos e dos homens de negócios parecem frequentemente derivados da teoria científica descritiva (FORTI²⁶, 1996).

Galileu tinha descoberto que um corpo que se move sob o efeito da gravidade terrestre sofre uma aceleração constante. Newton pretendia ir mais longe: formular um código de leis que regesse um corpo sujeito a qualquer combinação de forças. Em certo sentido, tratava-se de um problema geométrico, em vez de dinâmico. Se um corpo se desloca a uma velocidade uniforme a distância que percorre é o produto dessa velocidade pelo tempo decorrido. Se se move a uma velocidade não uniforme, não existe uma fórmula simples correspondente. Os matemáticos anteriores a Newton tinham feito vários progressos significativos, mostrando que várias questões dinâmicas básicas podiam ser propostas em forma geométrica. Todavia, os problemas geométricos raramente eram fáceis de resolver (STEWART, 1991).

Um gráfico que descreva a forma como a velocidade de um corpo varia com o tempo tem a forma de uma curva. Através do recurso à geometria, é possível demonstrar que a distância total percorrida é proporcional à área sob a curva. De modo semelhante, a velocidade é a tangente a outro gráfico que represente a distância em função do tempo. Como é possível representar estas áreas e tangentes? Newton e Leibniz, independentemente, resolveram estes problemas dividindo o tempo em intervalos cada vez mais pequenos. A área

²⁶ In “La Mort de Newton”

sob a curva torna-se então a soma das áreas de um grande número de faixas verticais estreitas. Demonstraram que o erro cometido por essa aproximação se torna cada vez mais pequeno à medida que se vai reduzindo o intervalo e argumentaram que “no limite”, pode fazer-se desaparecer o erro por completo. De igual modo, o declive de uma tangente pode ser calculado considerando dois valores de tempo próximos e tornando a diferença entre eles arbitrariamente pequena. Nenhum conseguiu fornecer uma explicação logicamente rigorosa para o respectivo método, mas ambos estavam convencidos de que o método era correcto. Leibniz falou de mudanças “infinitesimais” no tempo; Newton tinha uma imagem mais física de quantidades que fluíam continuamente, que designou por fluentes e fluídos. Estes métodos de cálculo, agora conhecidos como *integração* e *diferenciação*, resolveram os problemas práticos de determinar distâncias a partir de velocidades ou velocidades a partir de distâncias, tendo colocado uma enorme quantidade de fenómenos naturais ao alcance da análise matemática (STEWART, 1991).

9.1. As Leis científicas gerais de Descartes

Os comentários sobre o método científico de Newton foram dirigidos principalmente contra Descartes e seus seguidores. Recorde-se que Descartes derivou vários princípios físicos importantes a partir do seu entendimento de extensão. Descartes parecia acreditar que, pelo facto dos conceitos de extensão e de movimento serem claros e distintos, então certas generalizações eram verdades *a priori*. Uma generalização deste género significa que todo o movimento é causado por impacte ou pressão. Descartes defendeu que uma vez que não há vácuo, um corpo mantém-se em contacto com outros corpos e a única forma de o corpo se mover só poderia resultar pela pressão exercida por um dos corpos adjacentes, ou

seja a pressão exercida por um dos lados era superior à do outro lado. Ao restringir as causas do movimento ao impacto e à pressão, negou a possibilidade de acção à distância (LOSEE, 1998).

Outro princípio físico importante derivado da ideia da extensão dos corpos é o de que todo o movimento resulta de um rearranjo cíclico dos corpos. Descartes raciocinou que, se um corpo muda de posição, então é necessário um deslocamento simultâneo de outros corpos para evitar o vácuo. Para além disso, só por movimento ao longo de uma curva fechada é que um conjunto finito de corpos pode alterar as suas posições sem criar o vácuo. Descartes manteve que Deus é a causa última do movimento no universo. Ele acreditava num ser omnisciente, todo-poderoso e extremamente perfeito e que Deus seria esse Ser todo perfeito, que teria criado o Universo todo de uma só vez. Descartes concluiu que, uma vez que toda a matéria do universo foi posta em movimento de uma só vez, um Ser Perfeito asseguraria que este movimento se conservasse perpetuamente (DESCARTES, 1998).

Deste princípio geral do movimento, Descartes deriva três outras leis de movimento:

Lei I – Os corpos em repouso tendem a permanecer em repouso e os corpos em movimento permanecem em movimento, a menos que sejam actuados por outros corpos;

Lei II – O movimento inercial é um movimento rectilíneo.

Lei III(A) – Se um corpo em movimento colidir com outro corpo que tenha maior resistência ao movimento, então, tem força para mudar de direcção sem perder o movimento.

Lei III(B) - Se o primeiro corpo tem maior força do que a resistência do segundo, então o primeiro corpo arrasta consigo o segundo, perdendo tanto movimento quanto o segundo corpo, ganha.

A partir destas leis, Descartes desenvolve sete regras de impacte para tipos exclusivos de colisão. Ao estabelecer o que ele acreditava estar implicado nos conceitos de “extensão” e “movimento”, Descartes formulou um conjunto de regras que estão em desacordo com os movimentos observados nos corpos (LOSEE, 1998). As leis científicas por ele elaboradas eram consequências dedutivas dos seus princípios filosóficos. No seu Discurso do Método, escreveu:

“Primeiro tentei descobrir na generalidade os princípios ou causas primeiras de tudo quanto está e pode estar no mundo, sem considerar nada que possa completar este fim senão o Próprio Deus que criou o mundo, ou deriuá-las de qualquer fonte à exceção de certos germes de verdade que existem naturalmente nas nossas almas” (DESCARTES, 1994).

Descartes concebeu a pirâmide das verdades científicas e concluiu que se pode prosseguir por dedução apenas até curta distância do vértice da pirâmide. Descartes salientou que não se pode determinar, a partir de mera consideração das leis gerais, o curso dos processos físicos. A lei da conservação do movimento, por exemplo, estipula que seja qual for o processo, um corpo não perde quantidade de movimento. Mas o modo como a quantidade do movimento é distribuída entre os corpos envolvidos tem de se determinar para cada tipo de processo. Para se deduzir uma afirmação sobre um efeito particular é necessário incluir entre as premissas, alguma informação sobre as circunstâncias em que o acontecimento ocorreu. A sequência *observação* e *experimentação*, é um dos aspectos importantes da Teoria do Método Científico de Descartes, que permite fornecer

conhecimento das condições sob as quais acontecimentos de certo género têm lugar. No entanto, Descartes negou a possibilidade do estabelecimento de leis fundamentais da natureza por recolha e comparação dos casos, tal como foi defendido por Bacon (LOSEE, 1998).

Um segundo papel importante da observação e da experimentação na teoria do método científico de Descartes, prende-se com a sugestão de hipóteses que especifiquem mecanismos consistentes com as leis fundamentais. Segundo Descartes, uma hipótese é justificada pela sua capacidade de, em conjunto com as leis fundamentais, explicar os fenómenos. A hipótese deve ser consistente com as leis fundamentais mas o seu conteúdo específico deve ser adaptado de modo a que permita a dedução das proposições acerca dos fenómenos em causa (LOSEE, 1998).

9.2. Sistema do Mundo Segundo Newton

Em 1987, decorreu o tricentenário da publicação dos *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Isaac Newton, editado em três volumes.

Passados mais de três séculos sobre a sua publicação, o livro deixou de ser um *best seller*, mas anualmente continuam a vender-se cerca de 700 exemplares, sobretudo a estudantes de institutos superiores que estudam os mestres a partir das fontes originais. Esta longevidade é impressionante e sobretudo também o é a mensagem completamente interiorizada pela nossa cultura: *A Natureza tem leis e podemos descobri-las.* (STEWART, 1996). Este trabalho demonstrou como, a partir de um número limitado de princípios físicos básicos, se pode compreender, e frequentemente prever, com um grande grau de precisão, muito do comportamento real dos objectos físicos.

Sobre as impressionantes fundações lançadas por Galileu, Newton construiu uma capital grandiosa. Newton legou-nos três leis que regem o comportamento dos objectos materiais (PENROSE; 1997). Baseando-se no trabalho com esferas metálicas, desenvolvido por Galileu, Newton observou o movimento de objectos sob a acção de *qualquer* força, e não apenas a gravidade. Como resultado, formulou um código de leis, no 1º volume, resumido em três simples truismos, o que rege um corpo sujeito a qualquer combinação de forças:

Truismo n.º 1. Num universo onde não existam forças susceptíveis de actuar sobre os corpos, um objecto imóvel permanecerá nesse estado indefinidamente, enquanto um objecto que não está imóvel continuará a deslocar-se indefinidamente, segundo uma trajectória rectilínea e com velocidade constante.

Truismo n.º 2. Num universo onde existam forças susceptíveis de actuar sobre os corpos, um objecto ao qual é aplicada uma força ir-se-á sempre acelerar ou desacelerar, conforme a forma como a força é aplicada.

Truismo n.º 3. Se dois objectos colidirem entre si, ambos sentirão a força do impacte com a mesma intensidade, mas em direções opostas. (Ou, como se haveria de tomar numa paráfrase generalizada anos mais tarde, “para cada ação existe uma reacção igual e oposta”) (PENROSE, 1997).

Johannes Kepler, descobriu que as órbitas descritas pelos planetas no seu movimento em torno do Sol são elípticas (ocupando o Sol, não o centro, mas um dos focos da elipse) e formulou as leis que regem os ritmos a que são percorridas. Com a descoberta da lei de atracção universal, Newton veio provar que as três leis de Kepler são uma consequência do seu próprio sistema de leis gerais (incluindo a força de atracção dada pela lei da gravitação universal). Mais ainda, obteve toda uma série de correções pormenorizadas às órbitas elípticas de Kepler, bem como outros

efeitos, tal como a precessão dos equinócios (uma alteração lenta da direcção do eixo de rotação da Terra, que os gregos tinham observado ao longo dos séculos). Para conseguir realizar tudo isto, Newton teve que desenvolver muitas ferramentas matemáticas – para além do cálculo diferencial. O fenomenal sucesso de Newton deveu-se em grande parte à sua fabulosa capacidade matemática e à sua excelente intuição física. A formulação das leis newtonianas do movimento realiza a síntese de dois movimentos convergentes, o da física – a descrição do movimento, com as leis de Kepler, e a da queda dos corpos, formulada por Galileu – e o das matemáticas que levam ao cálculo “infinitesimal” (PRIGOGINE e STENGERS, 1986).

Newton explicou todo o movimento dos corpos com a sua teoria da gravitação universal. *Toda a partícula no universo atrai qualquer outra partícula na razão directa da sua massa e na razão inversa do quadrado da distância mútua.* A receita do *inverso do quadrado* é o que dá à teoria de Newton a sua precisão; mas a universalidade - que seja válida para *qualquer* partícula - é o que lhe confere o seu poder. A teoria da gravitação universal pode ser aplicada a qualquer configuração de partículas e corpos. Em princípio, pelo menos, é mais fácil estabelecer uma equação do que resolvê-la. Para duas partículas, a equação pode ser resolvida, originando órbitas elípticas que obedecem às três leis descobertas empiricamente por Kepler. Inversamente, as leis de Kepler mostram que se uma força for a causa do movimento planetário, ela tem de obedecer a uma lei de *inversos dos quadrados* (STEWART; 1996). Aplicada ao movimento de um único planeta em torno do Sol, a lei de Newton permite reencontrar as três leis de Kepler. A grande novidade reside no facto de que a lei de Newton é suposta ser um princípio universal, aplicando-se de igual modo à trajectória de uma bala de canhão como ao movimento da Lua ou dos planetas, enquanto as leis de Kepler são descrições empíricas.

Da força de atracção que se exerce sobre um corpo, realidade física, pode deduzir-se a aceleração do seu movimento, conceito matemático, e calcular a sua trajectória completa a partir da posição e da velocidade iniciais. Assim, em física newtoniana, o conhecimento do estado actual do sistema solar deve permitir prever a sua evolução futura: é a introdução na ciência do conceito de *determinismo* (EKELAND; 1995).

Em cada momento, a descrição do estado de um móbil comprehende não somente a sua posição, designada por r , mas a “tendência instantânea” a mudar de posição, isto é, a velocidade v nesse momento e ainda a tendência a modificar essa velocidade, ou seja, a aceleração a . Velocidade e aceleração instantâneas são “conceitos limite”, que medem uma variação instantânea como a relação entre duas quantidades infinitesimais: a variação da posição ou da velocidade, durante um intervalo de tempo t , que tende para zero, e esse próprio intervalo yt . Tais grandezas denominam-se *derivadas em relação ao tempo* e desde Leibniz que se representam por $v = dr/dt$. Quanto à aceleração, $a = dv/dt = d^2r/dt^2$, derivada de uma derivada, ou segunda derivada.

Segundo Prigogine e Stengers (1986), o problema sobre o qual se concentra a física newtoniana é o do cálculo da segunda derivada, da aceleração sofrida em cada instante pelos diferentes pontos de um sistema material. O movimento de cada um desses pontos durante um intervalo de tempo finito será então calculável por integração, isto é, o somatório das variações infinitesimais de velocidade sofridas durante esse intervalo. O caso mais simples é aquele em que a é uma constante (assim, por exemplo, para a queda de um corpo, a é a constante gravitacional g). Geralmente a própria aceleração varia no decurso do tempo e o trabalho do físico é precisamente determinar a natureza dessa variação. Na física newtoniana, es-

tudar a aceleração é determinar as diferentes “forças” que agem sobre os pontos do sistema em análise. Tradicionalmente denominada por segunda lei de Newton, $F = ma$, expressa, em cada momento, a igualdade entre a força aplicada a um ponto e a aceleração por ela produzida, proporcional à massa. *Esta equivalência entre força e aceleração dá a versão matemática da estrutura causal própria do mundo da dinâmica, mundo onde nada se produz, onde movimento algum começa, varia ou termina senão como efeito de uma força, e isto em cada instante* (PRIGOGINE e STENGERS, 1986).

No caso de um sistema de pontos materiais, o problema complica-se por, a cada instante, os valores das forças aplicadas variarem em função das acelerações que essas forças determinam no instante precedente. As forças estudadas pela física newtoniana são, com efeito, função da configuração espacial do sistema de corpos entre os quais elas agem, e variam, portanto, quando variam as distâncias entre esses corpos.

Ora, de acordo com Prigogine e Stengers (1986), um problema dinâmico põe-se sob a forma de um sistema de equações diferenciais; *o estado instantâneo de cada um dos pontos do sistema é descrito pela sua velocidade e aceleração, isto é, pelas primeiras e segundas derivadas. Esse sistema de equações descreve a situação seguinte: em cada instante, um conjunto de forças, função da distância entre os pontos do sistema (função de r, portanto), produz uma aceleração particular dv/dt para cada um desses pontos; o conjunto dessas acelerações determina, por seu turno, a modificação das distâncias entre os pontos e por consequência, as resultantes do conjunto das forças que agem no momento seguinte* (PRIGOGINE e STENGERS, 1986).

Deste modo, o conjunto das equações diferenciais expõe o problema dinâmico, enquanto que a sua “integração” constitui a solução do problema. A integração das equações do movimento resulta no cálculo do

conjunto das *trajectórias* $r(t)$ dos pontos do sistema. As trajectórias espaço-temporais dum conjunto dos pontos em interacção contêm a totalidade das informações que a dinâmica reconhece como pertinentes: elas constituem a descrição completa do sistema dinâmico. Toda a descrição dinâmica implica, então, dois tipos de dados empíricos: *a descrição das posições e das velocidades* de cada um dos pontos de um sistema *non dado momento*, frequentemente denominado “instante inicial”, pois que a integração das equações dinâmicas desdobrará, a partir do “estado inicial”, a sucessão dos estados, isto é, o conjunto das trajectórias pontuais; e, *a natureza das forças dinâmicas*, ou seja, a maneira como as acelerações instantâneas que elas provocam podem ser deduzidas do estado instantâneo do sistema.

Quanto à natureza das forças dinâmicas o triunfo da ciência newtoniana foi a descoberta de que uma só força, a da gravitação, determina o movimento dos planetas, dos cometas e dos corpos que caem na Terra. Qualquer que seja o par de corpos materiais, a distância entre eles e as suas respectivas massas, uma força de atracção une-os e atraio-os mutuamente em função dessa força, proporcional ao produto das suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa.

A dinâmica newtoniana apresenta-se, portanto, como duplamente universal. A definição da lei da gravitação, descreve como as massas tendem a aproximar-se uma das outras, não contém referência alguma à escala dos fenómenos, pelo que tanto se aplica ao movimento dos átomos como ao dos planetas e estrelas de uma galáxia: todo o corpo, qualquer que seja a sua dimensão, tem uma massa, isto é, está sujeito às leis de interacção newtoniana. Por outro lado, ao definir um sistema dinâmico pelo facto de o movimento de cada um dos seus pontos ser determinado a cada instante pela posição e velocidade do conjunto dos pontos materiais que o

constituem, torna como único sistema dinâmico, rigoroso, o próprio universo na sua plenitude. Dado que os corpos se influenciam mutuamente no universo, qualquer que seja a distância que os separa, os sistemas dinâmicos locais, como o sistema planetário, não podem ser definidos senão por aproximação, não levando em conta o conjunto das forças pequenas em relação àquelas cujo efeito é calculado.

“Na Nova Aliança”, Prigogine e Stengers (1986), insistem neste ponto: qualquer que seja o sistema dinâmico, a forma das leis do movimento, $F = ma$, continua válida. Poderiam ser descobertos outros tipos de forças para além da força de gravitação – e foram-no efectivamente, como as forças de atracção e repulsão eléctricas, entre outras –, o que modificou o conteúdo empírico das leis do movimento, mas não a forma, o que define na essência, o mundo da dinâmica, ou seja a redução da mudança a um conjunto de trajectórias. Esta significação assenta em três atributos da trajectória dinâmica: *a legalidade, o determinismo, a reversibilidade* (PRIGOGLINE e STENGERS, 1986).

A lei da dinâmica que rege a trajectória deduz o conjunto das acelerações instantâneas das forças de interacção entre os pontos do sistema. Deste modo, admite-se como determinada a natureza das forças e a maneira como elas variam em função da distância entre esses pontos. Contudo, não chega a descrever esta ou aquela evolução dinâmica particular, mas define somente todas as evoluções possíveis. Para calcular uma trajectória é preciso juntar ao conhecimento da lei do movimento, o conhecimento empírico de um qualquer estado momentâneo do sistema. A lei geral deduz então desse “estado inicial” a sucessão dos estados que o sistema atravessa, tal como um raciocínio lógico deduz a conclusão das premissas. É de notar que, sendo a lei conhecida, qualquer estado particular é

suficiente para definir inteiramente o sistema e não somente a sua evolução futura, mas também a que, pertencendo ao passado, atingiu esse estado. Em cada momento portanto tudo é dado. A dinâmica define todos os estados como equivalentes, pois cada um deles permite determinar todos os outros, predizer a totalidade das trajectórias que constituem a evolução do sistema (PRIGOGINE e STENGERS, 1986).

Ainda segundo aqueles autores a expressão “Tudo é dado”, resume a dinâmica e a realidade que ela descreve; tudo é dado com o dado inicial; a lei geral da evolução dinâmica não permite qualquer predição especial enquanto um dos estados do sistema não estiver definido; desde que o esteja, a lei determina integralmente o sistema e permite deduzir a sua evolução, calcular o seu estado para qualquer momento anterior ou ulterior. *Tudo é dado mas também tudo é possível.* O ser com poderes para manipular um sistema dinâmico, tem a liberdade de imaginar qualquer estado para esse sistema e, desde o momento que esse estado seja compatível com a definição dinâmica do sistema, é possível determinar um estado inicial tal que o sistema chegue “espontaneamente” ao estado escolhido no momento escolhido. À generalidade das leis dinâmicas responde a arbitrariedade das condições iniciais e, portanto, a arbitrariedade das evoluções particulares.

A *reversibilidade* da trajectória dinâmica foi, por sua vez, implicitamente afirmada por todos os fundadores da dinâmica como Galileu e Huyghens, entre outros: cada vez que queriam acentuar a relação de equivalência entre causa e efeito, sobre a qual pensavam fundamentar a descrição matemática do movimento, evocabam uma operação imaginária, ilustrada o melhor possível por uma bola perfeitamente elástica saltando no solo, imaginavam a inversão instantânea da velocidade do móbil estudado

e descreviam o seu retorno à posição inicial, com restauração simultânea do que produzira o movimento acelerado entre o momento inicial e o da inversão. A bola, por exemplo volta a atingir a altitude inicial.

A dinâmica faz da reversibilidade a propriedade de toda a evolução dinâmica. A antiga experiência imaginária era, com efeito, a encenação de uma propriedade matemática geral das equações dinâmicas: a estrutura destas equações implica que, se as velocidades de todos os pontos de um sistema são invertidas de repente, tudo se passa como se o sistema “ascendesse de novo no tempo”. Com efeito, ele percorre em sentido inverso todos os estados pelos quais a evolução anterior o fez passar. A dinâmica define como matematicamente equivalente as transformações $t \rightarrow t$, quer dizer a inversão do sentido do decorrer do tempo, e $v \rightarrow -v$, inversão das velocidades. O que uma evolução dinâmica realizou pode uma outra evolução, definida pela inversão das velocidades, desfazer, restaurando uma situação idêntica à situação inicial (PRIGOGINE e STENGERS, 1986).

Esta última propriedade da reversibilidade da dinâmica leva a uma dificuldade da dinâmica cujo carácter fundamental não se imporá senão com a mecânica quântica. Toda a intervenção, manipulação e medida são, na essência, irreversíveis. Assim, a ciéncia activa encontra-se, por definição, estranha ao mundo reversível que ela descreve, qualquer que seja, por outra via, o grau de plausibilidade intrínseca de uma tal descrição. Mas, igualmente deste último ponto de vista, a reversibilidade pode ser tomada como símbolo da estranheza do mundo descrito pela dinâmica.

Mas ao carácter contínuo da aceleração descrita pelas equações dinâmicas opõe-se o choque descontínuo, colisão instantânea entre partículas duras, o qual Newton já tinha visto que, em contradição com a dinâmi-

ca, provoca uma perda irreversível de movimento. A única colisão reversível, isto é, a única de acordo com as leis da dinâmica é a colisão elástica. Mas como atribuir a propriedade complexa da elasticidade aos átomos de que se pretende fazer os elementos primeiros da natureza?

No século XVIII, a disputa parecia sem saída, o que, notemo-lo de passagem, contribuiu para explicar o ceticismo da maior parte dos físicos dessa época quanto ao alcance efectivo da descrição dinâmica. Com efeito, esses físicos sabiam que a descrição dinâmica infinitesimal deixava na sombra o processo de colisão, única fonte de mudança de movimento inteligível para eles. Sabiam também que, na natureza, visto que há choque, fricção, contacto brusco entre corpos de velocidades diferentes, há movimento que se perde; daí concluíam que, nesses casos não ideais, a energia não se conserva.

Mas onde encontrar as raízes da síntese newtoniana e da sua concepção da mudança? Síntese entre a ciência das máquinas ideais, onde o movimento se comunica entre peças já em contacto, sem choques nem atritos, e a ciência dos astros que se influenciam à distância. A síntese newtoniana, a unificação do céu e da Terra, foi obra de um alquimista, e não de um astrónomo. O que inspirou a força newtoniana que anima a matéria inerte e, no melhor sentido, constitui a actividade da natureza parece realmente serem as forças que o químico Newton observava entre os corpos, forças de atracção e repulsão que regem a “vida social” da matéria e determinam cada corpo a formar pares estáveis com certos outros, a provocar a dissolução de compostos por repulsão e a servir de mediadores que permitam a aproximação e o acasalamento de outros corpos (PRIGOGINE e STENGERS, 1986).

Pela sua universalidade, a lei de Newton, veio destruir a ordem perfeita apontada pelas leis de Kepler. Se os planetas são atraídos pelo Sol, também o são segundo a lei de Newton, atraídos entre si. Toda a estabilidade do mundo fica então comprometida caso os planetas, por alguma razão, deixem de descrever a mesma elipse em torno do Sol. Como as massas dos planetas são pequenas em relação à do Sol, a atração mútua entre os planetas é muito mais fraca do que a exercida pelo Sol e o movimento permanece durante um certo tempo próximo do movimento elíptico descoberto por Kepler, mas isto não é mais do que uma aproximação do movimento cuja previsão a longo prazo se torna num problema de facto.

Durante os séculos seguintes colocaram-se duas questões fundamentais:

- 1 – A lei de Newton é suficiente para explicar o movimento dos astros?
- 2 – O sistema solar, sujeito ao conjunto das forças perturbadoras que afastam os planetas das órbitas elípticas fixas de Kepler, permanece estável (sob as diversas acepções da palavra) ao longo do curso do Tempo (LASKAR²⁷; 1992)?

Para Newton, as interacções gravitacionais entre os planetas são de tal modo importantes que poderão comprometer a estabilidade do próprio sistema do mundo. A síntese de Newton não é, pois, uma ruptura, mas sim uma surpresa. É uma descoberta inesperada, perturbadora, que a cultura comemora fazendo de Newton o próprio símbolo da ciência moderna. Esta ciência supunha uma ordem universal, supunha que um método laborioso de medida e de manipulação poderia descobrir a verdade do mundo. E eis que, na verdade, a natureza se deixa decifrar, eis que responde, e bem além das expectativas daquele que a interrogava. Os instru-

mentos de cálculo infinitesimal disponíveis na época de Newton, eram insuficientes para resolver completamente os problemas colocados pela sua própria teoria. O desenvolvimento das consequências e das vantagens resultantes da obra deste grande geómetra viria a ser tarefa dos seus sucessores.

Depois de Newton, a precisão das observações astronómicas registaram elevados progressos graças ao desenvolvimento e aparecimento de novos instrumentos. Uma das questões mais importantes para a qual a mecânica celeste procurava uma resposta, era de saber se a lei de Newton, por si só, permite explicar os movimentos dos corpos celestes. Esta questão não foi imediatamente óbvia para a maioria dos contemporâneos de Newton. Foi necessário esperar pelo século seguinte para que os métodos de perturbações se aperfeiçoassem devidamente e para que os trabalhos de Lagrange e Laplace viessem consagrar a lei de atracção universal, mostrando uma perfeita adequabilidade entre os cálculos e as observações da época. Mais geralmente, os cinetistas começaram a fazer uso de *equações diferenciais com derivadas parciais*, que envolviam taxas de variação que diziam respeito a mais do que uma quantidade desconhecida.

O século XVIII foi a época do poder marítimo, exigindo conhecimentos do modo como a água e outros fluídos se escoam. Em 1752 Euler voltou a atenção para a dinâmica dos fluídos e em 1755 tinha já elaborado um sistema de equações diferenciais parciais para descrever o movimento de um líquido sem viscosidade. Considerou tanto fluídos incompressíveis (água) como compressíveis (ar). Modelou o fluido como um meio contínuo infinitamente divisível e descreveu o seu fluxo em termos

²⁷ In Chaos et Déterminisme

de variáveis contínuas que dependem da posição das partículas do fluido: velocidade, densidade, pressão (STEWART, 1991).

O século XVIII e o início do século XIX foram o período em que foi moldada a maior parte das grandes teorias da física matemática clássica. Emergiu, desta forma, um paradigma esmagador: a maneira de modelar a Natureza é através das equações diferenciais. No entanto, os matemáticos do século XVIII depararam com um problema que atormentou a mecânica teórica até aos nossos dias: estabelecer as equações é uma coisa; resolvê-las é outra completamente diferente.

As maiores realizações do século XVIII consistiram no estabelecimento de equações para modelar os fenómenos físicos, sendo este período caracterizado por um optimismo ilimitado e um sentimento geral de que toda a Natureza tinha sido posta a nu. Os sucessos do paradigma das equações diferenciais eram impressionantes e extensos. Muitos problemas, entre os quais questões fundamentais, conduziram a equações que podiam ser resolvidas. Estabeleceu-se um processo de auto-selecção, em que as equações que não podiam ser resolvidas eram automaticamente de menor interesse que as outras. Algumas questões sem resposta, como o movimento de três corpos sob o efeito da gravidade mútua, tornaram-se célebres pela sua impenetrabilidade.

Em 1750 Lagrange, desenvolve e produz uma reformulação de grande alcance da dinâmica através do desenvolvimento de duas ideias. A primeira foi o princípio da conservação da energia. A mecânica clássica reconheceu duas formas de energia. A *energia potencial*, energia de um corpo devido à sua posição e a *energia cinética*, energia de um corpo devido à sua velocidade. Durante o movimento, na ausência de atrito, estas duas for-

mas de energia podem ser convertidas uma na outra. Quando um corpo cai perde energia potencial e ganha energia cinética, ou seja a velocidade aumenta. A segunda lei do movimento de Newton expressa eficientemente este argumento qualitativo de uma forma quantitativa precisa. A segunda ideia de Lagrange consistiu em introduzir *coordenadas generalizadas*. As coordenadas são um truque para converter geometria em álgebra, associando a cada ponto um conjunto de números. Contrariamente aos outros matemáticos que julgavam ser conveniente trabalhar com vários sistemas de coordenadas, dependendo do problema em estudo, Lagrange começou por adoptar *um sistema de coordenadas qualquer*. Então, com uma simplicidade surpreendente, obteve equações do movimento numa forma que *não depende do sistema de coordenadas escolhido*. A formulação de Lagrange tem muitas vantagens sobre a de Newton. Algumas destas são técnicas, como a maior facilidade de aplicação quando existem restrições ao modelo e o evitar laboriosas transformações de coordenadas. Mas sobretudo a grande vantagem da formulação de Lagrange reside no facto de ser mais geral, mais abstracta, mais elegante e mais simples (STEWART, 1991).

As ideias de Lagrange foram retomadas por William Rowan Hamilton (1805-1865), grande matemático irlandês, que reformulou de novo a dinâmica com uma generalidade ainda maior. Na versão hamiltoniana da teoria, o estado de um sistema dinâmico é especificado por um conjunto de coordenadas posicionais (como as de Lagrange) juntamente com um conjunto relacionado de coordenadas do momento (as velocidades correspondentes multiplicadas pela massa). Uma única quantidade, agora denominada como o hamiltoniano do sistema, define a energia total em função desses momentos e posições. As taxas de variação das coordenadas de posição e momento com o tempo expressam-se em termos do hamiltoniano num sistema de equações unificado e simples (STEWART, 1991).

9.3. Poincaré não Gostava de Newton?

Nos finais do século XIX, um brilhante matemático físico e filósofo, Jules Henri Poincaré (1854-1912), fez a descoberta desconcertante num domínio conhecido sob a designação da “mecânica dos sistemas fechados”, a quinta-essência da física newtoniana (BRIGGS e PEAT, 1991).

Um sistema fechado é um sistema constituído unicamente por alguns corpos em interacção e isolados de toda a contaminação exterior. Segundo a física tradicional, tais sistemas seriam perfeitamente ordenados e previsíveis. Um simples pêndulo no vácuo, livre de qualquer atrito ou resistência do ar, conservará a sua energia. O pêndulo prosseguiria o seu balanço, para a frente e para trás até à eternidade. Deste modo, não estaria submetido nem sujeito à dissipação da entropia que se imiscui nos sistemas e os obriga a abandonar a sua energia do universo envolvente.

Os cientistas clássicos estavam convencidos que todo o processo estocástico ou caótico perturbador de um sistema, tal como um pêndulo no vácuo ou a revolução dos planetas no nosso sistema solar, não podia provir senão de factores de acaso externos ao sistema. Sem estes, o pêndulo, e os planetas deviam continuar a mover-se eternamente, sem variação na sua trajectória. É sobre esta imagem confortável da natureza e da estabilidade do sistema solar que Newton se interrogou. O primeiro problema levantado por Poincaré, aparentemente absurdo, prende-se com a estabilidade do sistema solar. Pois apesar de tudo, os planetas mantêm-se nas suas posições, e pelo menos, desde a era babilónica que é possível prever um eclipse com uma precisão de um ano de avanço. A revolução newtoniana respeita este ponto específico, a descoberta de leis eternas que regem o movimento da Lua em torno da Terra e da Terra em torno do

Sol. Por outro lado, as leis de Newton reinavam inteiramente sobre a Física do século XIX. Conhecendo a lei da força e a massa dos corpos em interacção, era suficiente resolver as equações de Newton para prever os efeitos desta interacção. Tudo isto era verdadeiro, mas no caso do sistema conter apenas dois corpos, o Sol e a Terra ou a Terra e a Lua, as equações de Newton determinavam uma solução exacta: a órbita da Lua em torno da Terra pode ser calculada de maneira precisa. Para todo o sistema idealizado a dois corpos, as órbitas são estáveis (BRIGGS e PEAT, 1991).

Assim, não tendo em conta a força de atracção das marés sobre o movimento da Lua, pode-se supor que a Lua prosseguirá até ao infinito a sua viagem em torno da Terra. Mas neste caso, deve igualmente negligenciar-se o efeito do Sol e dos outros planetas sobre o sistema idealizado de dois corpos. O problema está, e foi isso que preocupou Poincaré, na passagem de um sistema de dois a três corpos. Por exemplo considerar a influência do Sol no sistema Terra-Lua. Nesta situação as equações de Newton tornam-se insolúveis. Por razões matemáticas formais, a equação de três corpos não pode ser resolvida de maneira exacta; são necessárias uma série de aproximações para “cercar” uma resposta.

De modo a calcular as influências gravitacionais do Sol e do planeta Júpiter sobre os movimentos de um asteroide da cintura de asteroídes (entre Marte e Júpiter), o físico devia utilizar um método denominado “teoria da perturbação”. A pequena influência que Júpiter exerce sobre um asteroide deve ser ajustada à solução idealizada dos dois corpos numa série de aproximações sucessivas. Sendo cada aproximação mais pequena que as anteriores e adicionando um número virtualmente infinito destas correções, os físicos teóricos esperavam poder demonstrar que as aproxima-

ções convergiam para a solução correcta depois do ajustamento de alguns termos somente correctores.

Poincaré sabia que o método de aproximação parecia funcionar correctamente para os primeiros termos, mas o que acontecia perante uma infinidade de termos cada vez mais pequenos que se sucediam? Qual era a sua influência? Demonstrariam que, nas dezenas de milhões de anos, as órbitas se deslocariam e que o Sistema Solar começaria a fragmentar-se sob o efeito das suas próprias forças internas?

Uma versão moderna do problema de Poincaré é ilustrada pela aceleração de partículas elementares no anel de um acelerador de partículas. As órbitas destas partículas vão permanecer estáveis ou mudar de maneira completamente imprevisível?

Matematicamente, o problema de vários corpos sobre o qual se debruçou Poincaré é não linear. Ao sistema ideal de dois corpos, ele ajustou um termo aumentando a complexidade não linear (retroacção) da equação e correspondente ao fraco efeito produzido pelo movimento de um terceiro corpo. Em seguida tentou resolver a nova equação. Como ele esperava, descobriu que a maior parte das órbitas possíveis dos dois corpos não são senão ligeiramente modificadas pelo deslocamento do terceiro corpo; uma pequena perturbação produz um pequeno efeito, mas as órbitas permanecem intactas. Até aqui os resultados eram encorajantes. Mas o que se produziu em seguida agitou-o fortemente. Poincaré descobriu que mesmo com a mais ínfima perturbação, certas órbitas comportavam-se de maneira excêntrica, isto é, caótica. Os seus cálculos demonstravam que uma atracção gravitacional de um minuto, provocado por um terceiro corpo, podia ocasionar o vai-e-vem irregular na órbita de um planeta e fa-

zê-lo afastar-se completamente do Sistema Solar (BRIGGS e PEAT, 1991).

Poincaré veio despoletar uma bomba anarquista no modelo newtoniano do Sistema Solar que ameaçava a redução a nada. Se as curiosas órbitas caóticas pudesse realmente aparecer, então o conjunto do Sistema Solar podia ser instável. As pequenas influências dos planetas exercendo, no decorrer da sua rotação, diferentes atracções gravitacionais umas sobre as outras podiam, na condição de dispor de um prazo, suficiente, combinar-se de tal modo que poderiam dar lugar ao nascimento das condições exactas para se verificar uma das órbitas excéntricas de Poincaré. Será então possível que um dia todo o Sistema Solar possa tornar-se caótico?

Até Poincaré, tinha-se considerado sempre o caos como uma infecção entrópica proveniente de um sistema exterior, como resultado de contingências ou de flutuações externas. Todavia, desta vez aparece num sistema encerrado numa caixa estanque e deixada tal qual durante biliões de anos podendo, não importa em que momento, desenvolver a sua própria instabilidade e o caos. Poincaré revela que o caos, ou o potencial de caos, é a essência de um sistema não linear, e que mesmo um sistema completamente determinado, como a órbita dos planetas, pode ter resultados indeterminados. De uma certa maneira, ele verificou que pequenos efeitos podem ser amplificados pela retroacção. Ele percebeu que um sistema simples pode conter uma complexidade extrema (BRIGGS e PEAT, 1991).

A aproximação imediata da descoberta de Poincaré foi desafiar o grande paradigma de Newton que serviu a ciência durante praticamente

dois séculos. Alguns anos após a obra de Poincaré, Max Planck descobriu que a energia não é uma substância contínua mas que vem em pequenas porções ou quanta. Cinco anos mais tarde, Albert Einstein publicou o seu primeiro artigo sobre a relatividade. O paradigma newtoniano estava a ser atacado em diversas frentes. As gerações seguintes de físicos consagraram-se a estudar as diferenças entre a visão newtoniana clássica da natureza e a da relatividade e da teoria quântica.

9.4. Três Séculos Após Newton

Que o cosmos seja uma unidade organizada, é um dado de intuição imediata. Lá onde chega o nosso olhar, desde as profundezas do átomo até às galáxias mais longínquas, encontra-se ordem. Entre a riqueza e a complexidade, os diferentes sistemas da natureza coexistem de modo harmonioso. A complexidade, em todas as suas formas, coabita com a simplicidade das leis físicas que a regem de modo que, o mundo é ao mesmo tempo simples e complexo.

Após três séculos, Newton exerce a sua influência sobre o pensamento, nomeadamente sobre o pensamento científico. O principal contributo de Newton foi o de mostrar que a representação sistemática do mundo, por simples enunciados matemáticos, pode conduzir a avaliações muito precisas, desde a posição dos planetas até à trajectória de um projétil, em última análise, ao movimento dos átomos. As leis newtonianas sobre o movimento contêm a afirmação que os corpos materiais não se deslocam por acaso, mas segundo regras matemáticas precisas. Pode, então, afirmar-se que o movimento dos corpos é regido por equações diferenciais (DAVIES, 1995).

Um aspecto particular das leis matemáticas de Newton, que é uma constante em todas as outras leis fundamentais da física e o núcleo duro do paradigma newtoniano, é a problemática das condições iniciais. Trata-se de uma questão que toca a própria essência de concepção de uma lei. Uma lei expressa uma regularidade de uma equação e uma regularidade é qualquer coisa que faz recorrência, a sistemas análogos.

Uma das consequências das leis de Newton sobre o movimento dos “graves” é de que todos os projécteis seguem uma trajectória parabólica. Mas nem todos seguem a mesma parábola; algumas parábolas são baixas e ligeiramente curvas, outras são altas e muito arqueadas. O essencial de uma lei contém o que delimita o comportamento do sistema físico sem que para tanto o determine de maneira unívoca e exclusiva.

Se bem que as leis de Newton determinem a forma geral da trajectória, a forma *específica* da parábola é determinada por outros factores, que têm em conta simultaneamente as leis e as condições iniciais. Segundo as leis de Newton, desde que as condições sejam precisas, a trajectória da esfera é determinada de maneira exclusiva e unívoca; não há, portanto, liberdade: trata-se dum facto matemático, susceptível de uma demonstração rigorosa.

Esta visão determinista do mundo foi levada ao extremo com Pierre Simon Laplace: “*Um ser que, por um instante, conhecesse todas as forças que animam a natureza e a situação respectiva dos seres que a compõem, se fosse suficientemente vasta para submeter estes dados a análise, resolveria do mesmo modo os movimentos dos maiores corpos e os dos átomos: nada seria incerto para ele e o futuro como o passado estaria presente aos seus olhos*” (citado por DAVIES, em La Mort de Newton, 1996).

A proposição de Laplace implica que tudo o que acontece no Universo, tudo o que está em vias de acontecer e tudo o que aconteceu, desde as acções de todos os seres humanos até à menor vibração de cada átomo, está já fixado e inalterado, pois tudo foi estabelecido após a origem dos tempos. O Universo encontra-se assim reduzido a uma máquina que executa fielmente uma série de instruções que foram sendo integradas após a origem, como sendo as suas condições iniciais.

O movimento de uma esfera, como já se disse, é determinado de maneira unívoca e exclusiva pelas condições iniciais. Mas o que determinam estas condições? Se o sistema que lança a esfera está submetido a estas mesmas leis, as condições iniciais da projecção da esfera são por seu turno determinadas pelas condições iniciais do sistema que a lança, que são definidas por um sistema mais vasto e assim sucessivamente. No final, qualquer consideração abrange a globalidade do cosmos, o que conduz obrigatoriamente à interrogação sobre as condições iniciais do Universo no seu conjunto.

Durante uma grande parte da história das ciências, os cientistas eludiram o problema das condições cósmicas iniciais, ou melhor, consideraram que o problema era mais do domínio da Teologia do que da Física. Por fim admitiram o pressuposto de um universo eterno; isto é, um universo que não tem a sua origem no tempo, mas que existiu sempre sob uma ou outra forma.

Newton tinha consciência que isso colocava um problema relativo à força da gravidade. Segundo a sua teoria da gravitação universal, publicada nos *Principia*, a gravidade é sempre uma força que atrai toda a matéria para outra matéria. Porquê então – interrogava-se Newton – o sistema das

estrelas não se atrai sobre ele próprio, para formar uma grande massa? De modo a salvar o Universo do desmoronamento gravitacional, Newton defendeu a ideia que se o Universo tinha uma extensão espacial infinita e estava uniformemente povoados de estrelas, a força média da gravidade exercida sobre um dado corpo seria a mesma em todas as direcções. A resultante das forças seria então a mesma em todas as direcções. Donde, a resultante das forças num dado ponto seria nula. Desta forma, o Universo poderia durar eternamente sem se desmoronar sobre ele próprio. Se as coisas se passassem verdadeiramente assim, a questão das condições iniciais poderia ser eludida, caso que está implícito que não haveria um começo, ou seja, o *estado inicial primeiro*. As condições iniciais podiam assentar sempre mais longe no tempo, no infinito (DAVIES, 1995).

9.5. Síntese do Capítulo

9. A CONCEPÇÃO MECANICISTA – A ERA NEWTONIANA

- 9.1. As leis científicas gerais de Descartes
- 9.2. O sistema do Mundo segundo Newton
- 9.3. Poincaré não gostava de Newton?
- 9.4. Três séculos após Newton

Com Descartes e Newton inicia-se o período de revolução científica que cava a fronteira entre a Idade Média e a Ciência Moderna. Na Idade Média perdurou, entre religião e ciência, desde São Tomás de Aquino até Galileu, uma relação simbiótica. Durante seis séculos, a religião cristã beneficiou da ciência que fornecia as explicações plausíveis para os dogmas, enquanto que as ciências recebiam em troca, a credibilidade. Esta relação dual chega a termo com Galileu, fundador da ciência experimental em Itália, que ocupa na história da ciência, o lugar dos últimos grandes cientistas mártires, da Igreja de Roma.

Consumada a independência da ciência relativamente à Igreja, aquela encontrou, no Estado, um novo aliado disposto a financiá-la a troco de legitimação das suas políticas.

As relações triangulares entre Igreja, Estado e Ciência, evoluíram pois ao longo dos séculos, segundo uma simetria variável que privilegia a ligação da supremacia da Igreja até Galileu e a supremacia do Estado, após Galileu.

Descartes apesar do seu misticismo legou o método científico, assente essencialmente na observação e na experimentação e ainda, no questionamento de verdades adquiridas.

Newton, por sua vez, exerceu uma influência determinante sobre o pensamento científico nos três séculos seguintes, propondo uma conceção mecanicista e determinística do mundo. Para Newton, que demonstrou a atracção entre dois corpos e estabeleceu, a partir daí, as leis de gravitação universal, será possível determinar com precisão qualquer trajectória, quer seja de um planeta, quer seja de uma bala, através do cálculo matemático, desde que sejam conhecidas as condições iniciais.

Laplace, "mais papista que o Papa", caricatura o pensamento de Newton ao pretender que tudo o que aconteceu, acontece e acontecerá, no Universo, desde as acções de todos os homens, até à menor vibração de cada átomo, está determinado e inalterado após a origem do tempo.

O paradigma de Newton viria a ser questionado no final do século XIX por Poincaré, que demonstrou que se forem considerados sistemas, não de dois corpos, mas de três ou mais, deixam de se verificar as certezas de Newton pois bastará uma pequena alteração num dos corpos para que possa ocorrer uma grande perturbação (caótica) em outros componentes do sistema.

Finalmente, a Teoria Quântica de Planck e a Teoria da Relatividade de Einstein, vieram afastar a concepção newtoniana do mundo, pelo menos do domínio do pensamento científico.

10. OS NOVOS PARADIGMAS DA FÍSICA

“**A** mais clara indicação da mudança de paradigma futura é a busca intensa, que ocorre em várias disciplinas, de uma teoria mais integrada. Esta teoria tem vários nomes: sistémica, holística, integral ou simplesmente “gerd”. O termo preferido por muitos cientistas é “unificada”. O paradigma incontestado para ela é o campo das grande teorias unificadas na nova física” (LASZLO, 1999).

Um dos grandes desafios da ciência contemporânea tem sido o de seguir a pista do misto da simplicidade e da complexidade, regularidade e aleatoriedade, ordem e desordem, ao longo da escada que vai desde a física das partículas elementares e a cosmologia até ao domínio dos sistemas complexos adaptativos. É necessário compreender a forma como a simplicidade, a regularidade e a ordem do universo primordial deram origem, ao longo dos tempos, às condições intermédias entre a ordem e a desordem que prevaleceram em muitos lugares em épocas posteriores, tornando possível, entre outras coisas, a existência de sistemas complexos adaptativos, como os organismos vivos. Estes aspectos obrigam ao exame da Física fundamental do ponto de vista da simplicidade e da complexidade, questionando qual o papel desempenhado pela teoria unificada das partículas elementares, pela condição inicial do universo, pelas indeterminações da mecânica quântica e pelos caprichos do caos clássico na produção de padrões de regularidade e aleatoriedade.

idade do universo, no seio do qual os sistemas complexos adaptativos tiveram que evoluir (GELL-MANN, 1997).

10.1. As Grandes Teorias da Unificação

O objectivo da unificação – embora não da grande “unificação” – é comum na história das ciências físicas. Em cada época, cada teoria principal unificou os factos mais relevantes então conhecidos pela comunidade dos físicos. Foi o caso da mecânica delineada por Galileu e a formulação universal da sua teoria realizada por Newton, o da electromecânica de Maxwell e o da termodinâmica de Boltzmann. No início deste século, Einstein contribuiu para a mudança crucial que unificou a visão do mundo. Foi este o mérito da relatividade especial, onde os enigmas criados pela Física clássica encontraram soluções simples e elegantes, e ainda mais da relatividade geral, onde a geometria e a mecânica se tornaram completa e inesperadamente integradas. O espaço e a matéria, com a geometria de um e a mecânica da outra, alcançaram uma nova unidade integral. A força da gravidade, anteriormente mecânica, tornou-se um elemento da geometria; passou a ser vista como um elemento da curvatura do espaço. A geometria deste último, por sua vez, era traçada pela distribuição da matéria. Enquanto continuava a ser útil, por vezes, pensar no espaço e na matéria como entidades distintas, os físicos convenceram-se que estes formavam um todo inseparável e integrado (LASZLO, 1999).

Efectivamente, nos anos 20, Edwin Hubble fez uma descoberta memorável: o Universo não é estático; pelo contrário está em expansão. As galáxias enleiam-se umas nas outras a velocidades de tal forma elevadas que a distância que as separa é grande (DAVIES, 1996). Nesta época, ape-

nas três partículas elementares eram conhecidas: o fotão, o electrão e o protão. Ernest Rutherford sugeriu então, mais uma partícula que deveria estar presente no núcleo: o neutrão. Com a confirmação da existência desta partícula, o repertório de partículas começou a expandir-se. Em 1930, numa tentativa de explicar os enigmáticos resultados das experiências com a decadência dos núcleos radioactivos, a existência do neutrino foi também sugerida por Wolfgang Pauli. A confirmação experimental do neutrino viria a verificar-se vinte cinco anos mais tarde.

10.2. Universo Quântico

O universo quântico é constituído por matéria e a matéria é constituída por muitos tipos diferentes de partículas elementares, como os electrões e os fotões. As partículas são desprovidas de individualidade – cada electrão do universo é idêntico a qualquer outro. Todos os fotões são, do mesmo modo indistinguíveis.

Todas as partículas elementares conhecidas (com excepção do gravitão, exigido por considerações teóricas) são hoje provisoriamente descritas por uma teoria que veio a ser conhecida por modelo-padrão. Este novo modelo tal como descreve Gell-Man (1997), um dos seus obreiros, trouxe uma grande dose de simplicidade a uma variedade desconcertante de fenómenos, não sendo contudo, a teoria última das partículas elementares, porque: (i) as várias forças têm formas muito semelhantes e clamam por unificação através de uma teoria em que surjam como manifestações diferentes da mesma interacção subjacente; (ii) o modelo ainda não é suficientemente simples, contém mais de sessenta partículas elementares e diversas interacções entre elas; (iii) o modelo inclui mais de uma dúzia de

constantes arbitrárias que descrevem essas interacções, o que torna difícil aceitar como fundamental uma teoria em que tantos números são por princípio, incalculáveis; e, *(iv)* a gravitação não se encontra incluída (GELL-MANN, 1997).

Os teóricos das partículas elementares tentaram lidar com essas dificuldades em duas etapas. A etapa mais directa envolve a generalização do modelo padrão a algo denominado por alguns como a “grande teoria unificada”. Ordenar a imensa série de partículas em grupos simétricos coerentes, foi uma realização impressionante, mas a segunda etapa ou a genuína unificação requeria que também as forças representadas pelas partículas fossem unificadas. Este empreendimento teve Einstein como pioneiro, com a sua teoria do campo unificado.

Insatisfeito com a unificação da geometria e da mecânica, Einstein procurou dar um passo mais à frente que iria integrar todas as partículas conhecidas do espaço-tempo dentro da matriz em si mesma atemporal de uma teoria do campo unificado. Infelizmente, a intuição de Einstein não encontrou confirmação. A acção de compensação revelou-se instável. Quer a anti-gravidade exista ou não, o Universo não pode permanecer estático: ele deve recuar ou então estender-se (DAVIES, 1996).

No entanto, apesar de ter considerado apenas as forças gravitacional e electromagnética, os físicos teóricos têm sido inspirados pelo sonho de Einstein, posto na sua forma moderna: uma teoria quântica que abarque não só o fotão, o gravitão e todas as outras partículas fundamentais, com os seus associados campos electromagnético, gravítico e outros, mas também os fermiões, como o electrão. Uma tal teoria estaria contida numa simples fórmula que explicaria a grande multiplicidade de partículas ele-

mentares e as suas interacções, reproduzindo, nas devidas aproximações, as equações de Einstein para a gravitação relativista e as equações de Maxwell para o electromagnetismo (GELL-MANN, 1997).

Criando grandes teorias unificadas, os físicos abarcam todas as quatro forças universais, juntamente com a ampla série de partículas que vieram à luz durante este século. Estas teorias oferecem uma moldura conceptual que une tanto as partículas resultantes das experiências contemporâneas quanto as forças que governam as respectivas interacções. *A unificação tornou-se mais do que nunca uma necessidade, já que as partículas “elementares” que surgiram ultimamente provaram ser qualquer coisa menos “elementares”* (LASZLO, 1999).

A grande unificação considera as partículas como elementos dentro dos quatro campos universais (ou forças). A intensidade do campo num ponto específico dá a probabilidade estatística de encontrar a partícula naquela localização. Em certo sentido, as partículas são geradas pela variação na intensidade do campo. Fotões, electrões, núcleos e todo o conjunto de partículas são consequências da dinâmica quântica destes campos em interacção. Um novo tipo de teoria chamada teoria das “supercordas” parece reunir as propriedades correctas para atingir a unificação. Em particular, a “teoria heterótica da supercordas” é historicamente a primeira candidata viável ao título de teoria quântica unificada de todas as partículas elementares e suas interacções.

“A teoria das supercordas surgiu de uma ideia conhecida por princípio dos cordões dos sapatos, invocando a lenda do homem que conseguia descolar-se no chão puxando os cordões dos próprios sapatos. A noção era a de que um conjunto de partículas elementares poderiam ser tratadas como sendo compostas, de um modo autoconsciente,

por combinações dessas mesmas partículas. Todas as partículas serviriam como consti-tuintes, todas as partículas serviriam como quanta para campos de força, mantendo a coesão dos constituintes, e todas as partículas surgiriam como estados ligados dos con-sistuintes. As partículas, partindo do princípio que existem, produzem forças que as li-gam umas às outras; os estados resultantes consistem nas mesmas partículas e são as mesmas que transportam a força que as liga. Um tal sistema, caso exista, dá origem a si próprio” (GELL-MANN, 1997).

De início, a teoria foi aplicada apenas a um subconjunto de partí-culas, as mesmas que os teóricos haviam tentado descrever recorrendo ao princípio dos cordões dos sapatos. Só em 1974, Scherk e Schwarz sugeriram que a teoria das supercordas poderia descrever todas as partículas elementares. Aquilo que os convenceu foi a descoberta de que a teoria previa a existência do gravitão e, portanto, da gravitação einsteiniana. Quase dez anos mais tarde quatro físicos de Princeton, conhecidos por “quarteto de cordas”, descobriram a forma particular conhecida por teoria heterótica das supercordas.

“A teoria das supercordas, em particular, a forma heterótica, poderá ser real-mente a muito procurada teoria quântica unificada de campos. Na devida aproxima-ção, deduz-se conforme seria de esperar, a teoria da gravitação de Einstein. Além disso, incorpora a gravitação de Einstein e os outros campos numa teoria quântica de campos sem esbarrar com as habituais dificuldades das infinidades. Explica também a grande diversidade de partículas elementares existentes: o número de tipos diferentes das parti-culas é, na verdade, infinito, mas apenas um número finito (algumas centenas provavel-men-te) tem massa suficientemente baixa para poder ser descoberto em laboratório. Além disso, pelo menos à primeira vista, a teoria não inclui, quaisquer constantes arbitrárias ou listas de partículas e interacções, embora possa aparecer alguma arbitrariedade num exame mais cuidadoso. Finalmente, a teoria das supercordas emerge de um princípio

simples e elegante de autoconsciência, proveniente da ideia do condão dos sapatos” (GELL-MANN, 1997).

10.3. Teoria Quântica dos Átomos

Em 1925, Heisenberg inventou a mecânica das matrizes, primeiro passo em direcção à nova teoria quântica dos átomos. Mais tarde, trabalhando com Max Born e Pascual Jordan, em Göttingen, inventou uma nova versão completa da nova teoria quântica, uma nova dinâmica que podia ser aplicada nos cálculos das propriedades dos átomos, tal como a mecânica de Newton tinha sido utilizada para calcular as órbitas dos planetas. Embora, a mecânica quântica, como mais tarde viria a ser denominada, estivesse em excelente acordo com as experiências, os seus criadores tinham dificuldade em interpretá-la como sendo uma imagem da realidade. A imagem simples da realidade material que se obtém como a velha mecânica de Newton (os planetas orbitando em torno do Sol ou o movimento das bolas de bilhar) não tinha analogia na mecânica quântica. As convenções visuais da experiência vulgar não são aplicáveis ao micromundo dos átomos, tem de tentar-se ver o mundo de outra maneira. Na tentativa de descobrir um novo quadro conceptual adaptado ao mundo quântico e de acordo com a nova mecânica quântica, Heisenberg descobriu o “princípio da incerteza”, o qual revelou uma propriedade profunda da mecânica quântica que não está presente na mecânica newtoniana.

De acordo com o princípio da incerteza, certos pares de variáveis físicas, como a posição e o momento (massa x velocidade) de uma partícula não podem ser medidos simultaneamente com precisão arbitrária. Por exemplo, ao repetir a medição da posição e do movimento de uma parti-

cula quântica isolada – um electrão, por exemplo – , verifica-se que a medição flutua em torno de valores médios. Estas flutuações são então a medida da incerteza ao determinar a posição ou o momento. O princípio da incerteza afirma que o produto das incertezas nas medições não pode ser reduzido a zero. Se o electrão obedecesse às leis da mecânica newtoniana, então as incertezas poderiam ser reduzidas a zero e a posição e o momento do electrão poderiam ser determinados com exactidão. Ao contrário da mecânica newtoniana, a mecânica quântica permite conhecer apenas uma distribuição de probabilidade destas medições. É portanto inerentemente estatística

10.4. Teoria das Supercordas

A teoria das supercordas e especificamente a teoria heterótica das supercordas, constitui pela primeira vez uma proposta de teoria unificada de todas as partículas elementares e suas interacções, ou seja, de todas as forças da natureza. A unidade básica de energia, da teoria das supercordas, deriva das constantes fundamentais da natureza: c , a velocidade da luz no vazio; b , a constante quântica de Max Planck; e, g , a constante gravitacional de Isaac Newton.

A constante b é a razão universal entre a energia de qualquer *quantum* de radiação e a frequência de vibração dessa radiação. g é a constante universal, da fórmula de Newton da força gravitacional entre quaisquer duas partículas pontuais, que se escreve como o produto de g pelas as duas massas a dividir pelo quadrado da distância entre elas. Newton demonstrou que a mesma fórmula se aplica a dois corpos esfericamente simétricos, se a distância utilizada for a distância entre os seus centros, de

modo que a fórmula pode aplicar-se aproximadamente para o Sol e os planetas ou mesmo para satélites como a Lua.

Multiplicando e dividindo potências apropriadas das três constantes universais c , \hbar e g , pode construir-se a unidade fundamental de qualquer grandeza física, como o comprimento, o tempo e a energia ou a força. O comprimento fundamental é cerca de um centímetro a dividir por 1 seguido de trinta e três zeros. Dividindo esse comprimento pela velocidade da luz, obtém-se a unidade fundamental de tempo, da ordem de 1 segundo a dividir por um número que se escreve como 1 seguido de quarenta e quatro zeros.

A unidade fundamental de massa, a massa de Planck, é aproximadamente a centésima parte de um miligrama. À escala humana poderá não parecer enorme, mas à escala das massas do protão e do neutrão é cerca de vinte triliões de vezes maior. Invertendo a relação, pode então, dizer-se que as massas do neutrão e do protão são extremamente pequenas quando expressas em unidades fundamentais. A massa do electrão é ainda cerca de duas mil vezes menor. A verificação experimental por dados será uma das provas mais difíceis da teoria (GELL-MANN, 1997).

O conteúdo de partículas da teoria heterótica das supercordas encontra-se ligado ao significado da palavra corda e ao qualificativo super. Corda indica que se pode encarar a teoria como uma descrição das partículas com base em anéis minúsculos, em vez de pontos; a dimensão típica de cada anel é aproximadamente a unidade fundamental de comprimento, cerca de um milésimo de bilionésimo de um bilionésimo de centímetro. Esses anéis são tão pequenos que, para muitos efeitos, existe uma descrição equivalente baseada em partículas pontuais. Como se relacionam essas

diferentes partículas umas com as outras? Em particular, como é que as do sector de massas baixas se relacionam com as que têm massas comparáveis à massa de Planck ou superiores? As partículas do sector de massas baixas podem ser vistas como os modos mais baixos dos vários tipos de anéis de corda que ocorrem na teoria das supercordas, enquanto as partículas de massas comparáveis à unidade fundamental de massa representam os modos mais baixos seguintes e as partículas ainda mais pesadas representam modos sucessivamente mais altos, e assim sucessivamente.

O qualificativo super indica que a teoria tem “super simetria” aproximada, o que significa por seu turno, que, para cada fermião, na lista de partículas, existe um correspondente bosão, e vice-versa. Se a super simetria do sistema de partículas elementares fosse perfeita, cada fermião teria exactamente a mesma massa que o bosão que lhe corresponde. Porém, a super simetria arranja maneira de se quebrar, levando as massas dos fermões e respectivos bosões a ficar separadas por aquilo que Gell-Mann designa como “super lacuna”. Esta não é exactamente igual para cada par fermião-bosão, mas será, provavelmente, sempre da mesma ordem de grandeza geral.

À medida que a energia aumenta e o sector de massas baixas fica para trás, a teoria das supercordas prevê que as interacções, electromagnéticas se aproximem todas umas das outras em intensidade, revelando a sua relação de proximidade. Embora nenhum ser humano sobreviva o tempo suficiente para ver energias comparáveis à massa de Planck serem produzidas em laboratório, essas energias estariam disponíveis nos primórdios do universo e no início da sua expansão. A unidade fundamental de tempo, cerca de um centésimo de um bilionésimo de um bilionésimo de se-

gundo, mede o período durante o qual o minúsculo universo terá experimentado toda a gama de efeitos físicos da teoria das supercordas.

Uma montagem em sentido inverso do grande filme do cosmos, mostraria que deveria ter existido um momento em que o universo terá estado comprimido para formar uma massa muito densa. Neste estado de alta densidade, as forças gravitacionais eram imensas e para escapar a este estado, o universo ter-se-á expandido rapidamente, como sob o efeito de uma explosão, que se denomina de modo comum por Big Bang. Hoje a maior parte dos astrofísicos aceitam a tese que uma explosão esteve na origem do Universo, há cerca de quinze bilhões de anos. Esta teoria encontra-se confirmada pela existência de um fundo uniforme de raio térmico, que inunda todo o cosmos. Estima-se que este raio não é senão o resíduo do calor inicial que teria acompanhado o nascimento do cosmos, o qual começou a propagar-se através do espaço, chegando praticamente, sem atenuantes, até à Terra (DAVIES, 1995).

Segundo a teoria da relatividade geral de Einstein, espaço e tempo estão intimamente ligados à matéria. A compressão extrema da matéria, representada pela teoria do Big Bang, implica que qualquer coisa de muito violento e extremo chegou também ao espaço e ao tempo. Com efeito, esteve na origem não somente da matéria, mas também do espaço e do tempo; por outras palavras, o espaço e o tempo nasceram com o Big Bang. Não existia tempo antes dele. Este postulado remete para a teoria de Santo Agostinho, que o mundo foi criado *com o tempo, e não no tempo*.

Se verdadeiramente há uma origem do tempo, é necessário afrontar com clareza a questão das condições cósmicas iniciais. É legítimo procurar o motivo pelo qual o Big Bang teve lugar com uma tal energia, don-

de resultaram a matéria e o calor, e porque razão estes últimos fizeram a sua aparição dando origem ao mundo no qual vivemos. A análise atenta desta matéria evidencia que as condições iniciais são caracterizadas por alguns elementos muito particulares. Em primeiro lugar, a uma grande escala (a uma escala mais elevada que a do aglomerado das galáxias), a matéria e as radiações são distribuídas no cosmos com uma uniformidade extraordinária (DAVIES, 1995).

A solução que se aplicaria ao universo determinaria então a estrutura dos sistemas de partículas elementares. Na verdade, faria mais do que isso, determinaria também o número de dimensões do espaço. Até agora a cosmologia quântica, analisada, tem-se referido a histórias alternativas do universo, tratado como uma entidade única que abarca toda a massa em toda a parte. No entanto, algumas ideias emergentes, na cosmologia quântica, apontam para a existência de universos múltiplos. Dado que *um* significa único, parece estar-se perante uma contradição de palavras. Talvez uma nova expressão ajude, a pelo menos evitar, a confusão linguística que surgiria se algumas dessas ideias viesssem a revelar-se, ainda que parcialmente, correctas. Assim, Gell-Mann sugere o emprego da palavra multiverso para se referir ao conjunto completo de universos, do qual o nosso seria um dos membros. Na possibilidade de existência de numerosos universos muitos poderiam ser comparáveis em tamanho ao nosso, mas o nosso teria, quando muito, um contacto limitado com os outros, ainda que esse contacto pudesse ter ocorrido num passado distante ou se torne possível num futuro longínquo. Num desses quadros, os universos assemelhar-se-iam a bolhas no multiverso, bolhas que se teriam separado umas das outras há muitíssimo tempo, dando assim início a uma era sem comunicação entre os universos, uma era que perduraria por um período de tempo extremamente longo. Se esse tipo de quadro de universos múltiplos

revelar vir a ter alguma validade, poder-se-á tentar identificar o que se passa nas várias bolhas, com diferentes ramificações possíveis da história do universo. Fica então aberta a porta à noção de que um número fantástico de ramos da árvore das histórias granulosas do universo acaba por se concretizar, embora em bolhas diferentes. A probabilidade de cada história seria então essencialmente uma probabilidade estatística, a fração dos vários “universos” na qual essa história teve lugar (GELL-MANN, 1997).

10.5. Síntese do Capítulo

10. OS NOVOS PARADIGMAS DA FÍSICA

- 10.1. As grandes teorias da unificação**
- 10.2. Universo quântico**
- 10.3. Teoria Quântica dos Átomos**
- 10.4. Teoria das Supercordas**

As teorias enquanto sistemas de ideias, coerentes, que procuram explicar os fenómenos conhecidos, subsistem em interacção com o exterior, do final recebem contributos confirmativos, mas também ataques. Com o avanço do conhecimento, o de novos factos e interrelações, as velhas teorias são necessariamente substituídas por outras, mais abrangentes e mais perfeitas na capacidade de explicar os fenómenos.

Tem assim sido com a procura de uma explicação unificadora do Universo dos cosmos aos átomos, dos átomos aos seres vivos. A Física ilustra esta incessante procura de unificação à margem de Deus, com uma sequência de teoria unificadoras. Em cada época, cada teoria principal unificou os factos mais relevantes então conhecidos. Foi o caso da mecânica de Galileu e da teoria da gravitação universal de Newton, da electromecânica de Maxwell e da termodinâmica de Boltzmann.

No início do século XX, Einstein contribuiu para uma mudança crucial do Universo, com a Teoria da Relatividade.

Criando grandes teorias unificadas, os físicos procuraram ordenar não só a imensa série de partículas constituintes de matéria como a unificação das forças que governam as respectivas interações. Deste esforço nasce a Teoria das Supercordas e, em particular a Teoria Heterótica que constitui a proposta mais recente unificadora de todas as partículas elementares e as suas interligações. É então possível construir unidades de qualquer grandeza física a partir de constantes fundamentais de Natureza: c , a velocidade da luz no vázio; \hbar , a constante de Planck e g , a constante gravitacional da Terra.

11 IRREVERSIBILIDADE E INSTABILIDADE DOS SISTEMAS COMPLEXOS

“Sabe-se que Aristóteles fizera do tempo a medida da mudança. Mas tinha reconhecido a multiplicidade qualitativa das mudanças da natureza. Igualmente para a dinâmica, o tempo é a medida da mudança, o parâmetro no tempo do qual a lei manifesta os seus efeitos e a sucessão infinita dos estados dinâmicos. Mas o tempo – medida da dinâmica – não é um tempo geral, comum ao conjunto das evoluções qualitativas diversas, em que cada um possuiria sua própria razão, seu próprio ritmo; o tempo dinâmico constitui não somente uma medida do devenir, o próprio devenir como dinâmico, ao qual, como se postula, se reduz em princípio o conjunto dos processos naturais. A diversidade qualitativa das mudanças é reduzida ao decurso homogêneo e eterno de um tempo único, medida, mas também razão, de todo o processo” (PRIGOGINE e STENGERS, 1986).

A Física está longe de constituir um bloco monolítico. Com efeito, o século XIX legou uma dupla herança, constituída, por um lado pelas leis de Newton, que oferecem a imagem de um universo estático, mas do outro, uma descrição evolutiva associada ao conceito de entropia. A entropia é o elemento essencial introduzido pela termodinâmica, a ciência dos processos irreversíveis, isto é, orientados no tempo. Pode-se pensar na decomposição radioactiva, ou no atrito, ou na viscosidade que diminui a velocidade de movimento de um fluido. Todos estes processos têm uma direcção privilegiada no tempo,

em contraste com os processos reversíveis, como o movimento de um pêndulo sem atrito. Uma substância radioactiva preparada no passado, desaparece no futuro e a viscosidade diminui a velocidade do fluido no futuro. Pelo contrário, no movimento do pêndulo ideal não se pode distinguir entre passado e futuro. Se se permutar passado, “-t”, com futuro, “+t”, obtém-se um movimento pendular tão plausível como o primeiro. Enquanto os processos reversíveis são descritos por equações de evolução invariantes em relação à relação do tempo, como a equação de Newton em dinâmica clássica e a de Schrödinger em mecânica quântica, os processos irreversíveis implicam uma quebra de simetria temporal (PRIGOGINE, 1996).

11.1. Os Primórdios dos Sistemas Dinâmicos

Newton idealizou universo como uma máquina gigantesca, funcionando *como um mecanismo de relógio*, a qual representava o auge em fiabilidade e perfeição mecânica. Esta solução foi encontrada para o problema do movimento de dois corpos. De facto, os corpos movem-se em órbitas elípticas, que têm um foco comum. Quando o problema é colocado entre o Sol e um planeta, a superioridade da dimensão da massa do Sol conduz a que o foco se situe abaixo da superfície solar, executando o planeta a maior parte do movimento. As soluções teóricas encontradas, no caso do planeta Júpiter, mereceram uma grande concordância quando comparadas com as observações verificadas.

Newton também se debruçou sobre o problema da órbita da Lua, a qual não era resultante exclusivamente da gravidade da Terra uma vez que o Sol exercia também a sua influência gravitacional. No modelo de

Newton, a Terra, a Lua e o Sol atraem-se uns aos outros, por uma força de gravidade que depende exclusivamente das suas massas e das suas distâncias. No entanto, ocorriam determinadas discrepâncias demasiado elevadas para se poderem considerar erros de observação. Esta questão conduziu à análise dos efeitos gravitacionais provocados por outros planetas, nomeadamente Saturno, no caso de Júpiter, e à emergência do problema dos três corpos.

Incapaz de descobrir uma solução exacta para o problema do movimento da Lua, Newton teve de recorrer àquilo a que os matemáticos denominam como o “método das perturbações” para obter uma solução aproximativa. Esta solução consiste em ter em conta primeiro o efeito principal, no caso a influência gravitacional da Terra sobre a Lua, o que não é difícil porque é um regresso à situação simples e idealizada de dois corpos. O cálculo desta perturbação (ou destas perturbações, no caso de serem mais de três corpos) não pode ser descrita por uma fórmula matemática simples, como acontece quando se trata de dois corpos, problema que é agravado quando se passa a quarto ou mais corpos. Newton não encontrou solução, apesar de ter despendido um ano a desenvolver cálculos intensos, as posições lunares que calculava continuavam a diferir em $1/6$ de grau das posições observadas no céu. Este erro é apreciável porque a dimensão angular da Lua cheia é de apenas meio grau. Estando a Lua a uma distância de 384 000 quilómetros, demorando a sua luz pouco mais de um segundo a chegar até nós, uma tal distância é facilmente mensurável.

Newton considerou o seu trabalho sobre a Lua um fracasso, facto que o levou a abandonar a ciência. Talvez sentisse que deixara de ter o poder criativo da sua juventude, que lhe permitira no ano de 1666, com a

idade de 23 anos, modificar o rosto do Universo com a descoberta simultânea da gravitação universal, do cálculo infinitesimal e da natureza da luz. Newton abandonou o seu cargo de professor da Universidade de Cambridge, em 1696, e passou a maior parte do resto da sua vida num lugar administrativo na Tesouraria Real, supervisionando a cunhagem da moeda (THUAN, 1998).

O fracasso de Newton não desencorajou os seus sucessores, que tornaram a abordar, ainda com maior vigor, o problema da Lua. As promessas de glória, de prestígio e de influência somavam-se ao interesse científico. Os resultados e contra-resultados sucederam-se a uma cadênciá rápida nas academias de ciências da Europa, sobretudo em Paris, Londres e Berlim. Os maiores matemáticos do século XVIII e XIX debruçaram-se sobre a questão, contando-se entre eles o suíço Leonhard Euler (1707-1783), ou os franceses Joseph-Louis de Lagrange (1736-1813) e Pierre Simon de Laplace (1749-1827). Descobriram assim uma nova matemática mas o problema da Lua permanecia sem solução. Euler passou quarenta anos da sua vida à volta da tentativa de construção de uma teoria do movimento da Lua, mas confessou-se vencido: “*Tentei durante estes quarenta anos construir uma teoria do movimento da Lua a partir dos princípios de gravitação, mas encontrei tantos obstáculos no meu caminho, que tive de parar... Não vejo como poderá ser concluída esta investigação sobre a Lua, nem como poderá ser utilizada para fins práticos.*” (citado em THUAN, 1998). Laplace conseguiu reduzir a distância a 1/120 grau, mas também não conseguiu dominar a Lua. Na realidade todos os cálculos efectuados no século XIX, graças às leis de Newton e diversos instrumentos matemáticos pouco mais precisos eram que os resultados obtidos empiricamente 2000 anos antes pelos astrónomos gregos e babilónicos que observavam os eclipses.

Em pleno século XIX, cerca de trinta anos após a descoberta de Neptuno, o astrónomo e matemático George William Hill, conseguiu reduzir o problema dos três corpos a um sistema de quatro equações com quatro variáveis representando assim a posição do corpo pequeno e a sua velocidade no plano. Este sistema de equações baseava-se fundamentalmente em três pressupostos básicos:

- 1 - um dos três corpos apresentava uma massa ínfima, não exercendo influência nos outros dois;
- 2 - os corpos maiores moviam-se em círculos e não em elipses, em torno de um centro comum; e,
- 3 - os três corpos moviam-se num único plano.

Embora simples na aparência estas equações continuavam a desafiar a tentativa de encontrar uma solução geral. As potencialidades informáticas actuais permitem determinar com facilidade soluções particulares. Mas estes instrumentos não estavam disponíveis naquela época.

O problema dos três corpos, e em particular, o problema reduzido de Hill, foi retomado, alguns anos mais tarde por Henri Poincaré. Como alguns dos seus predecessores, também ele falhou na tentativa de solução das equações, mas trouxe um elevado contributo científico através da demonstração de que as equações não têm solução. Isto é, as equações possuem uma solução geral, mas não uma solução possível de ser encontrada. Poincaré considerou sistemas de equações mais gerais do que os desen-

volvidos para o problema dos três corpos, os quais vieram a estar na base dos fundamentos estabelecidos na teoria dos sistemas dinâmicos²⁸.

Poincaré propôs um método inteiramente original para encarar os problemas da mecânica celeste. Através deste método, e de maneira totalmente inesperada, veio a confrontar-se com o caos. Poincaré demonstrou que, no caso de três corpos interagirem entre si, as equações de Newton continham, não apenas o que era regular e previsível, mas também o irregular e imprevisível. *A Lua recusava vergar-se aos cálculos porque havia no seu comportamento uma parte de imprevisibilidade que Newton e os seus sucessores ainda não tinham detectado. Em suma, as equações de Newton continham, em germe, o caos* (THUAN, 1998).

Antes de Poincaré, os matemáticos sustentavam a estabilidade do sistema solar analisando a natureza das soluções das equações de Newton, as quais assentavam no pressuposto de que a posição e a velocidade de um corpo num dado instante determinam todas as posições e velocidades futuras desse corpo, do mesmo modo que resultam das suas posições e velocidades passadas, ou seja, descrevem a diferença entre o instante presente e aquele que vem imediatamente antes ou depois. Por isso as equações de Newton podem assumir a forma de equações diferenciais. A solução para estas equações tinha a forma de uma soma interminável de expressões algébricas, denominadas como “série”. Contudo, o cálculo de todos os termos da série revelava-se inoperacional, pelo que se pensava poder obter uma ideia razoavelmente exacta do comportamento dos planetas avaliando os primeiros termos da série, desprezando os termos seguintes

²⁸ Em sentido lato, sistema com pequena quantidade de aleatoriedade, desde que o comportamento qualitativo não seja consideravelmente modificado se a aleatoriedade for retirada, de alguma forma.

porque pouco contribuiriam para a solução final. A série denominava-se então convergente porque justamente convergiria rapidamente para a solução final. No entanto, as séries não são necessariamente convergentes, apresentando-se muitas das vezes como divergentes: a inclusão dos novos termos na série aumenta inevitavelmente o resultado final, que nunca se aproxima de um valor particular.

Para Poincaré não lhe parecia suficiente apresentar soluções na forma de séries intermináveis. Ele pretendia abranger a realidade na sua globalidade. Ora, o método das equações diferenciais isolava fragmentos da realidade, sendo essa mesma realidade seguidamente reconstituída através da junção dos diversos fragmentos.

Como o próprio Poincaré escreveu: *numa primeira análise, os esforços dos sábios tendem sempre a resolver o fenómeno complexo dado directamente pela experiência, num número muito grande de fenómenos elementares.*

E isto de maneiras diversas: em primeiro lugar no tempo. Em vez de considerar no seu conjunto o desenvolvimento progressivo do fenómeno, procura-se simplesmente ligar cada instante ao instante imediatamente precedente; admite-se que o estado actual do mundo não depende senão do passado mais próximo, sem ser directamente influenciado, por assim dizer, pelos acontecimentos de um passado longínquo. Graças a este postulado, em vez de estudar toda a sucessão dos fenómenos, delimita-se um fenómeno “por recorrência ao método das equações diferenciais”.

Numa fase posterior procura-se decompor o fenómeno no espaço. O que a experiência indica é um conjunto confuso de factos produzidos num teatro de uma certa extensão; é necessário um esforço para situar o fenómeno elementar que estará, pelo contrário localizado numa região muito pequena do espaço[...] Na história do desenvolvimento da Física , distinguem-se duas tendências inversas. Por um lado, descobre-se a cada instante, ligações novas entre os objectos que pareciam dever ficar para sempre se-

parados; os factos dispersos deixam de ser estranhos uns aos outros; eles tendem a ordenar-se numa imponente síntese. A ciência caminha para a unidade e para a simplicidade.

Por outro lado, a observação revela todos os dias, fenómenos novos; é necessário que eles permaneçam muito tempo no seu lugar, e algumas vezes para que aconteça um, tem de se demolir um canto do edifício. Nos fenómenos conhecidos, em que o nosso sentido grosso nos mostra a uniformidade, apercebemo-nos de detalhes mais variados dia a dia; o que aparenta simplicidade torna-se complexo e a ciência parece caminhar para a variedade e complexidade.

Das duas tendências inversas, qual parece triunfar e qual se apagará? Se é a primeira, a ciência é possível; mas nada o prova a priori, e pode recuar-se que após ter feito esforços em vão para moldar a natureza contra vontade dela ao nosso ideal de unidade, extrausado pelo fluxo sempre ascendente de novas riquezas, não devemos renunciar a classificá-los, a abandonar o nosso ideal e a reduzir a ciência ao registo de inenarráveis receitas.

A esta questão, não podemos responder. Tudo o que se pode fazer, é observar a ciência de hoje e compará-la com a de ontem. Deste exame, pode-se sem dúvida tirar algumas conjecturas (POINCARÈ, 1968).

Poincaré pretendia, em vez de um ponto de vista de formiga, limitado ao monte de terra e ao tufo de erva mais próximo, ter uma visão de águia sobrevoando montanhas e vales. Quanto ao problema dos três corpos, o exame de uma única órbita, correspondente a uma combinação especial de condições iniciais, parecia-lhe demasiado restrito. Para ele era necessário visionar simultaneamente a paisagem global das órbitas, com todas as combinações possíveis de condições iniciais. A este propósito e aproveitando a sua extraordinária intuição geométrica, inventou técnicas que estão, ainda hoje, na base do estudo do caos (THUAN, 1998).

Poincaré começou, então, por introduzir o espaço de fases²⁹, espaço hipotético n-dimensional em que cada estado do sistema é representado por um ponto, e as soluções particulares aparecem como curvas especiais - curvas de solução, denominadas geralmente como órbitas. Posteriormente, Poincaré introduziu o conceito de superfície de secção - secção de Poincaré - uma variedade $(n-1)$ dimensional embutida no espaço de fase que intersecta as curvas de solução. Uma órbita periódica simples, como um círculo ou uma elipse, cruzará a secção em apenas um ponto, fixo; órbitas periódicas mais complexas podem cruzar em vários pontos antes de voltar ao primeiro e repetir o ciclo. Nesta sequência, Poincaré aponta a possibilidade de soluções *assintóticas*. Estas curvas de solução são caracterizadas por se aproximarem mais de uma curva de solução periódica à medida que o tempo passa. Deste modo, a sequência de intersecções com uma superfície de secção converge sobre um ponto fixo. Outras soluções podem ter comportamentos *assintóticos* se for invertida a direcção do tempo, ou seja, as sequências de intersecções podem parecer emanar de pontos fixos. Por último, podem ocorrer soluções duplamente *assintóticas*, porque em ambas as direcções do tempo revelam-se *assintóticas* (LÖRENZ, 1996).

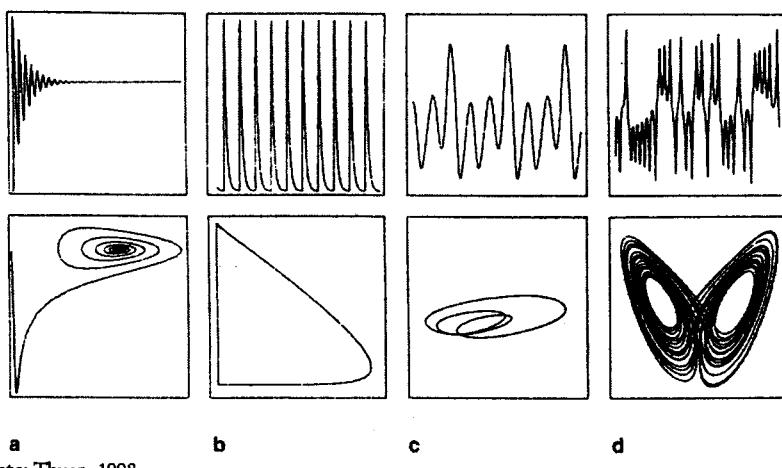
Uma sequência que surge de um ponto fixo e subsequentemente converge para o mesmo ponto único e de modo idêntico para o próprio ponto, é denominada de *homodínica*. Poincaré demonstrou que a presença de um ponto homoclínico implica a existência de um número infinito de sequências periódicas, com diferentes períodos, e também um número infinito de sequências não-periódicas. Este raciocínio matemático qualitativo

²⁹ Espaço hipotético que apresenta tantas dimensões quantas as variáveis necessárias para especificar um estado de um dado sistema dinâmico. As coordenadas de um ponto no espaço de fase são um conjunto de valores simultâneos das variáveis.



constituiu a descoberta do caos, pelo menos no sentido estrito (LORENZ, 1996).

Todo o trabalho desenvolvido por Poincaré evidencia a dependência sensitiva e levanta a possibilidade de, o que geralmente é denominado por acaso ou aleatoriedade, ser, em circunstâncias várias, consequência ou resultado de alguma condição anterior, apesar de poder ser desconhecida a condição que o provocou. Em determinados acontecimentos, a condição antecedente relevante que o provocou é impossível de ser detectada; noutras, pelo contrário, é possível observar com bastante precisão o antecedente que o provocou, embora não perfeitamente. Nesta situação, a incerteza pode aumentar e tornar-se eventualmente dominante (fig. 11.1.).



Fonte: Thuan, 1998

Fig. 11.1. : Retratos no espaço das fases. O comportamento dinâmico de um sistema pode ser representado de duas formas distintas. A forma clássica representa a evolução do sistema em função do tempo (figura de cima). A maneira moderna consiste em estudar as trajectórias de um ponto que representa o estado dinâmico do sistema no espaço das fases (figura de baixo). Por exemplo, o sistema: (a) converge para um estado de equilíbrio depois de muitas oscilações, o que corresponde, no espaço de fases, a anéis que convergem para um ponto; (b) repete-se periodicamente no espaço das fases, o que corresponde a uma órbita cíclica; (c) movimento periódico mais complexo, apenas se repete após três oscilações diferentes: possui um ciclo de três; (d) caótico, no espaço das fases possui a forma em asas de borboleta do atrator estranho de Lorenz (THUAN, 1998)

Neste espaço de fases, Poincaré introduziu três coordenadas espaciais e três coordenadas de velocidade. Retomando, então, o problema dos três corpos, são necessárias seis dimensões para descrever a Lua, outras seis para descrever a Terra e ainda outras seis para descrever o Sol. Deste modo, para ter uma visão global dos três corpos é necessário um espaço a dezoito dimensões. Graças a esta profusão de dimensões, Poincaré, deixou de estar reduzido a uma visão isolada de uma questão de cada vez, para passar a ter uma visão global e simultânea de todos os intervenientes no processo. Neste espaço multidimensional, todo o sistema solar passará a estar representado por um único ponto, em vez de o estar por dez pontos (um para o Sol e nove para os planetas) num estado tridimensional convencional. Por muito complicado que seja o sistema estudado, por muito numerosos que sejam os intervenientes no processo, um único ponto no espaço abstracto é suficiente para representar a totalidade de um sistema.

Mas o que interessava a Poincaré não era tanto o aspecto estático e cristalizado de um sistema, mas sobretudo o seu aspecto dinâmico e evolutivo. Ele não pretendia estudar a Lua imóvel na sua órbita, mas a forma como se move e como altera a sua órbita ao fim de milhares de anos. Quando o sistema se altera e evolui, o ponto que o representa no espaço multidimensional move-se e descreve uma curva nesse espaço. Alterem-se as condições iniciais e eis que ele desenha outra trajectória. O conjunto das soluções para as equações diferenciais que descrevem o sistema corresponde a uma multiplicidade de curvas no espaço abstracto. *Assim, a verificação da evolução de um sistema num espaço real depende de forma sensível das condições iniciais, bastará, para tanto, estudar “os movimentos de duas folhas com trajectórias muito próximas uma da outra no rio matemático”. Se as trajectórias divergirem, o sistema é muito sensível*

às condições iniciais. Se, pelo contrário, as trajectórias se mantiverem e se assemelharem, não é sensível a essas condições (THUAN, 1998).

O espaço matemático das fases, que permitiu, a Poincaré, adquirir uma visão global, trazendo-o de volta ao problema dos três corpos, revolucionou o domínio matemático que se ocupa das relações entre forças e movimentos e a que se chama “dinâmica”. Mais importante do que isso, faria sair da sombra um actor inteiramente inesperado, que viria a desempenhar um papel fundamental na “fabricação” do Real: o caos (THUAN, 1998).

Kepler e Newton ensinaram que um planeta prossegue incansavelmente a sua ronda à volta do Sol seguindo uma órbita elíptica, com o Sol num dos focos da elipse. O problema dos três focos apresenta dificuldades próprias. Para analisar as ondas dos rios matemáticos no espaço das fases, Poincaré idealizou uma espécie de ecrã plano que deixasse passar as ondas sem as perturbar. Assim, uma elipse no espaço real corresponde a um anel num espaço matemático. Se um planeta traça infatigavelmente a mesma órbita no céu, como Newton considerou, o mesmo anel será percorrido sem descanso no espaço das fases. Este anel trespassará o ecrã – agora chamado “plano de Poincaré” – num único ponto (fig. 11.2.).

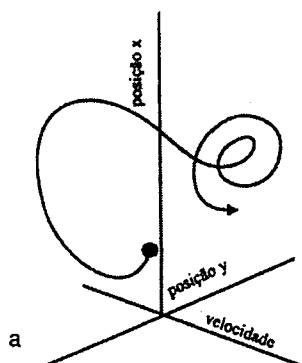


Fig.11.2. : Espaço abstracto das fases

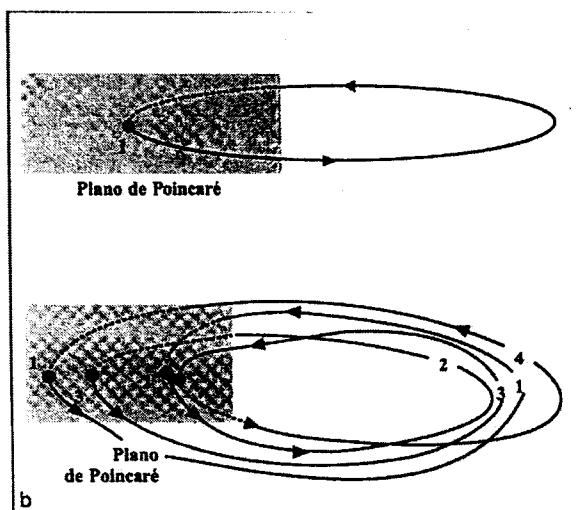


Fig. 11.3.: O Plano de Poincaré

Um movimento mais complicado, mas que se repita após quatro passagens, traduzir-se-á por quatro pontos nesse mesmo plano (fig. 11.3.). Uma simples trajectória que traça meandros no espaço das fases pode desenhar no plano de Poincaré paisagens maravilhosas que evocam montanhas e vales, ilhotas perdidas no meio de rios torrenciais

que se lançam no oceano. Facto extraordinário: o mesmo motivo repete-se ao infinito. Se se isolar uma pequena parte desta paisagem e aumentar com uma lupa, ver-se-á a mesma paisagem de montanhas de vales, de ilhas e de rios, mas a uma escala mais pequena. Da análise destes desenhos, Poincaré encontrou o caos.

Naturalmente, em 1888, não estava disponível a tecnologia informática da era actual, pelo que apenas a capacidade de imaginação de Poincaré, possibilitou entrever através desses desenhos no plano vertical, que ocorriam situações em que uma pequeníssima alteração na posição ou na velocidade inicial de um dos três corpos podia modificar totalmente a sua órbita. Esta pequena alteração podia provocar mudança da estabilidade para uma situação de caos. Poincaré percebeu então, que regularidade e caos estavam intimamente relacionados e que o imprevisível nunca estava muito longe do previsível. No plano de Poincaré, era possível encontrar situações de turbulência no meio de zonas regulares, do mesmo modo que podiam ocorrer zonas de calma no meio das regiões mais caóticas. Assim, Poincaré descobriu que um sistema de três corpos aparentemente simples como o Sol, a Terra e a Lua, regido por uma lei tão precisa e impositiva como a da gravitação universal de Newton, podia dar origem ao imprevisível e não determinado.

Com a introdução da incerteza, ruía por Terra o determinismo de Laplace, segundo o qual uma inteligência que conhecesse, num dado instante, as forças que animam as coisas da Natureza e as suas posições aprenderia de uma só vez o passado, o presente e o futuro do Universo, ou seja, nada voltaria a ser incerto. Com Poincaré, foi revelada a dupla face das leis mecânicas de Newton: se a face descoberta

destas leis é a da harmonia, a sua face escondida é a da desordem. *Se Newton é o profeta da ordem, Poincaré é o profeta do caos* (THUAN, 1998).

No século XIX, através de Poincaré, foram lançados os fundamentos da teoria dos sistemas dinâmicos e demonstrado que alguns sistemas apresentavam comportamentos caóticos, pelo menos em sentido estrito. As investigações científicas sobre sistemas dinâmicos viriam a ser retomadas, cerca de quinze anos após a morte de Poincaré, por George David Birkhoff. Este matemático lidava com sistemas de equações muito gerais e retirou conclusões científicas sobre um conjunto de conjecturas efectuadas por Poincaré. Birkhoff concedeu um realce particular às soluções periódicas, através do estudo aprofundado do conceito de um sistema conservativo, de um conjunto de soluções centrais, que se tornaram o conjunto de todas as soluções para as equações hamiltonianas³⁰ da mecânica celeste, mas que para muitos sistemas dissipativos³¹ familiares se tornaram em atrator³². A receptividade de Birkhoff em relação à irregularidade, conduziu-o ao estudo dos mapeadores³³ e verificou a existência de mapeadores bidimensionais nos quais um conjunto atrator poderá conter uma curva fechada - uma curva que forma um anel em torno de uma área interior e a separa de uma área exterior. Os estudos efectuados levaram-no a concluir que alguns mapeadores poderiam carregar continuamente al-

³⁰ Denomina-se sistema hamiltoniano um sistema conservativo - sistema dinâmico em que uma grandeza aparentemente variável permanece constante ao longo do tempo - que preserva o volume.

³¹ Sistema dinâmico no qual a imagem de qualquer conjunto de pontos de volume finito num espaço de fase é um conjunto de volume menor.

³² Num sistema dissipativo, o conjunto limite que não está contido em nenhum conjunto limite maior, e do qual nenhuma órbita emana.

³³ Sistema dinâmico cujas variáveis são definidas apenas para valores discretos do tempo. Um mapeamento geralmente regido por um conjunto de equações de diferenças.

guns pontos em uma direcção em torno do anel, enquanto outros eram carregados na direcção oposta, o que conduziu à dedução de que a curva fechada devia duplicar-se sobre ela mesma um número infinito de vezes. Em alguns mapeadores, as curvas eram atractores, e até mapeadores estranhos. Deste modo, talvez a denominação de curva não seja a mais correcta, uma vez que, de uma maneira geral não se pode ir de um ponto de uma destas curvas a um outro ponto, percorrendo uma distância finita sobre essa curva.

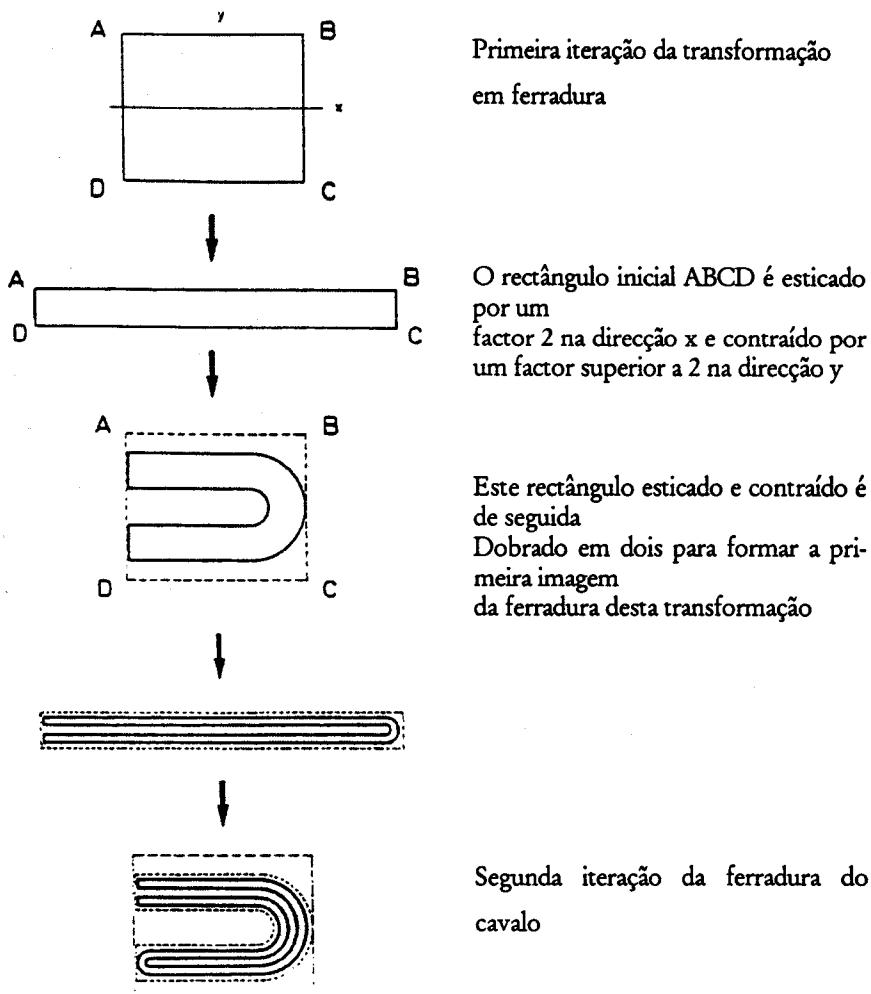
Após a morte de Birkhoff, Mary Cartwright e John Littlewood, em 1945, descobriram que, sob algumas condições, o sistema possuía duas soluções periódicas estáveis com períodos distintos e, a partir desta base afirmaram que uma das curvas invariantes, por eles determinada, era semelhante à *curva má* de Birkhoff. Os estudos desenvolvidos por Cartwright e Littlewood conduziram à identificação da primeira equação diferencial conhecida, que levou a um *conjunto atractor mau* e consequentemente, com exceção de alguns sistemas hamiltonianos sem conjuntos atractores, o primeiro a produzir caos limitado.

À medida que a década de 50 avançava, mais visível era o período de turbulência que se adivinhava para os anos 60 e dessa forma, o ambiente favorável para o desenvolvimento da nova teoria do caos. No desenvolvimento desta teoria, foi de particular importância o trabalho desenvolvido pelo matemático americano Stephen Smale, criador da famosa *ferradura*.

Para formular a ferradura, de Smale, admite-se que se tira um quadrado no espaço de fase. Seguidamente este quadrado é comprimido verticalmente, estendido horizontalmente, dobrado em forma de

ferradura e colocado de novo na posição original. Independentemente da forma como é movimentado o quadrado, as extremidades da ferradura projectar-se-ão sempre dos lados do quadrado que foram comprimidos e não dos que foram estendidos. Cada ponto do quadrado original será deslocado para um ponto da ferradura, mas não necessariamente para um ponto do quadrado propriamente dito. Os pontos que permanecem sempre dentro do quadrado, na medida que o processo é repetido para a frente e para trás, formam um conjunto invariante e Smale demonstrou que dentro desse conjunto, apesar da forma particular, existe o caos; a maior parte das sequências de repetições é não periódica. Assim, dentro do sistema todo, há, pelo menos, caos limitado. Se o conjunto invariante é ou não um atrator, e deste modo se existe ou não caos total, depende do que acontece aos pontos após terem saído do quadrado e em particular, se voltam de novo após as iterações posteriores (fig. 11.4.).

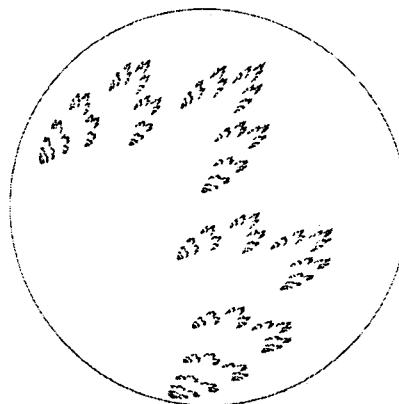
Vários anos após o estudo sobre a ferradura, Birkhoff no seu artigo intitulado *Sistemas Dinâmicos Diferenciáveis*, define os sistemas dinâmicos em termos de equações de diferenças - mapeadores - e apresenta o mapeamento tridimensional, denominado hoje vulgarmente como mapa solenóide. O solenóide apresenta um atrator estranho, independentemente de o conjunto estranho produzido pela ferradura fazer parte ou não de um atrator. Lorenz exemplifica a situação descrita através da tentativa de visualização de uma secção transversal de um arame infinito enrolado dentro de um tubo. Não existem ligações entre os pontos, embora aparentemente apresentem ligações, uma vez que estão mais próximos que os diâmetros dos pontos impressos (fig. 11.5.) (LORENZ, 1996).



Fonte: Boutot, 1993

Fig. 11.4.: Um quadrado e uma região para dentro do qual é levado um mapeamento. O mapeamento transporta o quadrado interno apresentado e forma de ferradura que o intersecta.

Os cientistas citados ao longo do texto estiveram na origem de todo o desenvolvimento da nova teoria do caos. Demonstrar soluções caóticas de sistemas de equações específicos e construir os atractores estranhos que os acompanham, só passaram a despertar verdadeiro interesse por parte da comunidade científica e a constituir objecto de estudo nos diversos domínios científicos, com o desenvolvimento tecnológico de âmbito informático. A informática permitiu estudar e analisar alterações comportamentais abruptas que ocorrem na complexidade de um sistema, quando se verificam pequenas oscilações no valor de uma constante. Exemplo deste novo impulso para o desenvolvimento desta teoria, são os resultados do modelo de turbulência atmosférica, de Edward Lorenz (1963), em que o recurso a suportes informáticos permitiu acompanhar *passo a passo* o cálculo das equações diferenciais.



Fonte: Lorenz, 1996

Fig. 11.5.: Uma secção transversal do atrator de um mapeador solenoide tridimensional, com uma secção transversal circular do tubo no qual ela está contida.

11.2. Paradigmas da Ciência e uma Nova Visão do Mundo

O século actual foi testemunha de grandes revoluções científicas. A teoria dos *quanta* de Planck e a teoria da relatividade de Einstein são as novas bases de compreensão do universo lançadas na primeira metade do século (PRIGOGINE³⁴, 1996). Um dos primeiros actos senão mesmo o primeiro da ciência moderna, correspondeu à unificação do mundo astral e do mundo sublunar que a velha Física aristotélica opunha: a lei da gravidade de Newton veio dar pela primeira vez uma explicação comum dos fenómenos celestes (movimento dos planetas) e dos fenómenos terrestres (queda dos corpos). É na realidade com uma e mesma lei que as pedras caem sob o solo e os planetas rodam em torno do Sol. A partir daqui, a unificação do mundo foi o principal motor da história das ciências.

No começo do século XIX, Ampère e Faraday unificaram a electricidade e o magnetismo, que tinham tendência a ser considerados como dois fenómenos distintos. Sabia-se que uma partícula carregada exercia sobre uma outra uma força, a força *eléctrica*. B. Franklin (1706-1790) mostrou que ela era atractiva se as cargas tivessem sinais contrários, e repulsiva se as cargas tivessem o mesmo sinal. Os físicos H. Cavendish (1731-1810) e C. Coulomb (1736-1806) investigaram a maneira de as quantificar, e descobriram, guiados pela lei de Newton, que estas eram inversamente proporcionais ao quadrado da distância entre as cargas. Sabia-se por outro lado, que um íman exercia sobre outro íman ou sobre um objecto metálico uma força magnética. T. Mayer (1752-1830) e Coulomb tinham mostrado que tal como no caso precedente, era inversamente proporcional ao quadrado da distância. Mas

a actualização desta analogia formal não autorizava para tanto que se confundissem, mesmo que incitados a seguir neste caminho. A descoberta principal ocorreu em 1820, quando um físico dinamarquês CErstedt Christian (1777-1851) se apercebeu, um pouco por acaso, que um fio rectilíneo percorrido por uma corrente eléctrica devia magnetizar a agulha de uma bússola colocada na proximidade. Isto significava que os electrões de uma carga eléctrica em movimento (os electrões deslocavam-se na corrente) produziam uma força magnética. Uma vez que o movimento da carga eléctrica era negativa e podia ser anulada por uma simples mudança de sinal, a distinção entre força magnética e força eléctrica tornavam-se simultaneamente relativas, o que significa que as duas forças eram, no fundo idênticas. “*A distinção explica o físico Abdus Salam*”³⁴, entre forças magnéticas e eléctricas é uma questão de ponto de vista: a carga eléctrica está em movimento ou não? Aqui reside a essência da unificação entre a electricidade e o magnetismo” (citado em BOUTOT, 1993). Sete anos após a descoberta de CErstedt, Ampère formulava, num célebre memorial sobre a *Teoria Matemática dos Fenómenos Electro-dinâmicos, Unicamente Deduzidos da Experiência*, publicado em 1827, a primeira teoria completa do electromagnetismo.

No entanto, apenas cinquenta anos mais tarde (1878) o electromagnetismo assume a sua forma (provisoriamente) definitiva, com J.C.Maxwell, que escreverá as equações do campo ao qual o seu nome permanecerá ligado. Na teoria de Maxwell, o campo electromagnético propaga-se sob a forma de ondas de frequências variáveis. Esta teoria veio permitir unificar não somente electricidade e o magnetismo mas

³⁴ In “La Mort de Newton”

³⁵ Prémio Nobel da física em 1979, pelos seus trabalhos sobre unificação das forças fundamentais

também o electromagnetismo e a óptica. A luz surge como uma onda electromagnética, de um género particular, isto é, cuja frequência permanece compreendida dentro de certos limites. As ondas radio, a radiação térmica, os raios luminosos, os raios X, os raios gama, são outros exemplos de ondas electromagnéticas. Einstein, como já se referiu, levou os últimos anos da sua vida na busca de uma teoria unificadora do electromagnetismo e da gravidade, o que parecia bastante natural pois as forças electromagnética e gravitacional estavam uma e outra na razão inversa do quadrado da distância.

A Física não foi contudo a única ciéncia a preocupar-se com esta procura da unidade que se pode qualificar como Jacques Monod, de “platónica”. Um percurso parecido, percorreram as ciéncias da vida (zoologia, biología). Os naturalistas realizaram uma primeira unificação do mundo animal , no séc^olo XIX, colocando em evidéncia planos gerais de organização comuns a diferentes espécies, o que se denominou por invariantes anatómicas. Cuvier reconheceu, por exemplo, quatro planos gerais segundo os quais eram “construídos” todos os animais. Estes planos gerais correspondiam aos quatro ramos dos Vertebrados, Moluscos, Articulados e Zoófitos. “Sob a multiplicidade de morfologias e de modos de vida dos seres vivos, [estes sábios] souberam reconhecer, comenta Jacques Monod, senão uma “forma única”, pelo menos um número finito de planos anatómicos, cada um entre os quais invariante no seio do grupo que os caracteriza”. Eles aproximaram-se de espécies aparentemente muito diversas como os Tunicados e os Vertebrados, os Cordados e os Equinodermes. Trata-se segundo Jacques Monod de um progresso considerável do qual os biólogos modernos nem sempre têm consciéncia. Mas esta primeira tentativa de unificação deixou subsistir uma diversidade irredutível, e foi necessário

reconhecer que numerosos planos de organização macroscópicos coexistiam na biosfera. Isto não é senão os desenvolvimentos da teoria celular, e sobretudo da bioquímica do começo do século XX que colocou efectivamente em dia a profunda e rigorosa unidade, à escala microscópica, do mundo vivo por inteiro. Sabe-se hoje que, da bactéria ao homem, a maquinaria química é essencialmente a mesma, na sua estrutura como no seu funcionamento. Todos os seres vivos são constituídos pelas mesmas macromoléculas, elas próprias formadas pelo agregado dos mesmos radicais em número finito. Todos os organismos desenvolvem as mesmas reacções químicas essenciais (BOU-TOT, 1993)

Duma forma geral, a ciência moderna foi desenvolvida com a certeza que a natureza era hoje homogénea e que a experimentação local descobria uma verdade geral (PRIGOGINE e STENGERS, 1986). A lei da queda dos corpos é um caso particular de uma lei mais geral, a da gravitação universal. As moléculas dos seres vivos comportam em última análise, os mesmos elementos que os da natureza inanimada, e obedecem então às mesmas leis fundamentais. Deste ponto de vista pode afirmar-se, como Prigogine (1986) que a ciência de hoje já não é a ciência “clássica” (PRIGOGINE e STENGERS, 1986).

A ciência esforça-se em reduzir a multiplicidade dos fenómenos naturais à manifestação de uma única e mesma realidade científica físico-química em que seja suficiente conhecer as leis para explicar o seu comportamento. É a mesma matéria, são os mesmos átomos que entram na composição dos seres vivos e das estrelas mais longínquas. As leis gerais, dizia Einstein, que servem de base à construção do pensamento do teórico, têm a pretensão de ser válidas para todos os

acontecimentos da natureza. No meio destas leis, deveria poder encontrar-se, pela única via da dedução lógica, a imagem, isto é, a teoria de todos os fenómenos da natureza, entre os quais se comprehende o da vida, se este processo de dedução não passar de longe a capacidade de pensamento humano. Não é então por princípio que se renuncia à integralidade da imagem física do mundo. A natureza fala uma única e mesma linguagem. O real é sempre semelhante a ele próprio, e as suas leis podem deduzir-se, das estabelecidas pela física fundamental.

O filósofo Émile Meyerson (1859-1933) é certamente um dos que puseram o meio em evidência, no princípio deste século, esta tendência unificadora característica da marcha científica. Ele via o domínio de um princípio fundamental da razão, o princípio que constitui “o verdadeiro modelo onde o homem move o seu pensamento”. O mundo exterior, a natureza, aparece como infinitamente mutável, modificando-se sem trevas ao longo dos tempos. Contudo, o princípio de causalidade postula o contrário: temos necessidade de compreender o passado e não se pode senão supor a identidade no tempo. Explicar um fenómeno é identificar o que o precede. A explicação científica é completamente tautológica ou representativa: *as coisas são assim por que eram já assim anteriormente*. Todo o esforço da ciência consiste em descobrir, segundo as mudanças aparentes dos fenómenos, as identidades reais ocultas, isto é, qualquer coisa que subsiste no tempo ou no espaço. O atomismo que reconduz a diversidade a arranjos de partículas idênticas no espaço é, deste ponto de vista, o declínio natural do pensamento científico, o que confirmará de resto, a permanência desta doutrina na história. Investigando a identidade no espaço, a ciência enuncia os princípios de conservação, como o princípio da inércia

(conservação do movimento), o da conservação da massa (química) ou da energia.

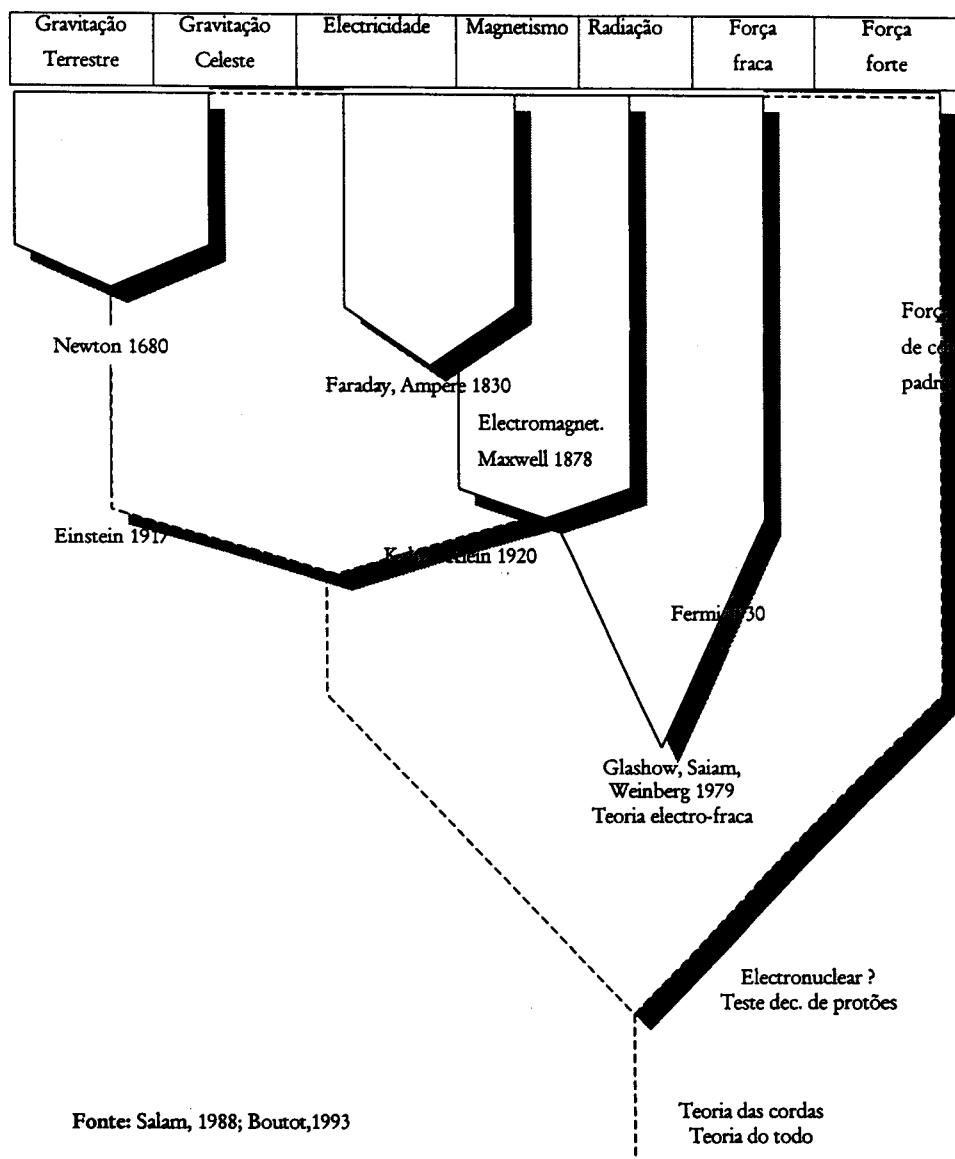


Fig. 11.6.: As etapas de unificação da Física

Investigando a identidade no espaço, a ciência postula a unidade da matéria, que ela reduz, em última instância, como se vê na relatividade geral, no espaço e finalmente no vazio. Sujeito às duas tendências (identificação no tempo e no espaço), diz Meyerson, *temos de teoria em teoria e de identificação em identificação, fazer desaparecer completamente o mundo real*. Tem-se então de explicar, isto é, negar a mudança, identificando o antecedente e o consequente e a marcha do mundo é suspensa. Fica então um espaço completo de corpos. Constituem-se os corpos com o espaço, reconduzem-se os corpos ao espaço, os quais por sua vez são eclipsados no espaço. Os desenvolvimentos recentes da ciência contemporânea e concretamente os da Física fundamental, não invalidariam, bem pelo contrário, da análise de Meyerson. Após o começo deste século, a Física não prosseguiu somente a sua investigação de invariantes mas colocou a própria invariância no princípio do que é denominado por teorias padrão na física das partículas (invariância formal dos grupos sob a acção de grupos de simetria). Após ter unificado a matéria e as forças (teoria quântica dos campos) e mais recentemente o electromagnetismo e a interacção fraca (teoria electro-fraca), a física investiga hoje a teoria dita “unitária” que unificará as quatro forças fundamentais da natureza (electromagnetismo, gravidade, interacção fraca, interacção forte). Num mesmo movimento, ela está empenhada na investigação dos constituintes últimos da matéria (os quarks) cuja associação permitirá reconstituir as partículas que entram na composição de todos os núcleos atómicos (partículas hadrónicas). Comprendendo o seu campo de investigação os problemas cosmológicos, alimenta a ambição de remontar ao estado original em que a matéria era ainda totalmente indiferenciada e donde é procedente, por uma ruptura de simetria, o mundo que se conhece (BOUTOT, 1993).

11.3. A Irreversibilidade do Tempo

Enquanto a ciência clássica insistia sobre a estabilidade e o determinismo, hoje assiste-se por todo o lado, a instabilidades, flutuações, bifurações: trata-se de uma mudança de perspectiva característica da Segunda metade do século XX. E contudo, existe ainda hoje *um paradoxo do tempo*, pois aquele que se vive é essencialmente irreversível, enquanto nos objectos físicos simples, um pêndulo ou um sistema planetário, não se vê essa flecha do tempo. O tempo que se vive seria então ilusório ou, pelo contrário, uma propriedade fundamental do universo? De quando é que data a tomada de consciência desse paradoxo? Da aparição da teoria darwiniana, pois foi ela a primeira a tratar da evolução e, por isso, da irreversibilidade. E a formulação, seis anos mais tarde, do famoso segundo princípio da termodinâmica foi a correspondente física da teoria darwiniana dado que “entropia” significa “evolução”, que não pode senão aumentar no decurso do tempo.

Nos últimos decénios a atenção volta-se para a temporalidade, a todos os níveis, desde as partículas elementares à astrofísica, da evolução global do universo até ao nosso nível macroscópico. A Física clássica postulava que as suas leis eram determinadas e que no seu seio, o tempo era reversível; actualmente entra-se num mundo no qual a diversificação e a irreversibilidade detêm um papel cada vez mais importante. “O tempo é uma ilusão” repetiu-o frequentemente Einstein.

Sabe-se que a concepção newtoniana da ciência moderna se colocou sob a protecção de um Deus todo-poderoso, garante supremo de uma rationalidade que data da monarquia absoluta. Nesta perspectiva, para

quem atribui a omnisciência a um Deus que dita as leis da natureza, o tempo não passa senão de uma ilusão.

É nesta medida que se pode afirmar que a era actual está em curso de redescobrir o tempo. Coloque-se então a questão de saber como no início do século XX, se concebia a relação entre tempo histórico, irreversível e tempo físico, reversível. É interessante notar que existia um certo consenso. Os grandes pensadores como Eisntein, Bergson ou Heidegger, apesar das suas diferenças, partilhavam a ideia que um tempo irreversível não é nem pode ser o objecto de uma ciência verdadeira (PRIGOGINE³⁶, 1996). “*No século XIX, a vida, as diferentes espécies, a existência dos homens e das suas sociedades foram concebidos como produtos da evolução. Actualmente no final do século XX, já nada parece susceptível de fugir a esse modo de inteligibilidade, nem a matéria nem mesmo o espaço-tempo. Não só as estrelas nascem, vivem e morrem, como também o próprio universo possui uma história da qual as partículas elementares são a imagem, nunca parando de se criar, de desaparecer e de se transformar. Esta descoberta da evolução em todas as condições que pareciam atemporais torna ainda mais paradoxal a noção clássica de inteligibilidade que ainda hoje domina a nossa concepção das “leis da natureza”*” (PRIGOGINE e STENGERS, 1990).

De facto, o problema do tempo está presente desde a alvorada do pensamento racional, após os filósofos gregos terem afrontado o problema ontológico. Já Aristóteles introduzia, na sua análise, a ideia de uma polaridade radical do tempo: o tempo é qualquer coisa do movimento, na perspectiva do antes e do depois. Aristóteles procurava então de onde surge esta perspectiva do antes e do depois. Encontra-se inscrita na natureza das coisas “objectivas” ou é uma característica do espírito que a ob-

³⁶ In La Mort de Newton

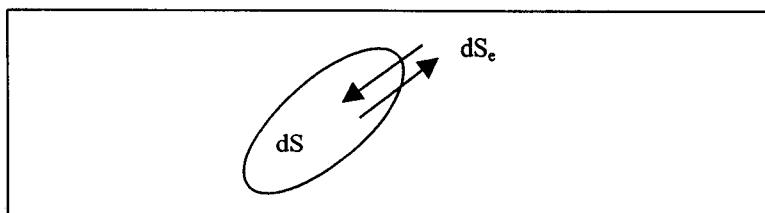
serva? Tal é o problema fundamental dos filósofos pós-aristotélicos: o tempo é apenas uma ilusão humana, ou pelo contrário uma propriedade do cosmos? Prigogine (1996), acredita que uma das características da era actual é a possibilidade que é dada de escolher, pela primeira vez na história do pensamento científico, entre estas duas vias: a evolução recente das ciências, teóricas e experimentais, corrobora a ideia de que a irreversibilidade do tempo é um elemento fundamental da natureza (PRIGOGINE, 1996).

Há cento e trinta e cinco anos, em 1865, Clausius reformulava o segundo princípio da termodinâmica, introduzindo-lhe uma nova quantidade, a entropia. A importância deste conceito tinha sobretudo a ver com o facto de que, a causa dos processos irreversíveis, orientados no tempo, a entropia do universo (considerado como um sistema isolado) vai aumentando. Tratava-se de uma afirmação de facto admirável numa época dominada pela Física clássica: a formulação deste segundo princípio marca a inserção de uma ideia de história do Universo, no contexto da ciência moderna.

“Tal como foi enunciado por Clausius, o segundo princípio tinha sem dúvida como objecto o que nós podemos chamar as actividades físico-químicas da matéria. As reacções químicas, os fenómenos de transporte, de difusão e propagação, que correspondem a evoluções de entropia crescente, não podem ser utilizados como processos reversíveis, ao contrário do movimento do péndulo, por exemplo. Qualquer reacção química marca uma diferença entre o passado e o futuro, produzindo-se em direcção ao nosso futuro. Da mesma maneira, é em direcção ao nosso futuro não ao nosso passado, que o calor se difunde de um ponto mais quente para um mais frio. No entanto, o segundo princípio, no sentido de Clausius, definia essa actividade de um ponto de vista muito particular: sob certas condições, ela leva inevitavelmente ao seu próprio desaparecimento,

isto é, ao estado de equilíbrio” (PRIGOGINE e STENGERS, 1990). A partir de Clausius a Física conheceu dois conceitos de tempo: o tempo como repetição e o tempo como degradação. Nem a repetição (negação do tempo) nem a decadência (o tempo considerado segundo o ângulo da degradação) podem considerar a complexidade do mundo físico. É então necessário elaborar um terceiro conceito de tempo, que contenha também os aspectos positivos, de construção.

Recorde-se que se pode operar uma distinção entre os dois termos aditivos da variação da entropia dS : sendo respectivamente dS_e e dS_i as permutas (positivas ou negativas) entre um sistema e o seu ambiente e a produção interna do seu ambiente (sempre positivo). No caso de um sistema isolado, $dS = dS_i$ é positivo ou nulo. Mas que acontece se o sistema está em interacção com o seu ambiente? É claro que toda a relação da termodinâmica que tem subjacente uma teoria dos sistemas naturais deve defrontar-se com os sistemas colocados num dado ambiente.



$$dS = dS_i + dS_e \geq 0$$

Fonte: Prigogine, 1996

Fig. 11.7: Variações de entropia de um sistema sujeito a interacções com o meio envolvente.



Sistema isolado: $dS \geq 0$

Fonte: Prigogine, 1996

Fig. 11.8.: Crescimento monótono de entropia de um sistema isolado.

Nos seus primórdios, a termodinâmica não analisava senão os estados de equilíbrio. Num sistema isolado em equilíbrio, não existe a flecha do tempo. Em 1931, Osanger definiu as relações gerais para a termodinâmica do não equilíbrio, na região próxima do equilíbrio: os sistemas sujeitos a interacções fracas com o seu ambiente respondem linearmente a essas interacções. Estas relações lineares e recíprocas entre as forças e os fluxos evidenciaram a necessidade do estudo da termodinâmica do não equilíbrio, em termos de potenciais termodinâmicos cujos extremos correspondem a estados finais, tendo sido entendida uma nova função potencial, a produção de entropia.

Formulado em 1945, o teorema da produção mínima de entropia fixa que, no domínio de validade das relações de Osanger (a região linear), um sistema evolui para um estado estacionário caracterizado pela mais fraca produção de entropia compatível com os lugares determinados pelas condições ambientais. Este estado estacionário é necessariamente um estado de não equilíbrio, cujos processos dissipativos se produzem a uma velocidade finita. Mas dado que todas as grandezas relativas do sistema não variam no tempo, a actividade do sistema aumenta necessariamente a entropia do ambiente: $dS = 0$ im-

Aplica um balanço entre dS_e e dS_i . O fluxo negativo dS_e significa que o sistema transfere entropia para o exterior.

Esta termodinâmica linear do não-equilíbrio devia ser generalizada de modo a obter uma termodinâmica do não equilíbrio válida para sistemas afastados do equilíbrio. Os sistemas sujeitos a fortes forças de interacção apresentam forças que são não lineares; por consequência, o seu comportamento apresenta uma multiplicidade de estados estacionários e de novas características ligadas a estes estados, como bifurcações e flutuações. Analisem-se dois exemplos de comportamentos de sistemas de não equilíbrio, descobertos recentemente. O primeiro, denominado estabilidade de Bénard é um exemplo significativo de instabilidade num estado estacionário que dá origem a um fenómeno de auto-organização espontânea; a instabilidade é devida a um gradiente térmico criado num estado líquido horizontal. A parte inferior é mantida a uma dada temperatura mais elevada que a da parte superior; tem como consequência um fluxo térmico estacionário, de baixo para cima. Quando se trata de pequenas diferenças de temperatura, o calor pode ser transportado por condução, sem convecção; mas quando o gradiente térmico imposto transpõe um certo limiar, o estado estacionário (estado de repouso do líquido) torna-se instável: a convecção surgida, que corresponde ao movimento coerente de um grande número de moléculas, aumenta a taxa de crescimento do calor. Nas condições apropriadas, a convecção produz uma organização espacial complexa do sistema. Este fenómeno pode ser visto de uma outra forma. Dois elementos estão interligados: o fluxo de calor e a gravidade; em condições de equilíbrio, a gravidade não apresenta efeitos apreciáveis sobre um leito delgado, cuja espessura é da ordem de um centímetro. Pelo contrário, longe das condições de equilíbrio a

matéria torna-se bem mais sensível às condições iniciais do mundo exterior porque ela não está em estado de equilíbrio. Como afirma Prigogine (1996) *em estado de equilíbrio a matéria é cega e longe do equilíbrio que ela começa a ver* (PRIGOGINE, 1996).

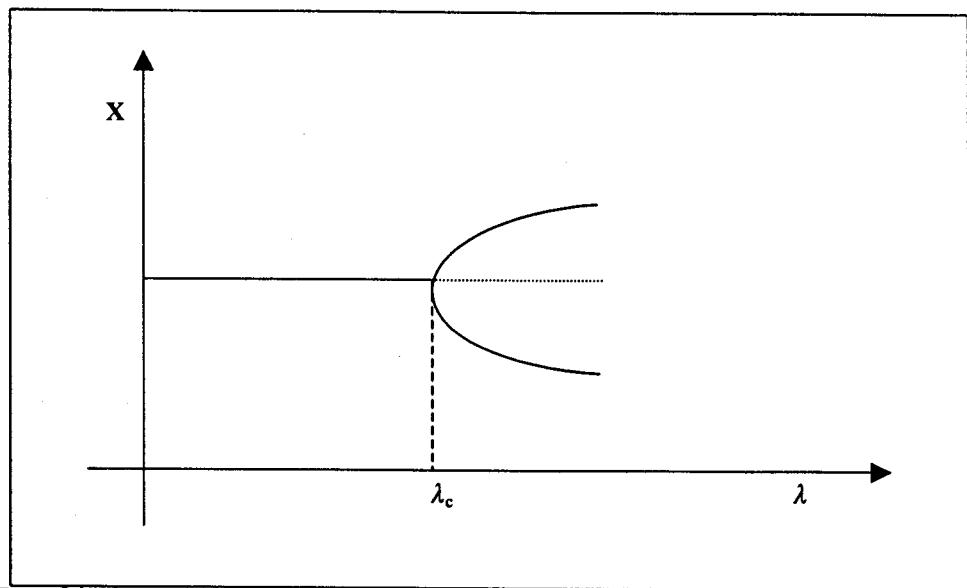
Analise-se agora, um segundo exemplo, o das oscilações químicas. Imagine-se uma reacção química cujo estado pode ser controlado através de reagentes. Supondo que dois dos componentes sejam formados respectivamente por moléculas azuis e vermelhas, em quantidades idênticas. Espera-se uma cor misturada, na globalidade ou com algumas manchas ocasionais vermelhas ou azuis. Na realidade, o fenómeno não ocorre necessariamente assim. Para toda uma classe de reacções , vê-se o recipiente tornar-se vermelho: é um “relógio químico”. Em certa medida, é uma violação das intuições no que concerne às reacções químicas.

Por hábito, considera-se que as moléculas químicas são produzidas por moléculas que se deslocam de maneira desordenada e que se encontram ao acaso. Mas para poder mudar as suas mudanças periódicas, as moléculas devem “comunicar” de algum modo. Por outras palavras, observam-se aqui as escalas supra-numerárias, do mesmo modo no tempo como no espaço, produzidas pela actividade química. A condição fundamental para que se verifiquem estas oscilações químicas é a presença de reacções químicas auto- ou cross-catalíticas, que provocam comportamentos não lineares, como descrevem os numerosos estudos de bioquímica moderna.

A não linearidade e a condição de não equilíbrio estão intimamente ligadas; têm por efeito conduzir a uma multiplicidade de esta-

dos estáveis (pelo contrário aproximando-se do equilíbrio não há senão um estado estável. Esta multiplicidade pode ser ilustrada por um diagrama de bifurcação.

Pode-se representar a solução de um problema por X , em função de certos parâmetros de bifurcação λ , em que X poderia, por exemplo, a concentração de alguma espécie química e λ poderia estar ligado ao tempo durante o qual se deixam as moléculas no reactor químico. Para certos valores críticos do parâmetro de controlo, denominados λ_c , novas soluções são apresentadas. Mais, no ponto de bifurcação, o sistema tem a “escolha” entre dois ramos: pode-se atingir um comportamento estocástico: na proximidade de um ponto de bifurcação, as flutuações têm um papel importante.



Fonte: Prigogine, 1996

Fig. 11.9.: Bifurcação na vizinhança de um ramo estacionário para um parâmetro de controlo.

11.4. Estruturas Dissipativas

O homem sabe hoje que não está só na imensidão indiferente do universo. Se a ciência clássica reduziu a natureza a um autómato desencantado, pelo contrário a ciência contemporânea devolveu-lhe a sua potência inovadora, e através de um diálogo frutuoso reintegrou o homem no universo que ele observa. Um dos fundadores desta nova visão do mundo é Ilya Prigogine, laureado em 1977 com o Prémio Nobel da Química pelas suas contribuições na termodinâmica do não equilíbrio e muito particularmente pela sua teoria das “estruturas dissipativas”, ou seja, criação da ordem pela desordem. Prigogine inventou o conceito de ordem por flutuações que prova que o caos entrópico, através de flutuações/bifurcações ínfimas, é origem de evolução e fonte de novas organizações. A teoria desenvolvida por Prigogine pode ser extrapolada para os mais diversos domínios desde a formação dos turbilhões, à organização das sociedades das térmitas, passando pelo próprio crescimento urbano (PESSIS-PASTERNAK, 1993).

Em 1982, Ilya Prigogine, em entrevista concedida a Guta Pessis-Pasternak afirmou que *as ciências estão hoje envolvidas num processo de refundição conceptual. No que diz respeito à matéria os atomistas gregos legaram um projecto: tentar conciliar a permanência e a mudança. Daí a ideia das combinações temporais de elementos permanentes: átomos e moléculas ontem, partículas elementares hoje. Ora, uma das descobertas fundamentais dos últimos decénios é precisamente a da instabilidade das partículas elementares. Se as actuais experiências se revelarem positivas, seria necessário concluir que o projecto atomista, por mais fecundo que tenha sido, atingiu os seus limites. De resto procuramos também simetrias no universo: o caso mais evidente é o das equações da mecânica quântica sobre partículas e antipartículas. Sendo estas últimas um produto de laboratório somos levados a concluir que esta simetria não é uma necessidade inscrita no nosso meio cosmológico. Vivemos, pois num universo de simetria*

estilhaçada estranha ao ideal de harmonia geométrica da física clássica. Refundições tão fundamentais como essa esperam-nos também no que se refere ao tempo e ao espaço. Este já não pode ser considerado o parâmetro externo da dinâmica clássica confinado ao seu papel de balizar as trajectórias. Apresenta a partir de agora características diferentes, ligadas mais à irreversibilidade e por isso à história a todos os níveis, das partículas à cosmologia. Na época em que a mecânica clássica reinava sem contestação, podia-se falar de nível fundamental. Hoje a física abriu-se e somos levados a falar de pluralidade de níveis inter-relacionados sem que nenhum deles possa ser considerado prioritário ou fundamental (entrevista concedida a Guta Pessis-Pasternak, 1982)³⁷.

Quanto ao impacte do acaso na visão determinista da ciência clásica, Prigogine (1982) começa por evocar o demónio de Laplace, ao qual é apenas necessário um número mínimo de informações necessárias em relação ao sistema dinâmico, para que este demónio seja capaz de calcular todo o estado futuro ou passado do sistema. No universo descrito pelas ciências modernas, o aleatório desempenha um papel crescente. A visão probabilista começou por surgir nas tentativas de explicação microscópica da entropia, e esse foi o grande contributo de Boltzmann. Posteriormente a Boltzmann, surgiu a mecânica quântica. Apesar das inúmeras tentativas para voltar à ortodoxia determinista, as probabilidades continuaram a desempenhar um papel irredutível. À escala dos seres vivos, de agregados macroscópicos, pareceria que a lei dos grandes números poderia restabelecer de facto o sistema determinista. *Mas as probabilidades fazem a sua entrada em força, até neste mundo macroscópico: essa é uma das facetas da descoberta da auto-estruturação dos sistemas macroscópicos longe do equilíbrio. O que os religa ao aleatório é a variedade das formas que, de uma experiência para a outra, estes mecanismos de estruturação podem desenvolver apesar do rigoroso controlo das condições experimentais.*

³⁷ In “Será Preciso Queimar Descartes?”

Não se trata, neste caso, de fenómenos calculáveis através das leis gerais; perto do equilíbrio tomam-se específicas. Estas “instabilidades” exigem um fluxo de energia, dissipam energia, donde resulta a denominação de “estruturas dissipativas” (PRIGOGINE, 1996).

O objecto geral da Física dos processos dissipativos é, então, o comportamento de populações correlacionadas, susceptíveis de gerarem comportamentos colectivos coerentes, de condecorarem transformações qualitativas que conferem sentido às noções de probabilidade, de instabilidade e de acontecimento.

A termodinâmica deixou de ser uma ciência utilitária que “salva” os fenómenos dos quais depende a vida prática, para alcançar o estatuto de ciência fundamental, onde se experimentam novas questões, não dirigidas a objectos passivos e manipuláveis, mas antes a uma realidade passível de história e de compreensão do que a física tradicional julgava ilusório: a emergência do novo.

Longe do equilíbrio, a actividade de um sistema pode tornar-se sensível a certos factores do seu ambiente, como a força da gravidade, cujo efeito, em equilíbrio, seria insignificante. Entre este sistema e a forma como os homens concebem o sistema de mundo em que vivem, longe vai a distância. Não se trata de anular esta distância, de “aplicar” os conceitos da física longe do equilíbrio às ciências da vida e dos homens, mas sim de definir o germe de uma nova coerência entre as ciências. Os físicos sabem agora que o seu modo de descrição, a escolha do que pode ser posto de lado ou do que deverá ser levado em conta na definição do seu objecto, não é dado de uma vez por todas, mas pode depender de modo intrínseco de regime de actividade dos sistemas estudados. Eles descobrem, graças a

isso, o problema de qualquer ciéncia evolutiva, a possibilidade de uma evolução transformar o sentido, o papel, a pertinéncia das variáveis, em termos das quais se pretende conhecer.

Durante muito tempo foi o ideal de objectividade vindo da física que dominou e dividiu as ciéncias. Uma ciéncia, para ser digna desse nome, devia “definir o seu objecto”, determinar as variáveis em função das quais se poderiam explicar, e mesmo prever, os comportamentos observados. Hoje em dia verifica-se o aparecimento de uma nova concepção da “objectividade científica”, que esclarece o carácter complementar e não contraditório das ciéncias experimentais, que criam e multiplicam os seus objectos, e das ciéncias narrativas, que têm como problema as histórias que constróem o seu próprio sentido.

Desde já multiplicam-se novos tipos de “transferéncia de conhecimento” entre as ciéncias. Assim, como se viu, o estudo dos “attractores” que caracterizam os sistemas dissipativos fornece às outras ciéncias instrumentos conceptuais que, longe de as reduzirem às categorias da físioco-química, suscitam nos seus campos novas distinções e problemas inesperados. Com a noção de attractor caótico, por exemplo, a questão já não é a de opor determinismo e imprevisibilidade, mas tentar compreender porque é que uma evolução é imprevisível, porque é que, como dizia Platão, ela se comporta quer de uma maneira quer de outra (PRIGOGINE e STENGERS, 1990).

O domínio abrangido pelas estruturas dissipativas não se interessa pelas forma em geral, como a teoria das catástrofes de René Thom, nem pelas formas extremamente irregulares, como Mandelbrot, mas por “processos cooperativos”. Este termo designa os fenómenos de auto-

organização que podem ser o assento, em certos casos e sob certas condições, das populações compostas por indivíduos *a priori* idênticos (moléculas em química, células em biologia, agentes económicos em economia, habitantes de uma cidade em urbanismo, etc.). De um modo geral, as estruturas dissipativas correspondem à emergência, aparentemente espontânea, de uma ordem, isto é, de uma morfologia espacial ou temporal, no seio de um sistema constituído por unidades atómicas “sujeitas a restrições externas particulares” (BOUTOT, 1993).

11.5. Do Simples ao Complexo

Como definir a diferença entre o simples e o complexo? A primeira resposta, a tradicional, implica a noção de hierarquia. Num extremo encontram-se os objectos deterministas e perfeitamente inteligíveis, tal como o pêndulo. No extremo oposto, encontram-se os homens e as sociedades. Entre ambos fica o enigma de um processo progressivo de complexificação e de emergência do complexo a partir do simples. A situação actual é no entanto bastante mais subtil, uma mistura em que simples e complexo, se relacionam sem se oporem de modo hierárquico. Assim, sabe-se que a simplicidade aparente do pêndulo pode dissimular um mundo de complexidades. E, no que respeita às sociedades humanas, estas representam a própria imagem dessa mistura, suscitando ao mesmo tempo a noção de governo, que implica a possibilidade de descrever e de prever e a noção de história, que reenvia à complexa criação de novas relações com implicações e consequências pouco previsíveis (PRIGOGINE e STENGERS, 1990).

Os sistemas dissipativos apresentam um comportamento que se pode descrever em termos de atractores, o que implica uma diferença fundamental em relação à mecânica. Com efeito, a noção de estado atractrór, conduz à noção de sistema dissipativo, produtor de entropia. Admita-se que um corpo celeste passe na proximidade da Terra daí, resultará uma deformação da órbita terrestre que permanecerá indefinidamente: os sistemas dinâmicos não têm nenhuma forma de fazer “esquecer” esta perturbação. Isto não ocorre deste modo quando se considera a dissipaçâo: um pêndulo amortece e atingirá a posição de equilíbrio, qualquer que seja a posição inicial. Veja-se agora o que acontece, em termos gerais, quando se afasta um sistema do equilíbrio. O “attractor” que dominava o comportamento do sistema na proximidade do equilíbrio pode tornar-se instável, em função do fluxo de energia e da matéria à qual se submete o sistema. O não-equilíbrio torna-se uma fonte de ordem; novos tipos de atractores, mais complexos, podem aparecer e conferir ao sistema propriedades espaço-temporais novas e importantes. Examine-se dois exemplos bem conhecidos.

Um pêndulo ideal, sem atrito, não possui estado atractrór, prosseguindo indefinidamente o seu movimento oscilatório. Em contrapartida, o movimento de um pêndulo real diminui progressivamente. No caso do pêndulo simples, a existência do attractor que constitui o seu estado de equilíbrio (no sentido mecânico) permite a caracterização de qualquer movimento pendular real na sua generalidade, sem ser necessário conhecê-lo nas suas particularidades. Efectivamente, quaisquer que sejam a velocidade e a posição iniciais de um pêndulo, saberemos como descrevê-lo se esperarmos o tempo necessário. Ele acabará por estar em repouso na sua posição de equilíbrio. Do mesmo modo, a existência de um attractor, que constitui um equilíbrio termodinâmico, permite afirmar que numa câmara

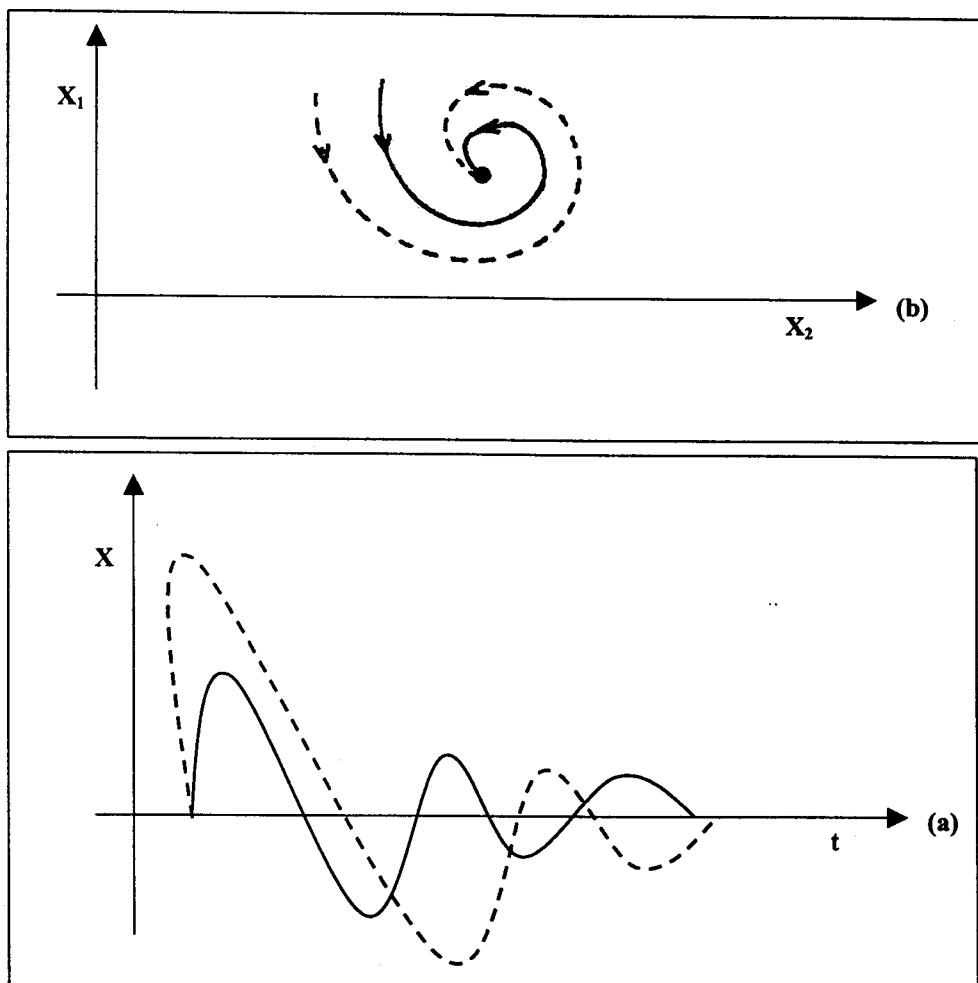
isolada contendo biliões e biliões de partículas irá, evoluir para um estado em que a descrição depende apenas de um número reduzido de parâmetros observáveis, tal como a temperatura e a pressão.

Note-se que o menor atrito transforma radicalmente a definição do pêndulo enquanto objecto físico, fazendo-o passar, após um intervalo de tempo suficientemente longo, da descrição de um movimento perpétuo reversível para a descrição simples de uma evolução dissipativa caracterizada por um estado atractor, o que constitui um exemplo de “instabilidade estrutural”.

Para uma representação de um atractor, introduz-se um espaço que contenha esse atractor. Esse espaço possui tantas dimensões quantas as variáveis necessárias para descrever a evolução temporal do sistema. Os estados de equilíbrio dos sistemas dissipativos correspondem por definição, a atractores *pontuais*, representados nesse espaço por um ponto. É também este o caso dos sistemas próximos do equilíbrio termodinâmico, que obedecem ao teorema da produção mínima de entropia. Em todos estes casos, qualquer que seja o estado inicial do sistema, a sua evolução – sob as condições na fronteira – poderá ser representado por uma trajectória indo do ponto representando o estado inicial para o ponto atractor. Este domina, por conseguinte, a totalidade do espaço. Todos os sistemas representados pelas mesmas variáveis independentes e submetidos às mesmas condições na fronteira “acabam no mesmo”, têm o mesmo destino (fig. 11.10.).

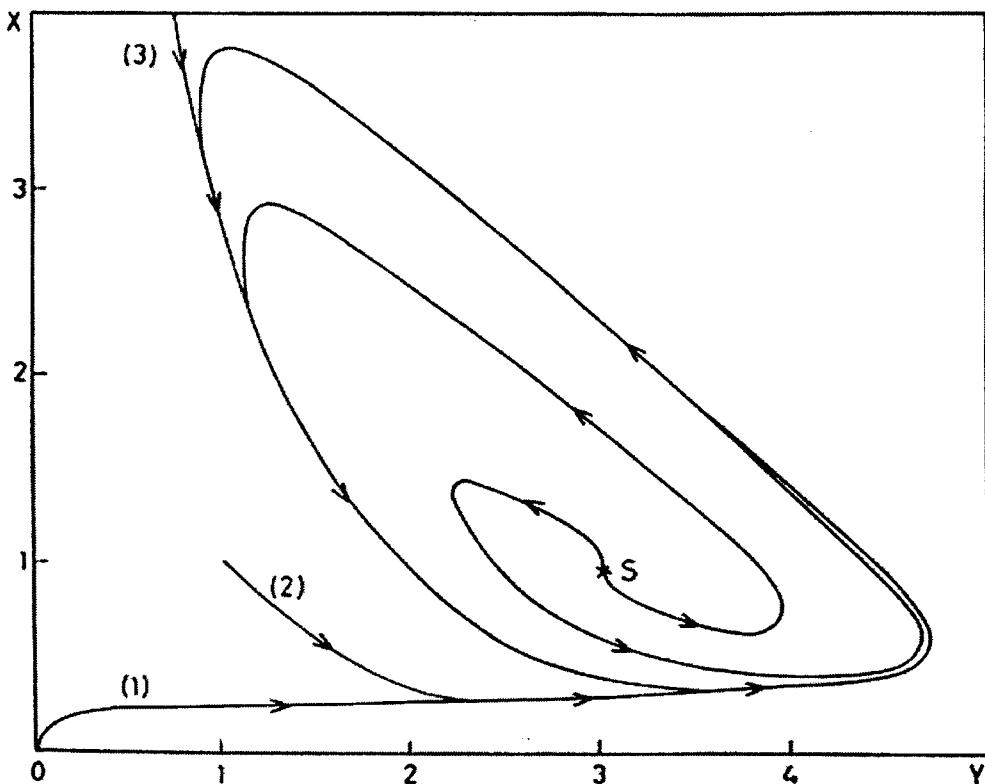
A descoberta dos comportamentos coerentes longe do equilíbrio, como o “relógio químico”, com o seu período temporal bem determinado, implica um primeiro alargamento da noção de atractor. Nesse caos,

não se trata mais de um ponto, mas sim de uma linha. Desta vez qualquer que seja a situação inicial, o sistema evolui para um “ciclo-limite” (fig. 11.11.).



Fonte: Prigogine, 1996

Fig. 11.10.: Estado atrator pontual caracterizado por duas variáveis independentes x_1 e x_2 . A figura (a) representa o comportamento do sistema com duas evoluções temporais possíveis de uma das suas variáveis. A figura (b) representa as mesmas evoluções em termos das duas variáveis do sistema x_1 x_2 .



Fonte: Prigogine, 1996

Fig. 11.11.: Atractor constituído num ciclo limite. Observa-se a contracção do ar associada ao efeito do atractor. Encontra-se um atractor linear: qualquer que seja a condição inicial, o sistema acabará por se situar sobre uma certa linha denominada ciclo limite.

Um sistema caracterizado por um ciclo limite permanece previsível, podendo descrever-se de modo simples. Mas essa simplicidade tem um carácter inesperado. Pode-se representar o estado de equilíbrio químico, imaginar a maneira como uma grande variedade de processos químicos compensam os seus efeitos mútuos, da mesma maneira que os mortos compensam os nascimentos numa população em equilíbrio demográfico. Mas a ideia que biliões e biliões de moléculas, interagindo só por colisões, se comportam, no entanto, “em conjunto” de tal maneira que o meio reactivo fique, por exemplo, ver-

melho, azul e outra vez vermelho, com uma periodicidade a ordem do minuto, desafia a imaginação. Eis uma manifestação espetacular das correlações de longo alcance. Até há relativamente pouco tempo pensava-se que os únicos atractores possíveis correspondiam a variedades contínuas, tal como linhas, superfícies e volumes. Mas a descoberta dos “attractores estranhos” abriu novas perspectivas. Os attractores estranhos não são caracterizados por dimensões inteiras, tal como uma linha ou uma superfície, mas por dimensões *fracionárias*. Desde de Mandelbrot, que se denominam variedades fractais.

11.6. Síntese do capítulo

11. IRREVERSIBILIDADE E INSTABILIDADE DOS SISTEMAS COMPLEXOS

- 11.1. Os primórdios dos sistemas dinâmicos
- 11.2. Paradigmas da Ciência e uma nova visão do Mundo
- 11.3. A irreversibilidade do tempo
- 11.4. Estruturas dissipativas
- 11.5. Do simples ao complexo

Newton idealizou o universo como uma máquina gigantesca, funcionando como um mecanismo de relógio e no qual a atracção gravitacional entre o Sol e cada um dos planetas, garantia a regularidade das suas órbitas. A órbita da Lua escapava todavia à previsibilidade oferecida pelo cálculo newtoniano, pois fazia intervir as forças atractivas de três corpos: a Terra, a Lua e o Sol. A não resolução deste problema constituiu, para Newton, um fracasso.

Sorte semelhante tiveram os físicos do século XIX que trabalhando no quadro das leis newtonianas e apesar de dominarem novos instrumentos matemáticos, muito pouca precisão alcançaram acima da que tinham obtido os astrónomos gregos.

O problema dos três corpos viria a ser retomado, ainda no sec. XIX, entre outros, por Poincaré, levando-o a desenvolver o domínio da matemática que se ocupa da dinâmica e, mais importante do que isso, a fazer emergir o conceito de caos. Poincaré entreviu que ocorriam situações em que uma pequeníssima alteração das condições iniciais, tal

como na posição ou na velocidade de um dos três corpos, podia provocar a mudança de uma situação de estabilidade, para uma nova situação de caos. Assim, Poincaré descobriu que um sistema de três corpos aparentemente simples, como a Terra, a Lua e o Sol, regido por uma lei tão precisa e impositiva como a da gravitação universal, podia dar origem ao imprevisível e indefinido. Com a introdução da incerteza, ruía por terra o determinismo de Newton e de Laplace.

Ainda no século XIX foram lançados os fundamentos da Teoria Dinâmica e demonstrado que alguns sistemas apresentavam componentes caóticas. Todavia, o desenvolvimento da Teoria do Caos só viria a acontecer nos anos sessenta do sec. XX, quando, por um lado, o desenvolvimento tecnológico oferecia já poderosos meios de cálculo e, por outro lado, a demonstração de soluções caóticas de sistemas de equações específicos e a construção de atractores estranhos que os acompanhavam, passaram a despertar o interesse da comunidade científica e a constituir objecto de estudo dos diversos domínios científicos.

Paralelamente à reflexão em torno do problema dos três corpos, de onde derivaria, em última análise, a Teoria do Caos, prosseguiu a procura da unificação, não só no mundo físico, mas também no biológico: a ciência esforça-se por reduzir a multiplicidade de fenómenos naturais a manifestações de uma única e mesma realidade e em que seja suficiente conhecer as leis para explicar o seu comportamento. Newton (sec. XVII) unificara numa única teoria, a gravitação terrestre e a gravitação celeste. No sec. XIX, Ampere e Faraday unificam a electricidade e o

magnetismo. Maxwell, unifica, de seguida, o electromagnetismo e a óptica ondulatória.

Data também do sec. XIX a unificação, por Cuvier, dos planos de organização estrutural dos animais, e a redução de todos os seres vivos a uma unidade estruturante e funcional, a célula, por Schleiden e Schwann. No sec. XX, viria a unificação atingir o nível molecular, verificando-se que todos os seres vivos são constituídos pelos mesmos tipos de macromoléculas, relacionadas entre si, aliás, pelas mesmas reacções químicas essenciais.

Nos séculos XIX e XX ocorreram, na realidade, os grandes movimentos unificadores. Não só o átomo se identificou como elemento estruturante da matéria e os quanta, a unidade de energia, como ainda Einstein unifica a matéria e a energia, o espaço e o tempo, deixando todavia de fora, da sua abrangência, as forças fracas e fortes.

Só no final do sec. XX, a Teoria das Supercordas consegue descrever as quatro interacções fundamentais (electromagnética, fraca, forte e gravitacional). Segundo esta teoria, a matéria não seria directamente constituída por partículas elementares pontuais, mas por pequeníssimos objectos possuidores de propriedades de uma corda: da mesma forma que uma corda de violino, possui diversas harmónicas, as supercordas teriam vários estados de vibração. Cada estado corresponderia a uma partícula elementar (electrão, quark, fotão, etc.).

Muito antes de Einstein unificar o tempo e o espaço, a concepção da irreversibilidade do tempo tinha emergido com a Teoria de Evolução de Darwin. Levou todavia algum tempo a transpor a fronteira dos seres vivos e a alastrar-se a todas as coisas. Actualmente, no final do sec. XX, já não é possível fugir a esse modo de inteligibilidade, nem a matéria nem mesmo o espaço-tempo. Não só as estrelas nascem, vivem e morrem, como também o próprio universo possui uma história, da qual as partículas elementares são imagem, nunca parando de se criar, de desaparecer e de se transformar.

No final do sec. XIX, Clausius reformulava o 2º Princípio da Termodinâmica, introduzindo-lhe um novo conceito, a entropia, reconhecendo aos fenómenos da natureza, a tendência irreversível que lhes é subjacente, para a degradação de energia.

Já no final do sec. XX, Prigogine apresenta o conceito de estruturas dissipativas, nas quais a desordem gera ordem e o caos entrópico, e este, através de flutuações/bifurcações ínfimas, é origem de evolução e fonte de novas organizações.

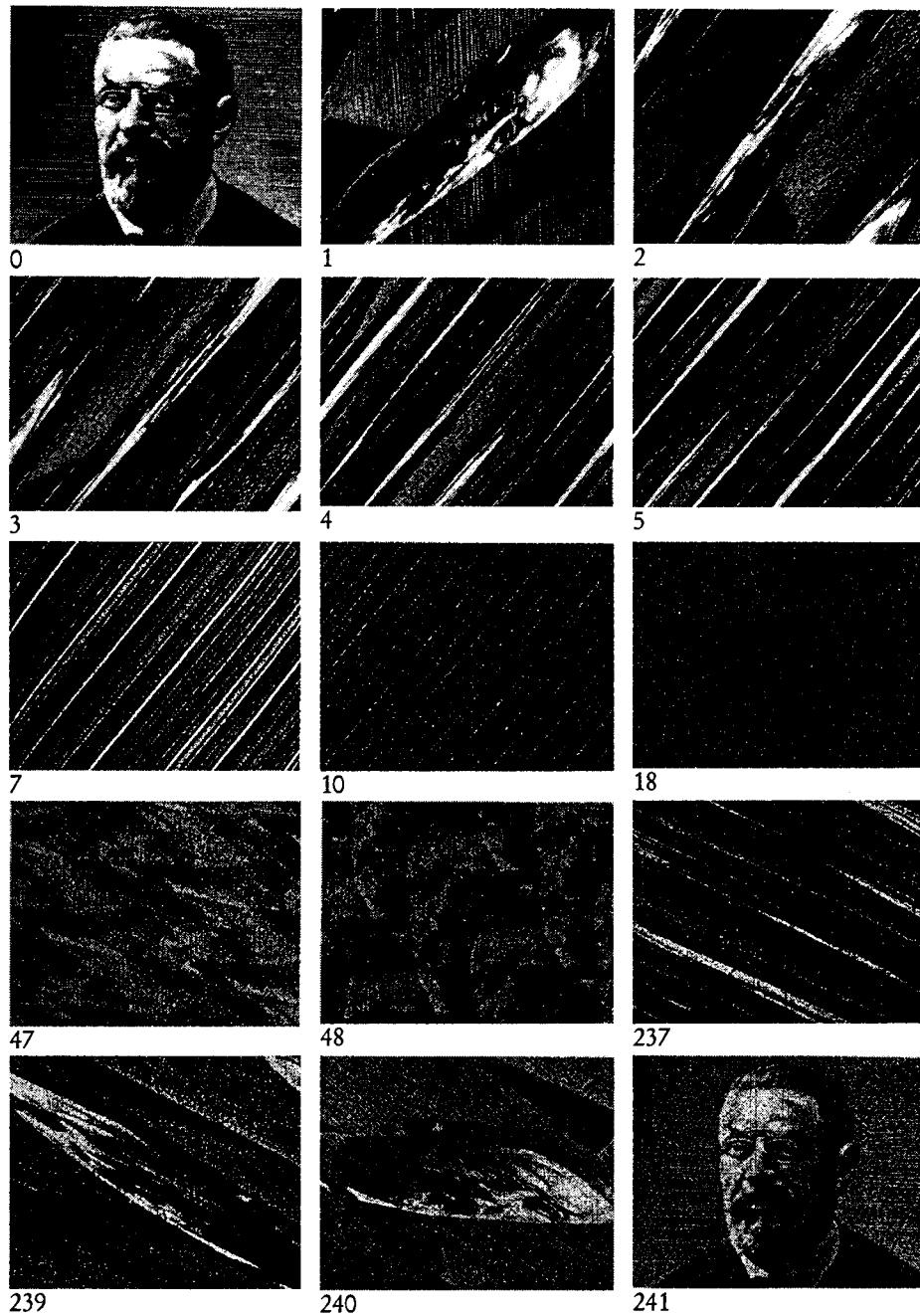


Fig. 12.1.: Mosaico Informático Representante do Pai do Caos Moderno, Henri Poincaré

12. O CAOS E A GEOMETRIA FRACTAL

Nos bancos da escola aprende-se que há um certo conjunto de situações que têm dimensões que podem ser expressas por números inteiros: a linha recta tem uma dimensão de 1, uma superfície plana tem dimensão de 2, do mesmo modo que o espaço no qual evoluímos tem dimensão de 3 (alto-baixo, direita-esquerda, frente-trás). No entanto, desde o início da década de 70 que se sabe da existência de uma categoria de objectos que só podem ser representados por uma dimensão fraccionária ou fractal. Estes objectos foram designados fractais pelo cientista que os descobriu, o matemático franco-americano Benoit Mandelbrot (1924 -). Este matemático concebeu e desenvolveu a denominada geometria fractal da natureza e do caos, designada vulgarmente por geometria fractal, termo que deriva do adjetivo latino *fractus*, do verbo *frangere*, que significa quebrar. O seu objectivo é o estudo de diversos objectos tanto matemáticos como naturais, que não são regulares, mas rugosos, porosos ou fragmentados, sendo-o no mesmo grau em todas as escalas (MANDELBROT, 1995).

De início, a geometria fractal era uma geometria da natureza, que fazia apelo constante ao caos estatístico. Mas o vasto campo de aplicação e a crescente utilização por diversos ramos científicos, tornou-a, para além de uma geometria da natureza, numa geometria do caos, ou seja, da dinâmica e dos atractores estranhos, sob duas formas: estatística e determinista. O desenvol-

vimento da teoria do caos determinista veio demonstrar que um sistema dinâmico absolutamente determinista pode dar origem a comportamentos que, dificilmente não poderiam deixar de ser considerados como aleatórios. Esta perspectiva era conhecida na década de 30, quando Norbert Wiener pensava, sem contudo o ter demonstrado, que a turbulência, ainda que criada por um processo determinista, deveria ser estudada pelos mesmos métodos utilizados na análise de processos aleatórios. Esta ideia só viria, no entanto, a tomar forma em meados da década de 70, na sequência dos trabalhos, desenvolvidos por David Ruelle, sobre “attractores estranhos”. Os trabalhos de Ruelle foram seguidos, por outros investigadores, o que conduziu ao acumular de exemplos de “caos determinista”.

A geometria fractal e o estudo da teoria do caos estiveram na origem de movimentos independentes, ainda que ambos sejam resultado da herança intelectual de Henri Poincaré. Os dois movimentos mantiveram-se, em grande parte, unidos. Para começar, foi desde logo evidente que os “attractores estranhos”, de Ruelle, eram fractais. De uma forma mais geral, o estudo do caos determinista deu origem a inúmeras formas geométricas muito complicadas, as quais a geometria euclidiana se revelou incapaz de tratar, enquanto a geometria fractal constituía, à partida, um instrumento perfeitamente adequado para o seu estudo.

12.1. Benoit Mandelbrot e o Nascimento da Geometria Fractal

Nos anos 50, Mandelbrot desenvolvia a sua actividade na secção de investigação pura da International Business Machines Corporation, na área dos assuntos económicos. A missão que lhe tinha sido confiada era o

estudo da distribuição dos pequenos e grandes rendimentos numa economia. Houthaker, professor de economia em Harvard, convidara Mandelbrot para uma conversa. Chegado ao gabinete, Mandelbrot espantou-se por ver no quadro o diagrama que ele pretendia materializar para uma palestra. No entanto, o diagrama nada tinha a ver com a distribuição de rendimentos; representava tão-somente oito anos de evolução dos preços de algodão. Também para Houthaker havia algo de errado no referido diagrama. Todos os economistas aceitam, geralmente, que o preço de um bem como o algodão varia de acordo com dois factores, um ordenado e outro imprevisível. Contudo, os dados de Houthaker evidenciando enormes oscilações não confirmavam as suas expectativas. Muitas das variações do preço eram pequenas, mas a razão entre as pequenas e as grandes variações não era tão alta como ele esperava (GLEIKC, 1994). A distribuição apresentava extremidades demasiado longas fugindo à distribuição habitual em forma de sino – curva de Gauss.

Fizesse o que fizesse, Houthaker não conseguia que as variações do preço do algodão se distribuíssem numa curva de Gauss, mas Mandelbrot, começava a entrever que nos lugares mais surpreendentes essas variações desenhavam uma “espécie de silhueta”. Regressado ao centro de pesquisas da IBM, trazia consigo os dados referentes aos preços do algodão numa caixa de cartões de computador e pediu os dados disponíveis desde 1900.

Tal como nas outras áreas da ciência, a economia estava a entrar na era dos computadores e a perceber lentamente que poderia coligir, organizar e manipular informação a uma escala sem precedentes. Para Mandelbrot, os preços de algodão constituíam uma fonte de dados ideal. Os registos eram completos e antigos com uma continuidade de cem anos ou mais. O algodão era um produto do universo de compra e venda com um

mercado centralizado – e, portanto, com registos centralizados – porque todo o algodão do Sul passava pelo mercado de Nova Iorque a caminho de Nova Inglaterra e os preços de Liverpool estavam estreitamente relacionados com os de Nova Iorque. A nível económico, as pequenas e transitórias variações de preço nada têm a ver com as grandes variações, a longo prazo. As flutuações pequenas são casuais. As subidas e descidas que ocorrem durante um dia de transacções são apenas ruído, imprevisível e sem interesse. Porém, as variações a longo prazo são de um tipo completamente diferente. As grandes variações que ocorrem ao longo dos meses, anos ou décadas são determinadas por forças macro-económicas profundas, guerras ou recessões, forças que deveriam teoricamente poder ser entendidas. De um lado, temos o zumbido das flutuações de curto prazo; do outro, o sinal das variações a longo prazo.

Acontece que esta dicotomia não cabia na representação da realidade que Mandelbrot estava a elaborar, em vez de separar as pequenas variações das grandes, a sua representação, juntava-as. Ele procurava padrões, não numa escala ou noutra, mas em todas as escalas. Embora ignorasse o modo como delinejar a representação que tinha em mente, tinha a convicção de que deveria existir um tipo de simetria entre grande e pequena escala.

De facto, quando Mandelbrot introduziu os dados sobre o preço do algodão no computador, deparou com o resultado espectacular que procurava. Os números responsáveis por aberrações, do ponto de vista da distribuição normal, produziam simetria do ponto de vista da escala. Cada variação de preços era casual e imprevisível, mas a sequência das variações era independente das escalas: as curvas das variações diárias e das variações mensais combinavam perfeitamente. A análise de Mandelbrot mostrava que o grau de variação se mantivera constante ao longo de um perí-

odo tumultuoso de sessenta anos, durante o qual ocorreram duas guerras mundiais e uma depressão.

“A Economia nunca se sentiu muito incomodada em adoptar, da Física, o hábito da diferenciabilidade das funções, portanto, a fortiori, da sua continuidade. Esta hipótese estava de tal maneira bem estabelecida, que mal parecia digna de ser mencionada e muito menos de ser confrontada com os factos.

Ao abordar o problema da variação dos preços com o tempo, expressei a minha opinião contrária: não só a continuidade não é evidente, como é contrária à própria observação. Além disso, fiz notar que a reflexão económica quase impõe que seja de esperar a observação de grandes descontinuidades, sem que estas mereçam ser consideradas como exceções que vêm interromper um estado normal que seria contínuo. Com efeito, um preço competitivo está submetido a dois tipos de influências. Deve antes de tudo, responder às alterações das quantidades “exógenas”, que se podem supor variarem de forma contínua, pelo menos se forem regidas pela inércia física. Mas deve igualmente responder às mudanças das “antecipações”. Ora estas mudanças podem ser instantâneas. Surge daí a minha ideia mestra, que é a seguinte: na ausência de regulação institucional, os preços podem muito bem sofrer descontinuidades de tamanho arbitrariamente grande. Nesse contexto, a grande queda na Bolsa de 19 de Outubro de 1987 vem hoje imediatamente à ideia, mas no início da década de 60, tais exemplos eram considerados coisas do passado”. (MANDELBROT, 1998). Na sequência deste trabalho, Mandelbrot concebe e desenvolve, em 1963, um modelo do *Carácter Aleatório do Preço dos Títulos no Mercado* (MANDELBROT, 1997). Com os seus fractais demonstrou que as recessões importantes imitam as flutuações diárias e mensais dos valores, de modo que o mercado é auto-similar tanto a escalas maiores como a mais pequenas. Por “auto-similaridade”, entendia Mandelbrot, uma repetição de detalhes a escalas decrescentes (BRIGGS e PEAT, 1991).

Benoit Mandelbrot desenvolveu a sua teoria nos anos sessenta, percorrendo um trajecto intelectual sinuoso e fora do comum, sempre desconfiado das matemáticas abstractas e formais. Sentindo aversão pela álgebra, cedo se apercebeu que tinha o talento de transformar quase todos os problemas de matemática em problemas de geometria. Guiado pela sua intuição geométrica, fez incursões em domínios não habituais para um matemático. Em 1958 emigrou para os EUA para trabalhar no Centro de Investigação Económica da IBM. Aí ele encontrou a liberdade necessária para prosseguir a sua carreira no campo da matemática aplicada e trazer as investigações para múltiplos domínios (ruído, hidrologia, astronomia, etc.). As suas descobertas foram expostas em diversas universidades americanas onde ele ensinou disciplinas tão diversas como a Matemática, a Física aplicada, a Fisiologia, etc. (BOUTOT, 1993).

Sempre apostado na criação da sua própria *mitologia*, Mandelbrot apôs esse depoimento à sua entrada no *Who's Who*³⁸: “*A ciência arminar-se-ia se (como os desportos) pusesse a competição acima de tudo o mais e clarificasse as regras da competição pela separação em especialidades estritamente definidas. Os raros estudiosos que são nómadas por opção, são essenciais ao bem-estar intelectual das disciplinas estabelecidas*” (citado em GLEICK, 1993). Este nómada por opção, que também se designava a si mesmo como pioneiro por necessidade, não viu, no seu percurso de trinta anos entre a obscuridade e a proeminência, o seu trabalho ser aceite pelas muitas disciplinas que abordou (GLEICK, 1993).

Mas o nomadismo seguido por Mandelbrot foi incontestavelmente proveitoso, porque se pode ver a origem e a extremidade da sua fecundidade matemática. É com efeito a sua aproximação geométrica e não con-

³⁸ Livro inglês de grande popularidade que retrata as figuras de destaque da sociedade inglesa.

formista dos problemas tradicionais, que lhe permitiram elaborar uma teoria que, se o processo “normal” de investigação científica tivesse sido seguido, teria sem dúvida acabado por ser formulada, mas somente, mais tarde e por especialistas cuja formação intelectual teriam excluído matemáticos como Peano e Cantor, entre outros. (MANDELBROT, 1998).

No seu primeiro ensaio sobre a teoria, publicado, em 1975, com o título de *Objectos Fractais*, Mandelbrot faz uma síntese matemática e filosófica e um conjunto de microfotografias respeitantes às diversas descobertas em distintas áreas da ciência. A exposição mais completa da sua teoria é dada, no entanto, em 1982, no seu livro intitulado *The Fractal Geometry of Nature*. Os dois livros asseguraram uma muito grande audiência à linguagem fractal, cuja originalidade e utilidade não tinham ainda sido apercebidas pela comunidade científica (BOUTOT, 1993).

A teoria fractal não se inscreve no prolongamento de uma teoria já existente. Pelo contrário, surge como uma nova disciplina científica (MANDELBROT, 1998). Com a teoria fractal, Mandelbrot junta numerosos caracteres novos ao “alfabeto” que Galileu tinha herdado de Euclides. Para Galileu e para a ciência moderna em geral, a Natureza fala a linguagem das matemáticas. “*A filosofia, dizia o célebre astrónomo, está escrita nesse grande livro – estou a falar do Universo – que nos é constantemente oferecido à nossa contemplação, mas que apenas pode ser lido depois de se aprender a linguagem e se estar familiarizado com os caracteres na qual está escrita. Está escrita na linguagem da matemática, onde caracteres são triângulos, circunferências e outras formas geométricas, sem as quais é humanamente impossível compreender uma única palavra; sem as quais se encontra em vão através de um labirinto sombrio [Galileo Galilei, Il Saggiatore, 1623]*” (citado em BOUTOT, 1993). Como diz Mandelbrot (1975), “*a linguagem matemática é um presente maravilhoso que nós nem compreendemos nem merecemos. Devemos estar reconhecidos, esperando que ele continue a ser útil nas nossas investigações*”

ções futuras e que, para o melhor e para o pior, se estenda, para nosso prazer e talvez mesmo para nossa estupefação, a outros ramos do conhecimento” (MANDELBROT, 1998).

A geometria fractal deve, então, ser encarada como uma nova linguagem geométrica, que veio demonstrar que olhar a natureza segundo a geometria euclidiana não passava de uma visão simplificada das coisas. Um grande número e mesmo a maior parte das formações naturais, não podem ser adequadamente representadas apenas com as noções da geometria euclidiana. As numerosas formas da natureza são irregulares ou fragmentadas o que se traduz, por comparação com a geometria euclidiana, num grau mais elevado de complexidade. Com efeito, as nuvens não são esferas, as montanhas não são cones, as costas não são círculos, a cortiça não é lisa e os relâmpagos não se propagam em linha recta.

Concebendo a geometria fractal como o instrumento capaz de modelar as formas naturais esquecidas da geometria clássica, Mandelbrot reconduziu a geometria à sua vocação original, conforme a etimologia da própria palavra, uma medida (*metron*) e uma descrição da Terra (*gē*). Neste sentido pode, então, afirmar-se que a geometria fractal é a primeira e a única geometria verdadeiramente digna deste nome, isto é conforme ao próprio projecto. A geometria euclidiana não é, com efeito, senão uma geometria parcial ou antes, da parcela. Ela não foi concebida para abranger a Terra na sua complexidade e diversidade, mas unicamente para medir as terras. Esta *geo-metria* aborda, com efeito, um problema concreto e similarmente limitado: a determinação da “forma dos campos nas planícies mais ou menos planas do vale do Nilo” (BOUTOT, 1993). *As formas da geometria clássica eram linhas e planos, círculos e esferas, triângulos e cones. Representavam uma poderosa abstracção da realidade e inspiraram a poderosa filosofia da harmo-*

nia platônica. Euclides fez delas uma geometria que durou dois mil anos, a única geometria que gerações e gerações aprenderam (GLEICK, 1993).

Tendo em conta esta orientação, a geometria fractal representa aos olhos de Mandelbrot, a “segunda revolução anti-euclidiana”, uma revolução muito mais devastadora na realidade que a primeira, a que surge como resultante da elaboração das geometrias ditas não euclidianas pelos matemáticos B. Riemann e N. Lobatchevski. Estes questionaram apenas o quinto postulado de *Elementos* de Euclides, o das paralelas. Pelo contrário, a geometria fractal é bastante mais audaciosa recusando mesmo as categorias implícitas de linha, de superfície, etc.

É hoje evidente que os fractais não se aplicam somente às situações de caos e de ruído, mas igualmente a toda uma variedade de formas da natureza que a geometria ensinada ao longo de dois milhares e meio de anos se revelou incapaz de descrever – formas como as linhas costeiras, as árvores, as montanhas, as galáxias, as nuvens, os polímeros, os rios, as representações esquemáticas dos climas, do cérebro, dos pulmões, do sistema sanguíneo e muitas outras. A Física tentou englobar sob a denominação de “caos” ou “desordem”, uma vasta amostra de propriedades sutis da natureza, com toda a riqueza de detalhes, que era ignorada pela geometria euclidiana. Mas poderá ser excluído o conceito de ordem no modo como a turbulência do vento e da água cava e escalpa as formas soberbas de desfiladeiros, plataformas e grutas submarinas? Mandelbrot demonstrou que a irregularidade era mágica e não simplesmente o “ruído” deformava as formas euclidianas, mas antes pelo contrário este era a manifestação dos poderes criativos da natureza (BRIGGS e PEAT, 1991).

Considere-se por exemplo, a circulação sanguínea do corpo humano. Analisando um livro de anatomia as ramificações das veias e das arté-

rias podem parecer caóticas. Todavia, um estudo mais detalhado demonstra de maneira evidente que estes mesmos ramos complexos se repetem nos vasos sanguíneos cada vez mais pequenos até aos capilares. Isto é verdade também para as montanhas. A uma distância de sessenta quilómetros, o contorno das montanhas, mesmo sendo irregular é facilmente reconhecível. À medida que a proximidade aumenta o número de detalhes aumenta também e mesmo quando se começa a escalada, distingue-se o mesmo esquema de irregularidade e de detalhes em cada uma das rochas.

Os sistemas complexos da natureza parecem preservar os mesmos detalhes a escalas cada vez mais pequenas. Este problema das escalas aparece de novo quando se olham as formas e estruturas num livro de fotografias da natureza tiradas com a ajuda de microscópios ou telescópios. As imagens de escalas bastante diferentes dão uma impressão de similitude e apresentam um ar familiar. Mas como é que qualquer coisa medindo milhares de anos-luz poderia ter o que quer que seja em comum com os objectos que se podem ter na mão ou sobre uma cabeça de alfinete? Poder-se-á dizer que as mesmas leis ou princípios matemáticos de crescimento e da forma se aplicam a escalas diferentes? Mandelbrot compreendeu que, se tal era o caso, estas leis deviam ter pouca relação com a geometria clásica na qual a noção de escala é, neste ponto, evidente e acaba por ter pouca ou nenhuma importância. Poder-se-á então criar uma medida de irregularidade fundada sobre as escalas? Foi em torno das curiosidades e das anomalias matemáticas surgidas nas proximidades do final do século XIX, e ignoradas pelos matemáticos, que Mandelbrot empreendeu o seu estudo do problema das escalas e a concretização da sua visão de um universo irregular e contudo ordenado. Seria possível que estas singularidades matemáticas contivessem índices importantes da complexidade da natureza? (BRIGGS e PEAT, 1991).

12.2. Quanto Mede a Costa da Bretanha?

Ao longo do seu péríodo intelectual, Mandelbrot debruça-se sobre questões, aparentemente estranhas como este: poder-se-á ter uma medida concreta da costa bretã? Admitindo um segmento da linha de costa numa região accidentada, qual será o seu comprimento efectivo? É evidente que esse comprimento é, no mínimo, igual à distância em linha recta, entre os dois pontos da linha costeira considerada. Assim, se a costa fosse direita, o problema estaria resolvido neste primeiro passo. Contudo, uma verdadeira costa natural é extremamente sinuosa e, por conseguinte, muito mais longa que a dita distância em linha recta. É possível chegar a esta conclusão de diversas formas, mas em qualquer dos casos verificar-se-á que o comprimento final é de tal modo grande que se poderá considerar infinito. Quando em seguida se quiserem comparar “conteúdos” de costas diferentes, não se poderão deixar de introduzir diversas formas do conceito de dimensão fractal.

Mandelbrot (1975) apresenta um conjunto de métodos que podem ser utilizados na medição de uma linha costeira. *Um primeiro método de medição da costa pode ser obtido percorrendo a costa com um compasso de abertura determinada η , começando cada passo no ponto em que terminou o anterior. O valor de η , multiplicado pelo número de passos, dará um comprimento aproximado de $L(\eta)$. Se a operação for repetida, com a abertura do compasso cada vez menor, verificar-se-á que $L(\eta)$ tende a aumentar constantemente, sem limite bem definido. Este procedimento consiste, em primeiro lugar, em substituir o objecto que nos interessa, que é demasiado irregular, por uma curva mais manejável, pois que arbitrariamente suavizada ou “regularizada”.*

Uma tal regularização é inevitável, mas ela pode igualmente ser conseguida de outras maneiras. Pode-se, por exemplo, imaginar um homem que caminhe ao longo da

costa, percorrendo o caminho mais curto possível, garantindo contudo, que nunca se afasta da linha costeira mais do que uma determinada distância η . Repete-se o processo, tornando a distância máxima do homem à costa cada vez menor. Em seguida, substitui-se o homem por um rato, posteriormente por uma formiga e assim sucessivamente. De novo, quanto mais próximo o animal se mantiver da costa, mais longa será, inevitavelmente, a distância a percorrer.

Um outro método, caso se considere indesejável a assimetria que o segundo método estabelece entre a terra e o mar, consiste em considerar todos os pontos, quer de uma quer de outro, cuja distância à costa seja no máximo, igual a η . Imagina-se, portanto, que a costa está coberta, o melhor possível, por uma fita de largura 2η . Mede-se então a área da fita e divide-se esse valor por 2η , como se a fita fosse um retângulo. Esta ideia baseada na cobertura por uma fita de largura 2η é atribuída a Minkowski 1901.

Um quarto método passa pela conceção de um mapa, desenhado por um pintor pontilhista, servindo-se de "pontos" grossos, de raio η ou, dito de outro modo,obre-se a costa, o melhor possível com círculos de raio igual a η . A definição baseada na cobertura da costa por pontos grossos de raio η é utilizada por Pontrjagin e Schnirelman em 1932.

Torna-se evidente que, ao dar a η valores cada vez menores, todos estes comprimentos aproximados aumentam. Continuam ainda a aumentar quando η é da ordem do metro, ou seja, desprovido de qualquer significado geográfico. Ora, todas as formas de medir o comprimento "com a precisão de η " continuam a dar um resultado sempre crescente até ao ponto que a unidade η desce abaixo de cerca de 20 metros. A partir deste ponto, encontra-se uma zona em que $L(\eta)$ varia muito pouco, só começando a aumentar quando η atinge valores da ordem dos 20 centímetros ou inferiores, ou seja, valores tão pequenos que o comprimento começa a ter em conta a irregularidade das pedras. Daí que, ao traçar um gráfico de comprimento $L(\eta)$ em função do parâmetro η , se encontre uma espécie de patamar. Não será por isso muito difícil aceitar que um certo

grau de precisão na medição do comprimento da costa de Brest se tornou intrínseco nos dias de hoje. No entanto, o conceito de comprimento geográfico, não é nem nunca o foi inteiramente “objectivo”, pois que o observador intervém, na sua definição, de uma forma inevitável. Ela é maior ou menor conforme o observador examine o objecto de perto ou de longe (MANDELBROT; 1998). Esta interacção entre o objecto observado e o observador é um eco do que se passa no mundo dos átomos, onde o acto de observar perturba e modifica as propriedades do átomo observado.

Se a costa bretã fosse descrita por uma figura geométrica euclidiana, por exemplo o círculo, as estimativas crescentes do comprimento da costa acabariam por convergir para um valor final correspondente ao verdadeiro. Assim, para medir o comprimento de um círculo, o método da soma de segmentos cada vez mais curtos converge para o verdadeiro perímetro do círculo. Este último começará por ser representado de forma aproximativa por um triângulo inscrito no círculo, depois por um quadrado, por um pentágono, por um hexágono, etc. O perímetro destas figuras geométricas inscritas no círculo aproximar-se-á cada vez mais do círculo. Já não é isso que acontece no caso de uma figura como a da costa bretã. Mandelbrot descobriu que quanto mais diminui a escala de medida mais cresce o comprimento, até se tornar infinito (THUAN, 1998).

De facto, a geometria euclidiana perde o pé quando se trata de descrever um objecto tão irregular como a costa bretã ou, mais geralmente, tudo aquilo que é torcido, descorjuntado, descontínuo ou rugoso. Ela também não consegue explicar o não liso o não arredondado, o entrelaçado ou o sobreposto (THUAN, 1998). Dito de outro, modo, revela-se ineficaz quando depara com a irregularidade sendo, no entanto, a ausência de irregularidade que caracteriza a grande maioria dos objectos e circunstâncias do mundo real.

12.2.1. O conjunto de Mandelbrot

Para se obter um conceito mais preciso de objectos fractais, analisa-se a construção do denominado Conjunto de Mandelbrot (gráfico 1, fig. 12.2), que por sua vez evidenciará uma das principais características de um objecto fractal: a similitude.

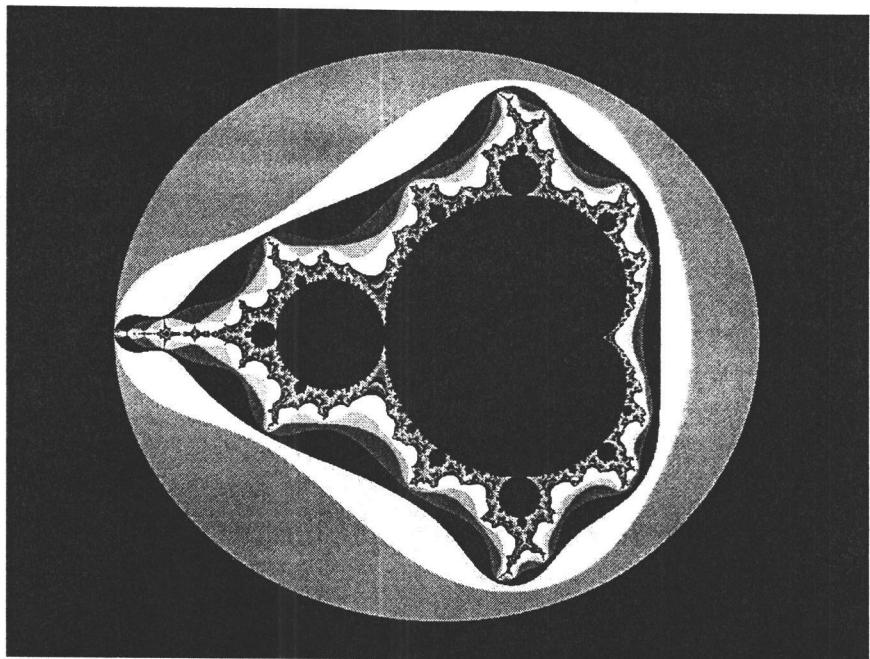


Fig. 12.2.: Gráfico 1: Conjunto de Mandelbrot

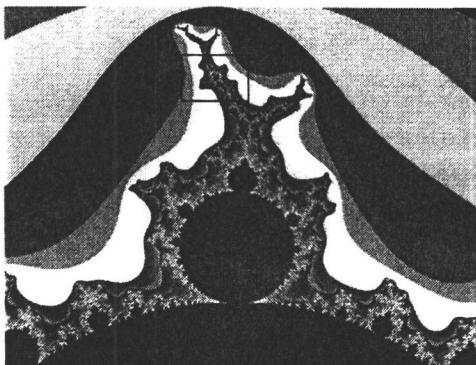


Fig. 12.3.: Gráfico 2

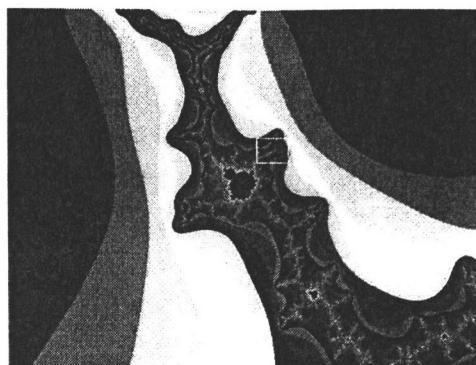


Fig. 124.: Gráfico 3

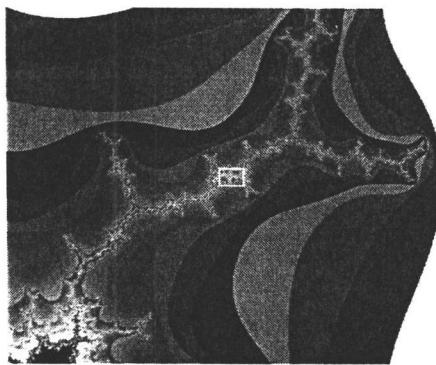


Fig. 12.5.: Gráfico 4

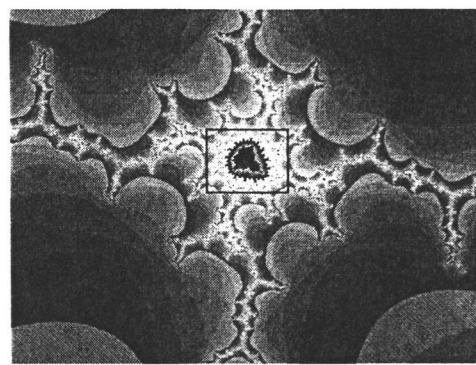


Fig. 12.6.: Gráfico 5

Mas como se geram estes gráficos? Admita-se que a superfície em que são representados é um plano complexo. Considere-se um valor complexo C , que será constante e outro valor Z , que será variável. O valor inicial dos cálculos será $Z=0$, ou seja, a origem das coordenadas do plano complexo, calculando a função:

$$Z^2 + C \quad (26)$$

O valor resultante selecciona-se como novo valor de Z , sendo de novo aplicado à equação, repetindo-se sucessivamente, obtendo-se assim a função iterativa:

$$N_{n+1} = Z_n^2 + C \quad (27)$$

Para certos valores de C , a iteração tende a crescer sem limite, enquanto para outros, Z tende a nivelar-se num certo valor. O gráfico 1 repre-

senta a fronteira do ponto C para os quais Z (em módulo) não excede 2 após 150 iterações. As zonas representadas em distintas escalas são consecutivamente, os pontos C para os quais Z excede 2 após 149, 148, etc. iterações. Estes valores, 2 e 150, são arbitrários dando uma ideia de que se pode detalhar o conjunto graficamente tanto quanto o permita a resolução do computador.

Na construção dos diversos gráficos, numa primeira observação vê-se que o contorno da figura é altamente irregular; a auto-similaridade manifesta-se fazendo uma série de ampliações sobre o gráfico 1. Se se ampliar o quadrado marcado no gráfico 1, obtém-se o gráfico 2 (fig. 12.3), que de novo ampliando o quadrado assinalado no gráfico dá origem ao gráfico 3 (fig. 12.4) e assim sucessivamente.

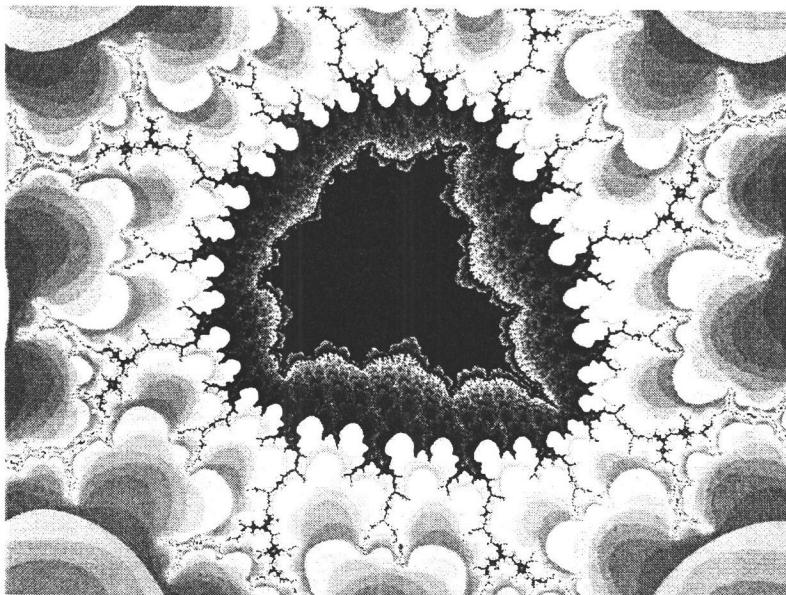


Fig. 12.7.:Gráfico 6

De imediato verifica-se que após sucessivas ampliações do gráfico original, se descobrem dois Conjunto de Mandelbrot; um após duas ampliações e o outro após cinco ampliações, porém a uma escala muito menor. De um modo rigoroso, o conjunto obtido, fig. 12.7, não é exactamente igual ao primeiro e uma observação cuidada porá em evidência as diferenças existentes entre os dois conjuntos. Por este motivo, fala-se de auto semelhança e não auto igualdade entre objectos fractais. Verifica-se ainda que a complexidade da figura não diminui com as sucessivas ampliações, pelo contrário, mantém-se aproximadamente constante. É ainda de salientar que, qualquer região do plano complexo tem infinitos pontos, em qualquer escala utilizada. A complexidade de cada ampliação é o resultado da aplicação do mesmo algoritmo matemático, porém com outros limites distintos dos iniciais, ou seja, é a aplicação à região cuja amplificação se pretende observar.

12.3. A “Galeria de Monstros” de Poincaré

Em 1872, o matemático Karl Weierstrass, provocou uma pequena crise na matemática descrevendo uma curva que não podia ser “diferenciável” matematicamente. A capacidade de diferenciar, isto é, de calcular a inclinação de uma curva, de um ponto a outro, é uma característica essencial do cálculo infinitesimal, inventado independentemente por Newton e Leibniz, aproximadamente duzentos anos antes de Weierstrass. As leis da mecânica de Newton respeitavam à mudança regular e às velocidades de mudança, pelo que tinha de dispor de instrumentos matemáticos que permitissem descrever diversas formas de mudança progressiva. Newton encontrou-as no cálculo infinitesimal. A noção de inclinação é uma noção relativamente intuitiva. Uma inclinação é na realidade o mesmo que um

declive. O cálculo infinitesimal de Newton deu, assim, um passo suplementar no campo da matemática.

Após Newton, os matemáticos “distraíam-se” a diferenciar as curvas das funções e a encontrar o seu declive. Permanecia sempre no entanto, um problema quando a curva era descontínua, isto é quando o traçado desaparecia subitamente para reaparecer um pouco mais longe. Como era então possível existir um declive onde o traçado se quebrava bruscamente? Mas, à exceção destes casos particulares, os matemáticos admitiam que todas as curvas deviam ter um declive. Em linguagem mais corrente, acreditavam que uma curva contínua podia ser sempre calculado o seu diferencial.

O cálculo diferencial de Newton parecia encontrar-se ao abrigo de qualquer ataque até que, no final do século XIX, um matemático, de nome Debois Reymond, apresenta a equação de Weierstrass para uma curva contínua, mas de tal modo complexa que não podia ser diferenciável. Foi preciso meio século para encontrar uma solução, que provocou o pânico geral e sacudiu o universo das matemáticas. Finalmente, os matemáticos viram-se forçados a admitir a existência de tais curvas excepcionais. Mas simultaneamente descansaram por pensarem que uma curva de tal modo complexa não deveria ter qualquer relação com o universo real (BRIGGS e PEAT, 1991).

Estas curvas estranhas sem declive e de dimensão ambígua eram extremamente perturbadoras. A única esperança dos matemáticos era poder ignorá-las, considerando-as como uma simples quimera do pensamento abstracto, um embuste matemático sem perigo para a maneira ordenada utilizada pela Matemáticas e pela Geometria para descrever a natu-

reza. O próprio Poincaré adoptou uma posição defensiva, qualificando estas curvas de “galeria dos monstros”.

12.4. A Equação Logística

A equação logística é um modelo simples unidimensional que revela uma grande riqueza de comportamento caótico, incluindo uma transição do comportamento ordenado para o caótico a um ritmo ordenado. May (1976) estudou esta equação e Feigenbaum (1983) descobriu uma constante universal contida no sistema. O mapa das possíveis soluções dá origem a uma estrutura estatística que é facilmente vista como uma estrutura fractal. A forma comum da equação logística expressa-se por:

$$X_{(t+1)} = a * X_t * (1 - X_t)$$

em que $0 < X \leq 1$ (28)

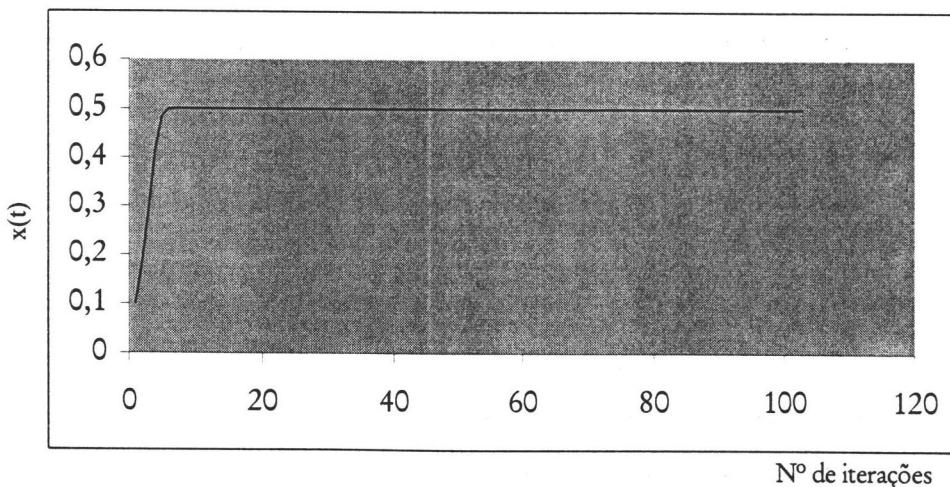


Fig. 12.8.: Equação Logística: Convergência de $x(t)$; $a=2$

A equação logística é uma equação às diferenças tratando-se por isso de um sistema discreto, por oposição aos sistemas contínuos que se obtém das equações diferenciais.

Considerando uma série temporal com o valor de $a=2$, verifica-se que após uma oscilação inicial o sistema se fixa num valor estável (fig. 12.8.).

Aumentar o valor de a para 2,4 resulta de novo numa convergência mas a um valor ligeiramente mais elevado. Aumentar o valor de a até 3 não provoca grandes alterações, mas neste valor o sistema passa a oscilar entre dois valores (fig. 12.10).

Esta separação de uma resposta em duas soluções potenciais é denominada bifurcação. À medida que se provocam sucessivos aumentos de a , o sistema vai perdendo estabilidade. Os valores críticos de a aproximam-se cada vez mais entre si. Para um valor de $a=3,544$ obtêm-se 8 soluções. O número de soluções cresce para 32 com $a=3,5688$ e para 64 com $a=3,56962$. Este aumento continua a verificar-se até que a seja aproximadamente igual a 3,60, neste ponto o sistema perde toda a estabilidade e o número de soluções é infinito. A série temporal resultante (fig.12.12) oferece a perspectiva de caos. A série aparenta aleatoriedade, se ao sistema fosse aplicada uma análise estatística este seria qualificado de aleatório. A partir de uma simples equação determinística obteve-se assim uma situação caótica.

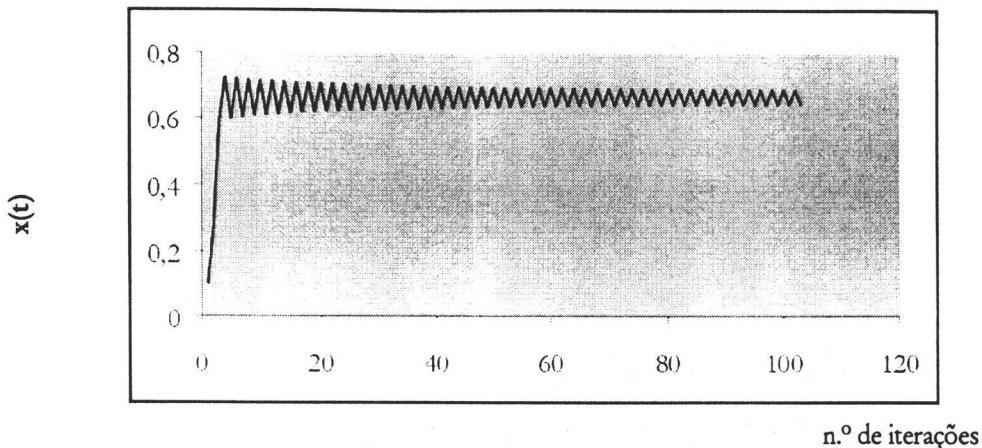


Fig. 12.9.: Equação Logística: $a=3,0$

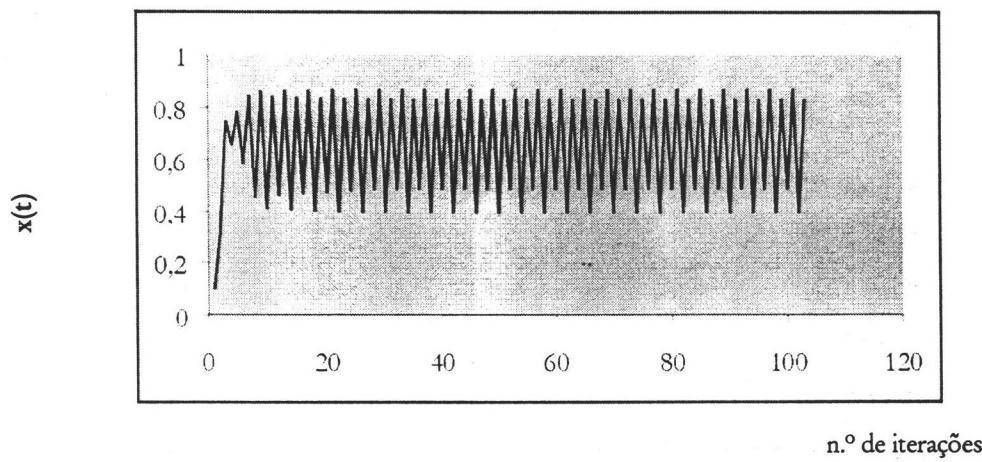


Fig. 12.10.: Equação Logística: $a=3,48$

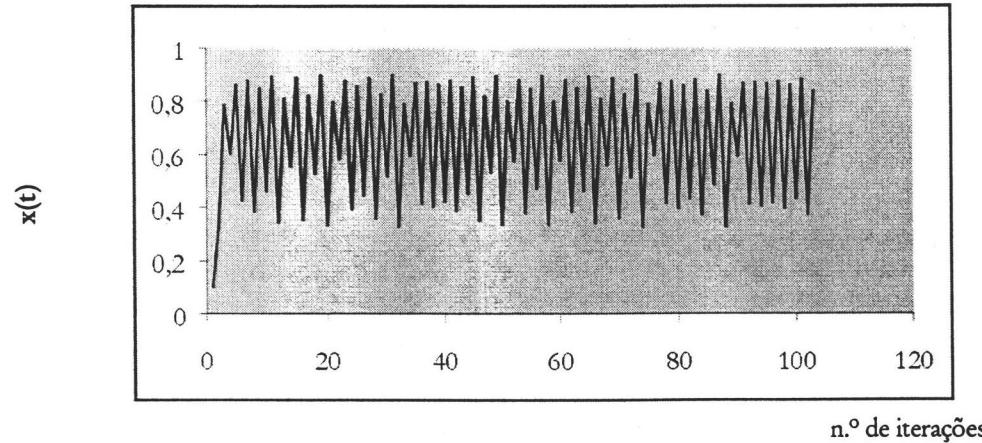


Fig. 12.11.: Equação Logística : $a=3,6$ Comportamento Caótico

Examine-se agora com mais pormenor a equação logística. Esta foi desenvolvida inicialmente com o objectivo de modelar a dinâmica de uma população num determinado meio ambiente. “Os biólogos do século XX com inclinações matemáticas construíram uma disciplina, a ecologia, que retirou o balúbo e a cor à vida real e tentou tratar as populações como sistemas dinâmicos. Os ecologistas usaram os instrumentos elementares da Física matemática para descrever as correntes e os turbilhões da vida. Uma única espécie multiplicando-se num lugar onde o alimento é limitado, muitas espécies competindo pela existência, uma epidemia espalhando-se entre uma população hospedeira – tudo pode ser isolado, se não em laboratórios, pelo menos na mente dos biólogos teóricos... . Muitos tipos diferentes de funções são possíveis.

Uma aproximação ingénua à biologia das populações poderia sugerir uma função que aumentasse a população a uma certa taxa percentual por ano” (GLEICK, 1993) Um modelo da taxa de crescimento não-linear seria uma simples equação não-linear:

$$X_{t+1} = a * X_t \quad (29)$$

Neste sistema, a população cresce indefinidamente e de forma descontrolada à taxa de a^x . Quanto maior for o crescimento da população, menores serão os recursos disponíveis para a manter. “Trata-se do clássico esquema malthusiano para o crescimento populacional, não limitado pelo suprimento alimentar ou pela restrição moral. Neste cenário de crescimento não restringido, a função linear de crescimento dirige-se para cima. Para um cenário mais realista, um ecologista precisa de uma equação com alguns termos suplementares que restrinjam o crescimento quando a população se torna demasiado grande. A função mais apropriada cresce rapidamente quando a população é pequena, reduz o crescimento para quase zero nos valores intermédios e decresce quando a população é muito grande. Pela repetição do processo, um ecologista poderá observar uma população atingir o seu comportamento a longo prazo – atingindo presumivelmente o seu estado de equilíbrio. Um saque bem sucedido

feito por um ecologista à matemática permitir-lhe-ia dizer qualquer coisa como isto: aqui está uma equação; aqui está uma variável representando a taxa de reprodução; aqui está uma variável representando a taxa de morte natural; aqui está uma variável representando a taxa de morte adicional devida à fome e à predação; e reparem – a população vai crescer a este ritmo até atingir este nível de equilíbrio (GLEICK, 1993).

O sistema necessita de uma taxa de morte dependente de $a \cdot x^2$. Pela subtração deste valor da equação (29) obtém-se a equação

$$X_{t+1} = a \cdot X_t (1 - X_t) \quad (30)$$

A equação logística expande-se até $a \cdot x$ mas contrai-se ou fecha-se em si mesma em, $a \cdot x^2$. À medida que a constante a se expande, o mecanismo de retroacção não-linear faz com que a população possa ter mais do que uma condição estável possível. Com efeito, à medida que uma população se aproxima da sua dimensão mais reduzida, passam a estar disponíveis recursos suficientes para que a população possa aumentar até ao máximo da sua potencial dimensão. Esta interacção torna-se mais complexa à medida que o valor de a aumenta.

May debruçou-se sobre o problema do que aconteceria quando uma taxa de crescimento populacional, na sua tendência para aumentar ou diminuir, ultrapassasse um determinado ponto crítico. Tentando diferentes valores desse parâmetro não linear, descobriu que podia alterar dramaticamente as características do sistema. Aumentar o parâmetro significava aumentar o grau de não linearidade e isso modificava não só a quantidade como a própria qualidade do resultado. Afetava não só a população final em equilíbrio como também a própria possibilidade de a população atingir tal equilíbrio (GLEICK, 1993).

May desenvolveu um programa de exploração numérica intensiva do comportamento desta equação simples. O seu programa era idêntico ao de

Smale: tentava entender a equação toda de uma vez, não de forma isolada mas globalmente. May investigou centenas de valores diferentes para o parâmetro, iniciando o mecanismo de retroacção e esperando para ver onde - e quando - a série de números estabilizava num ponto fixo. Dedicou-se cada vez mais ao limite crítico entre a estabilidade e a oscilação. Utilizando a equação logística aumentou o parâmetro tão devagar quanto podia. Se o parâmetro fosse 2,7 então a população seria 0,6292. Quando o parâmetro aumentava, a população final também aumentava, desenhando uma linha que subia ligeiramente à medida que se deslocava da esquerda para a direita no gráfico. Subitamente, quando o parâmetro ultrapassava 3, a linha dividia-se em duas. A população imaginária oscilava entre dois pontos em anos alternados. Começando com um número baixo, a população aumentava e depois flutuava até ficar a oscilar firmemente para trás e para a frente. Aumentando de novo o parâmetro, a oscilação voltava a dividir-se, produzindo uma série de números que estabilizavam em torno de quatro valores diferentes, surgindo cada um deles de quatro em quatro anos. A população aumentava e diminuía a um ritmo regular de quatro em quatro anos.

Seguindo um percurso semelhante ao de Lorenz, May resolveu conceber um gráfico que resumisse todos os dados acerca do comportamento de um sistema deste tipo para diferentes parâmetros. O nível do parâmetro era marcado na horizontal, aumentando da esquerda para a direita. A população era representada verticalmente. Para cada parâmetro, May inscrevia um ponto, que representava o resultado final quando o sistema atingia o equilíbrio. À esquerda, onde o parâmetro era baixo, o resultado era um ponto só, de forma que diferentes parâmetros produziam uma linha que subia devagar da esquerda para a direita. Quando o parâmetro ultrapassava o primeiro ponto crítico, May tinha de inscrever duas populações: a linha dividia-se em duas, desenhando um Y ou uma bifurcação.

Esta divisão correspondia à passagem do ciclo anual para o ciclo de dois anos.

Aumentando ainda mais o parâmetro, o número de pontos voltava a duplicar; e assim sucessivamente. O resultado era um comportamento complexo e, contudo, espantosamente regular. *A serpente na erva matemática*, foi como May lhe chamou. As duplicações eram elas mesmas bifurcações e cada bifurcação significava que o padrão de repetição passara para outro degrau. Uma população que fora estável alternava agora entre diferentes níveis ano após ano. Uma população que alternava num ciclo de dois anos variava agora nos terceiros e quartos anos, passando a um ciclo de quatro anos.

Estas bifurcações tornavam-se cada vez mais frequentes – 4, 8, 16, 32,... – e subitamente paravam. Além de um certo ponto, o “ponto de acumulação”, a periodicidade dava lugar ao caos, a flutuações que nunca estabilizavam. Regiões inteiras do gráfico mostravam-se inteiramente preenchidas. Ao seguir-se a evolução de uma população animal governada por este sistema de equações não-lineares, pode pensar-se que as alterações de ano para ano são totalmente aleatórias, resultado do ruído ambiente. Contudo, no meio desta complexidade, os ciclos estáveis regressam subitamente. Mesmo enquanto o parâmetro aumenta, o que significa que a não-linearidade domina cada vez mais o sistema, surge de repente uma janela com um período regular: um período ímpar como 3 ou 7. O padrão de populações repete-se num ciclo de três ou sete anos. Depois, as bifurcações de duplicação do período voltam a aparecer a um ritmo elevado, surgindo ciclos de 3, 6, 12,... ou 7, 14, 28,... e mais uma vez desaparecem e dão lugar ao caos. James Yorke analisou este comportamento e demonstrou que, em qualquer sistema unidimensional, se um ciclo regular de período três aparece alguma vez, então o mesmo sistema desenvolve ciclos

regulares de quaisquer outros períodos, assim como ciclos de caos total. Esta descoberta era absolutamente contrária à intuição. Podia pensar-se que seria trivial montar um sistema que se repetisse com uma oscilação de período três sem nunca produzir o caos. Yorke mostrou que tal não era possível, conseguira mais do que um resultado matemático, e enviou uma mensagem aos físicos: o caos é ubíquo, estável e estruturado. Além disto, forneceu também razões que o levavam a crer que os sistemas complexos, tradicionalmente representados por equações diferenciais contínuas podiam ser entendidos em termos de mapas discretos muito simples (GLEICK, 1993).

Em 1975, Feigenbaum assistiu a uma conferência em que ouviu Smale falar sobre sistemas dinâmicos. O matemático referiu-se à aplicação logística e à cascata de duplicação de período para o caos. Levantou a possibilidade de algo de grande interesse matemático se poder passar no ponto em que se acumulavam todas as duplicações de período – o lugar onde terminava a cascata e começava o caos. Feigenbaum decidiu olhar de novo para a equação logística e com a sua calculadora começou a usar uma combinação de análise matemática e investigação numérica para unificar uma compreensão do mapa quadrático, concentrando-se na fronteira entre ordem e caos. A lentidão de processamento de cálculo permitia-lhe pensar sobre os resultados que iam surgindo. O cálculo começava com uma aproximação ao número em questão melhorando-a por aproximações sucessivas. Quanto melhor era a aproximação inicial, menos tempo o cálculo levava. Para poupar tempo, Feigenbaum, tentava adivinhar grosseiramente qual poderia ser o próximo número na cascata. Em breve encontrava um padrão: as diferenças entre números consecutivos tinham uma razão constante, cada uma cerca de quatro vezes maior que a seguinte, mais precisamente, uma razão de cerca de 4,669.

“Um matemático chamar-lhe-ia convergência matemática e não pensaria mais no assunto. Mas para um físico, especialmente com conhecimentos sobre transições de fase, razões constantes significam escala. Algumas características físicas devem estar a recorrer em escalas cada vez menores. Espirais pequenas dentro de espirais grandes – como na turbulência. Dentro de uma dada estrutura devem estar cópias menores da mesma estrutura, sendo os tamanhos determinados pelo factor de escala.”

Feigenbaum tinha descoberto indícios de que nas pontas extremas de figueira deve haver uma estrutura matemática que permanece a mesma quando o tamanho é alterado por um factor de escala de 4,669. Esta estrutura é a própria forma da figueira. O atrator estacionário forma o tronco. Os atractores de período 2 formam dois galhos menores. Destes rebentam ramos ainda menores de período 4, depois ramalhetes de período 8, raminhos de período 16, etc.. As razões dos tamanhos de tronco para galho, de galho para ramo, de ramo para ramalhete, de ramalhete para raminho, tornam-se tanto mais próximas de 4,669 quanto mais se sobe na árvore” (STEWART, 1991).

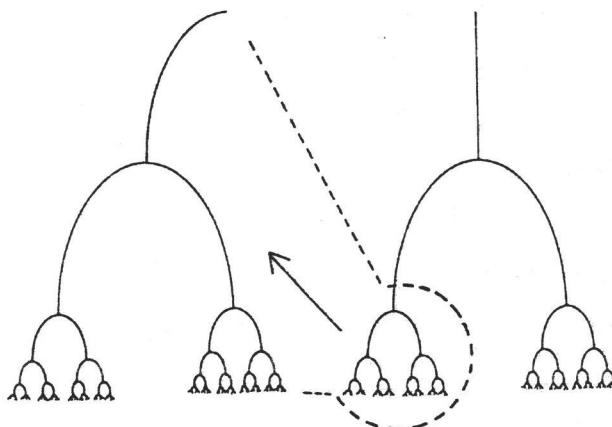


Fig. 12.12.:Auto-semelhança na figueira

Quanto mais se progride, maior se torna a semelhança de forma, propriedade designada por auto-semelhança. Recorde-se que um objecto ou processo é auto-semelhante quando se pode pegar numa pequena parte, ampliá-la e recriar algo que se assemelhe muito ao todo. Se se seleccionar

pedaços cada vez menores, ampliando-os até ao tamanho máximo, a imagem resultante pode estabilizar no sentido em que versões sucessivas, com ampliações cada vez maiores, começarão a parecer quase idênticas. Se assim for, passando ao limite, obtém-se uma imagem de tamanho finito da geometria infinitesimal. A este processo chama-se renormalizar o sistema. Este processo apresenta como vantagem o facto de, na versão renormalizada, a auto-semelhança ser exacta e não apenas aproximada. Qualquer propriedade do original que dependa só desta geometria infinitesimal estará patente na geometria finita original. Para encontrar a aplicação que corresponde à fotografia limite universal, começa-se por notar que – na “analogia do círculo” – a linha recta possui uma propriedade especial que a destaca como invulgar: permanece exactamente igual quando renormalizada, sendo exactamente auto-semelhante. A aplicação de Feigenbaum, tal como a linha recta, não é alterada pelo processo de renormalização. Seja qual for a aplicação com que se inicia, esta aproximar-se-á, pelo processo de renormalização, desta aplicação especial – tal como uma curva suave se aproxima da linha recta (STEWART, 1991).

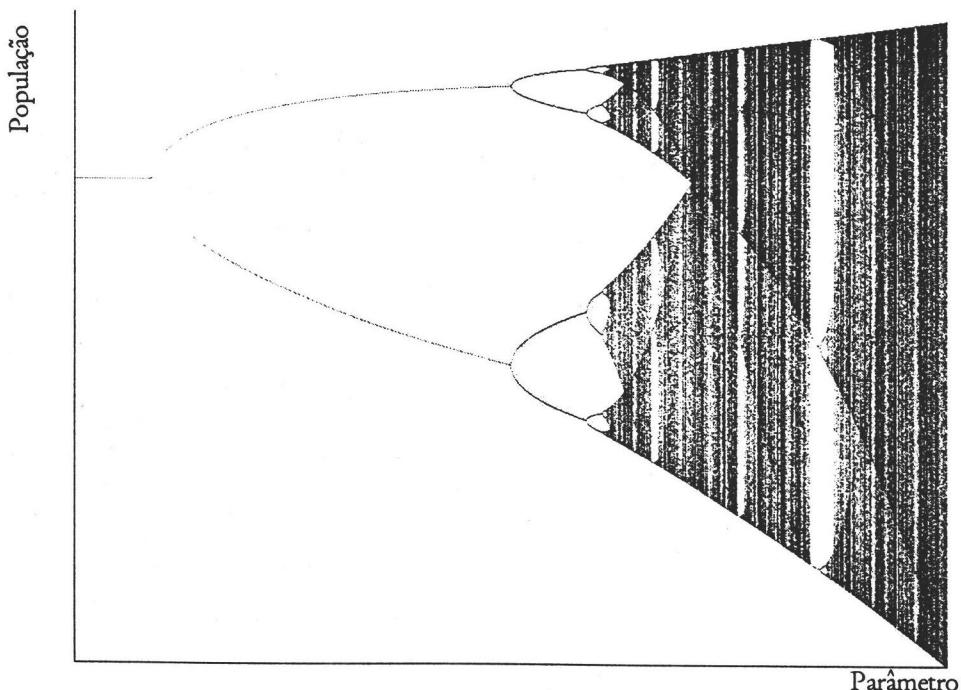


Fig. 12.13.: DUPLICAÇÃO DO PERÍODO E CAOS. “Diagrama de bifurcação” é utilizado para reunir todas as informações numa só imagem. O diagrama mostra como as mudanças num parâmetro vão alterar o comportamento final do sistema.

Este diagrama representa o aumento e declínio de uma população selvagem. Os valores do parâmetro são representados da esquerda para a direita; a população final é assinalada no eixo vertical. Aumentar o parâmetro corresponde a um aumento da não-linearidade do sistema. À esquerda, onde o parâmetro é baixo, a população extingue-se. À medida que o parâmetro aumenta (centro), a população atinge um estado de equilíbrio. Acréscimos sucessivos do parâmetro conduzirão inicialmente numa divisão do equilíbrio em dois, a população começa a alternar entre dois estados diferentes. As divisões, ou bifurações, surgem cada vez mais rapidamente. Por fim o sistema torna-se caótico e a população atinge valores infinitamente diferentes.

12.5. Objecto e Estrutura Matemática Fractal

O que é então exactamente um objecto fractal e como se reconhece quando uma estrutura matemática é fractal? O que distingue um conjunto fractal de um conjunto não fractal? Tão surpreendente como possa parecer, não é fácil responder a estas questões fundamentais. Mandelbrot pensou antes de tudo poder apoiar-se na noção matemática de dimensão. *Uma das características principais de todo o objecto fractal é a sua dimensão fractal* (MANDELBROT, 1998). A dimensão fractal é um *número que quantifica o grau de irregularidade e de fragmentação de um conjunto geométrico ou de um objecto natural e que se reduz, no caso dos objectos da geometria usual de Euclides, às suas dimensões usuais* (MANDELBROT, 1998).

Existem numerosas definições de dimensão fractal, ou diferentes maneiras de medir a irregularidade de um conjunto. São conhecidas, por exemplo, a dimensão de Hausdorff-Besicovitch, a de Minkowski-Bouligand ou ainda a da dimensão de homotetia. Todas estas dimensões têm a particularidade de não ser necessariamente inteiras, o que as diferencia da dimensão topológica vulgar. Elas podem ser fraccionárias ($1/2, 3/4,$

etc.), ou mesmo irracionais (π). Se bem que o seu domínio de aplicação natural seja o universo das estruturas irregulares, estas dimensões mantêm um sentido e podem ser calculadas para qualquer conjunto e dessa forma, também para os conjuntos regulares (rectas, superfícies, etc.). Mas enquanto a dimensão fractal destes últimos coincide com a dimensão topológica, no caso das estruturas irregulares assume em geral um valor diferente. Baseado neste resultado Mandelbrot (1975) avançou a hipótese de que: *um fractal é por definição um conjunto para o qual a dimensão de Hausdorff-Besicovitch é estritamente superior à dimensão topológica* (MANDELBROT, 1998).

Uma dimensão fractal caracteriza-se então, pela sua discordância dimensional. Esta definição que aparenta avançar por si, revela-se desastrosa na sua aplicabilidade. Há, com efeito, conjuntos cuja dimensão de Hausdorff coincide com a dimensão topológica e que portanto, devem ser, de um ponto de vista puramente matemático, considerados como fractais. Inversamente, existem conjuntos cuja dimensão fractal (dimensão de Minkowski) é superior à dimensão topológica e que não são todavia, fractais. As definições que assentam unicamente sobre a dimensão fractal são em definitivo, consoante o caso, muito restritivas ou muito lassas . É por isso que Mandelbrot prefere renunciar a dar uma definição matemática dos objectos que ele estuda. “*Uma vez definida, diz ele, um qualquer conceito fractal de dimensão, dando o valor D, pode-se tentar definir um conjunto fractal quer se trate de um conjunto para o qual D é um real não inteiro, ou de um conjunto para o qual D é um real inteiro, mas o todo é irregular. Por exemplo, denominar-se á fractal um conjunto com D=1, mas cuja curva não é rectificável. Isto seria lastimável por quanto a teoria da rectificabilidade é demasiado confusa para que se possa depender dela. Mais, é muitas vezes possível, perturbando um conjunto muito clássico na vizinhança de um único ponto, fazer com que a sua dimensão se tome numa fração. Do ponto de vista concreto tais exemplos seriam insuportáveis*” (MANDELBROT,

1998). Para os evitar, Mandelbrot renuncia a definir o conceito de conjunto fractal.

O conceito de conjunto fractal não é, então, senão uma noção intuitiva, isto é approximativa, entendendo-se por noção intuitiva uma figura geométrica, ou um objecto natural, que combina as características seguintes: (i) as suas partes têm a mesma forma ou estrutura que o todo, apesar de se situarem a escalas diferentes e poderem ser ligeiramente deformadas; (ii) a sua forma é extremamente irregular, interrompida ou fragmentada, qualquer que seja a escala a que é analisada; (iii) contém “elementos distintivos” cujas escalas são muito variadas e cobrem uma vasta gama.

A definição de fractal pode estabelecer-se por alusão com o conceito de “vida”. É impossível dar uma definição precisa de conceito de vida, mas pode, contudo, enumerar-se uma lista de propriedades características dos seres vivos, como a capacidade de crescimento, de reprodução, e de subsistência dentro de determinados limites ambientais. Da mesma maneira, não se procurará dar uma definição estanque de conjunto fractal, que excluiria quase certamente um vasto conjunto de casos interessantes. Deste modo, considera-se como fractal um conjunto que possui um certo número de características mínimas. Nesta perspectiva, dir-se-á que um conjunto é fractal se possui as propriedades seguintes: (i) tem uma estrutura fina, isto é, apresenta detalhes em todas as escalas; (ii) é demasiado irregular, local e globalmente, para ser descrito na linguagem da geometria euclidiana; (iii) é regra geral auto similar, eventualmente estatisticamente; (iv) tem frequentemente uma dimensão fractal (a definir) superior à sua dimensão topológica; (v) na maior parte dos casos, é definido muito simplesmente, eventualmente recursivamente. As estruturas geométricas que possuem todas (ou a maior parte) destas propriedades são, sem dúvida, de formas muito diversas.

12.5.1. Dimensão Fractal de Conteúdo

O conceito de “dimensão” aparece já na geometria de Euclides, no século III a.C.. Mandelbrot retomou a ideia, avançada em 1919, pelo matemático alemão Felix Hausdorff e desenvolvida posteriormente por Besicovitch, o qual avançou o conceito de dimensões fraccionárias, isto é, representadas, não por números inteiros, mas por fracções. A aplicabilidade do conceito de dimensão fraccionária permite traduzir a rugosidade e a irregularidade de um objecto.

Briggs e Peat (1981) utilizam o exemplo de um novelo de cordel para evidenciar o conceito de dimensão. Visto de longe, o novelo surge como um ponto; a sua dimensão será zero. A aproximação do novelo permite ver de facto como ele é, ou seja, a três dimensões. Mas o que acontece se se aproximar mais o novelo? Com esta aproximação encontra-se um único fio enrolado e torcido. O novelo é constituído por um fio torcido unidimensional. Se nos aproximarmos ainda mais, o fio transforma-se numa coluna de espessura fina e o cordel surge de novo como tridimensional. Mais próximo ainda, não se distinguem os fios finos que se enrolam em torno uns dos outros para formar o cordel – o novelo torna-se de novo unidimensional (BRIGGS e PEAT, 1981). O rolo assume, efectivamente, diferentes dimensões conforme o distanciamento entre o observador e o observado. O conceito de dimensão da natureza não é, então, dissociável do próprio observador.

Retomando o exemplo da costa bretã, a sua sinuosidade e o seu grau de irregularidade, podem ser definidos por uma dimensão

fraccionária. Isto porque a dimensão da costa tem de ser superior a 1 e inferior a 2, porque a costa apresenta baías e reentrâncias mas não preenche um plano. Quando a dimensão fractal de uma curva regular ou de uma costa se aproxima de 1, significa que os seus contornos são extremamente regulares e sem quaisquer detalhes. Quanto mais afastada de 1 se encontrar, mais irregular, ou caótica, é a costa. Esta irregularidade persiste a escalas cada vez mais pequenas.

12.6. Alguns Exemplos de Conjuntos Fractais

“A mente não pode visualizar a infinita auto-reprodução da complexidade. Mas para alguém com a visão geométrica, este tipo de repetição da estrutura a escalas cada vez mais pequenas pode abrir um mundo inteiramente novo. Explorar estas formas até ao limite das suas possibilidades é uma certa forma de jogo” (MANDELBROT, 1998). Mandelbrot conseguiu ver variações que ninguém tinha conseguido ou entendido. A essas formas estranhas atribuiu-lhes nomes: cordas e folhas, esponjas e espumas, queijos e tomadouros.

A dimensão fraccionária provou ser a medida adequada. De uma certa forma, o grau de irregularidade correspondia à eficiência com que um objecto ocupava o espaço. Uma linha simples, euclidiana, unidimensional, não ocupa espaço. Mas o contorno da curva de Koch, com um comprimento infinito estendendo-se por uma área finita ocupa espaço. É mais do que uma linha, mas menos que um plano. É mais do que unidimensional mas não chega a ser bidimensional. Mandelbrot recorreu a técnicas desenvolvidas por matemáticos, no início do século, o que lhe permitiu caracterizar com precisão a dimensão fraccionária. No caso da cur-

va de Koch, a multiplicação infinita por quatro terços dá uma dimensão de 1,2618, ou mais exactamente $\log_c 4 / \log_c 3$.

Como fez a Natureza para elaborar uma estrutura tão complexa? Para Mandelbrot, as complicações apenas existem no contexto da geometria tradicional euclidiana. Enquanto fractais, as estruturas ramificadas podem ser descritas com simplicidade transparente, com apenas alguns bits de informação. É possível que as transformações simples que deram origem às formas de Cantor, Koch, Peano e Spierinski tenham o seu análogo nas instruções codificadas nos genes de um organismo. Decerto o ADN não pode especificar o vasto número de brônquios, bronquíolos e alvéolos ou a estrutura espacial da árvore resultante, mas pode especificar um processo repetitivo de bifurcações e desenvolvimento. Tais processos seguem as intenções da Natureza.

12.6.1. Conjunto Triádico de Cantor

O conjunto triádico de Cantor faz parte da já mencionada “galeria dos monstros”, de Poincaré, e deve o seu nome ao matemático alemão Georg Cantor (1845-1918). Este conjunto baseia-se num procedimento recursivo muito simples (fig. 12.14.). Parte-se de um segmento de recta qualquer, por exemplo o intervalo $[0,1]$ composto de todos os números reais compreendidos entre 0 e 1. Remove-se o terço central deste segmento e conservam-se as extremidades, isto é todos os números compreendidos estritamente entre $1/3$ e $2/3$. Obtém-se então dois intervalos disjuntos compostos, um, de todos os

números compreendidos entre 0 e $1/3$ e um outro, de todos os números compreendidos entre $2/3$ e 1. Estes dois intervalos formam reunidos, um tipo de trema, denominado por T_1 . Este trema constitui a primeira etapa da construção. Para passar à etapa seguinte, repete-se a operação sobre cada um dos dois segmentos que compõem T_1 ; obtém-se, então, quatro intervalos: $[0, 1/9]$, $[2/9, 1/3]$, $[2/3, 7/9]$, $[8/9, 1]$, cuja reunião forma um segundo conjunto T_2 . (um duplo trema). Duma maneira geral, constrói-se o conjunto T_k . removendo o terço central de cada um dos 2^{k-1} intervalos que compõem T^{k-1} . O conjunto de Cantor é a poeira que resta. É infinito, mas o seu comprimento total é zero.

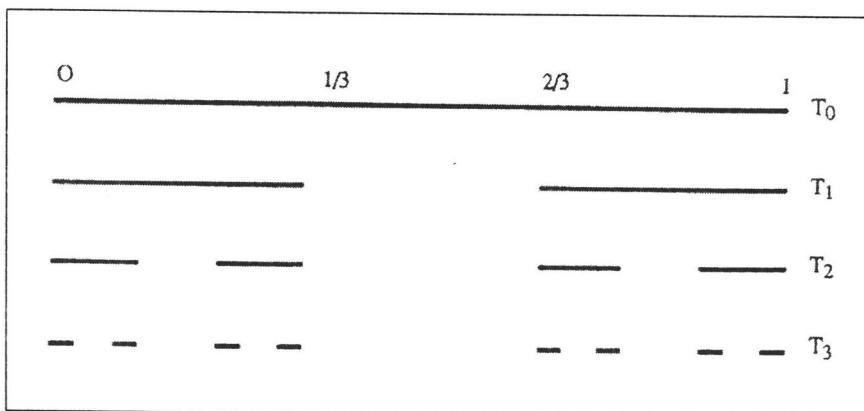


Fig. 12.14.: Construção de um Conjunto de Cantor

Considere-se agora como ponto de partida um quadrado cujo lado é a unidade no plano (\mathbb{R}^2) (fig. 12.15). Divida-se o quadrado em dezasseis pequenos quadrados iguais entre si, em seguida remova-se doze quadrados dos dezasseis (três em cada coluna e três em cada linha). Repita-se a operação sobre cada um dos quatro quadrados restantes e proceda-se assim, sucessivamente. O conjunto limite obtido é uma poeira de Cantor no plano. A sua dimensão topológica é nula. A sua dimensão fractal é de 1. Obtém-se um novo exemplo de estrutura

fractal. Pode-se generalizar facilmente a construção dividindo o quadrado inicial em m^2 quadrados de lado $1/m$ retendo um único em cada coluna.

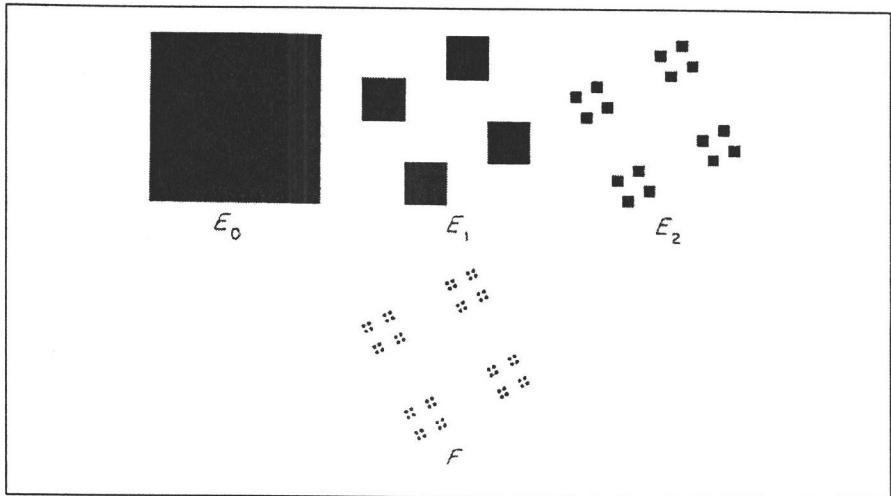
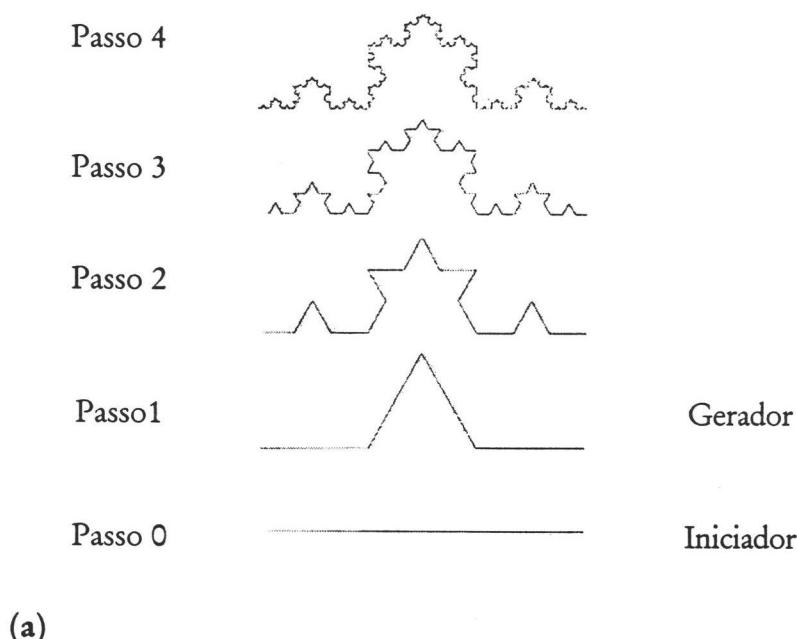


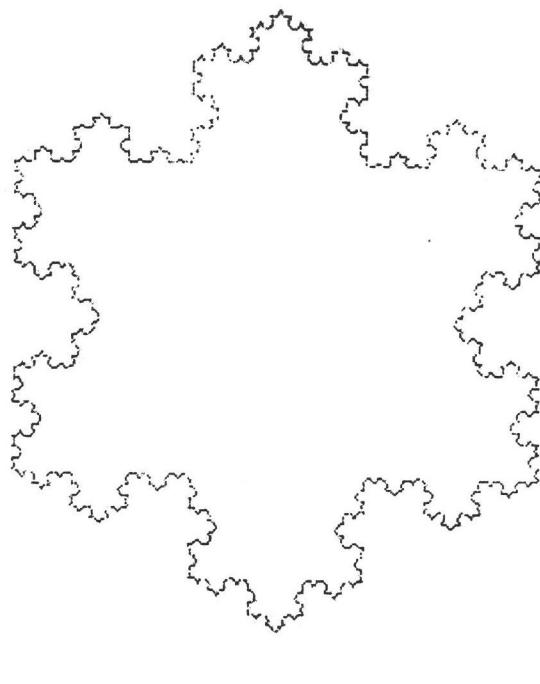
Fig. 12.15.: Poeira de Cantor no Plano

12.6.2. A Curva de Von Koch

Considere-se um triângulo, tendo cada um dos lados um metro. Imagine-se agora a seguinte transformação: aplique-se ao terço médio de cada um dos lados do triângulo, um outro triângulo, com a mesma forma mas com um terço do tamanho (fig. 12.16). O resultado é uma estrela de David. Em vez de três segmentos de um metro, o contorno da forma tem agora doze segmentos de um terço de metro. Em vez de três vértices encontram-se agora seis. Repita-se de novo a transformação em cada um dos doze lados, aplicando-lhe um triângulo mais pequeno no seu terço médio. E outra vez, e sempre assim até ao infinito. O contorno torna-se cada vez mais detalhado, tal como um conjunto de Cantor se torna cada vez mais esparsos.

As transformações sucessivas operadas resultam numa forma semelhante a uma espécie de floco de neve ideal. A curva obtida foi concebida por Helge von Koch, um matemático sueco, que a desenhou pela primeira vez em 1904, sendo denominada a partir de então como curva de von Koch. A curva de von Koch apresenta um conjunto de características de assinalar: (i) é uma curva contínua, que nunca se intersecta a si mesma, porque os novos triângulos apostos em cada lado são sempre suficientemente pequenos para não se tocarem; (ii) cada transformação adiciona uma pequena área no interior da curva, mas a área total mantém-se finita, não muito maior que a do triângulo original; (iii) se se traçar um círculo em volta do triângulo original, a curva de Koch nunca o ultrapassará; (iv) a curva é, em si, infinita.





(b)

Fig. 12.16.: (a) Construção de uma curva de von Koch
(b) Curva de von Koch

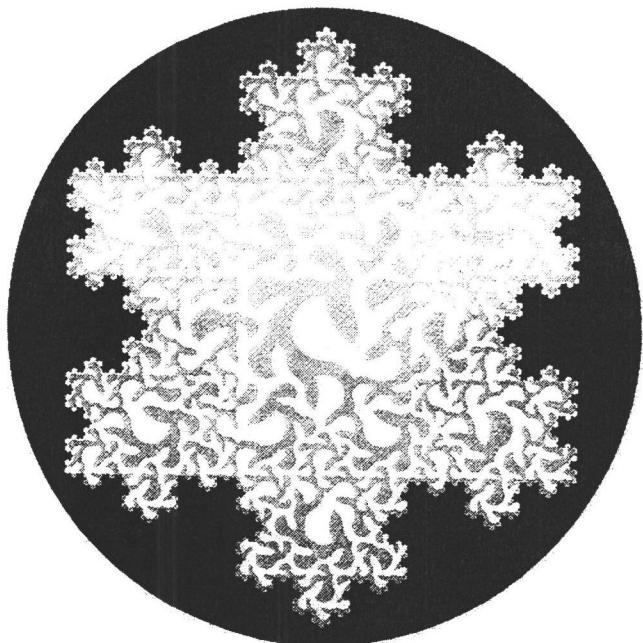


Fig. 12.17.: Conjunto Triádico de Cantor (linha costeira de 1,2618)

Fundamentalmente, a “ilha de Koch”, ou floco de neve, é concebida por um processo de iteracção no qual cada etapa é repetida a uma escala inferior. Obtém-se assim uma curva de grande complexidade que põe em evidência um número de detalhes extraordinariamente elevado.

Cada etapa da construção da curva de von Koch, faz aumentar $\frac{4}{3}$ o comprimento total, pelo que tem um comprimento infinito. Além disso, ela é contínua, mas não tem tangente em quase nenhum dos seus pontos. *É um ser geométrico próximo de uma função contínua sem derivada* (MANDELBROT, 1998).

Este resultado paradoxal, um comprimento infinito num espaço finito perturbou muitos dos matemáticos do início do século que reflectiram sobre o assunto. A curva de von Koch era monstruosa, desrespeitosa para com todas as intuições razoáveis sobre formas e patologicamente diferente de tudo o que podia ser encontrado na Natureza. Apesar do trabalho de von Koch ter tido pouco impacto na sua época, outros matemáticos imaginaram outras formas com algumas das propriedades da curva de von Koch, como as curvas de Peano, os tapetes e os tomadouros de Sierpinski, a esponja de Menger, entre outros.

12.6.3. A Curva Original de Peano

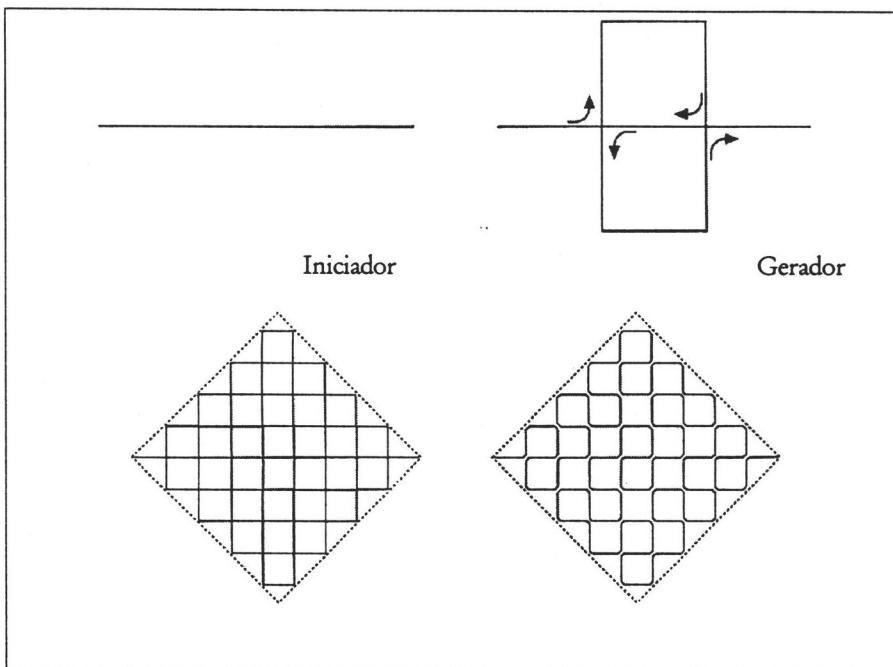
Em 1890, Giuseppe Peano descobriu o que foi denominado como “curva de preenchimento do plano”. Uma curva não é senão uma recta que se dobra e se deforma. Os matemáticos consideraram

como evidente que uma curva, qualquer que fosse a sua complexidade, devia ser unidimensional. Um plano (uma folha de papel, por exemplo) tem duas dimensões. O plano e a curva são perfeitamente distintos em termos de dimensões. Contudo, Peano concebeu uma curva, de tal modo complexa, que preenchia a totalidade do papel sobre o qual era traçada. Nenhum ponto do plano escapava à linha curva de Peano; as duas dimensões do plano residiam no conjunto dos pontos. Qual o plano e a curva se todos estes pontos pertencem igualmente a uma recta unidimensional? Como é que um objecto pode ser simultaneamente unidimensional e bidimensional?

A expressão “curva de Peano” aplica-se genericamente a toda uma família de curvas patológicas que, entre 1890 e 1925, desempenharam um papel decisivo na elaboração do conceito de dimensão topológica e que se verifica fornecerem uma excelente ilustração das relações entre as dimensões topológica e fractal. Setenta anos após Peano, Mandelbrot retomou estas curvas de uma forma séria e seguiu as suas implicações. Neste estudo demonstrou com convicção que era falso pensar que as curvas monstruosas tinham pouca relação com a geometria do Universo. Pelo contrário, ele provou que nelas residia o segredo da medida de irregularidade do mundo real: o segredo dos fractais.

Mandelbrot (1975) demonstra as relações entre as dimensões topológicas e fractal (fig. 12.18.) procedendo a uma rotação de 45° sobre a curva original de Peano. Na primeira aproximação, considera-se o iniciador com um intervalo de comprimento 1. Na segunda aproximação, aplica o gerador mostrado no primeiro diagrama. Aos três terços do intervalo de comprimento 1 juntam-se, no gerador, seis intervalos de comprimento $1/3$, que combinados com o terço central do

iniciador, formam um “oito” em dois quadrados. O primeiro diagrama mostra um quadrado e o que acontece se o gerador for colocado sobre cada um dos quatro lados do quadrado. Tudo o que se encontra “à direita” das cópias do gerador (contornando o quadrado de cima no sentido dos ponteiros do relógio) fica a escuro. O primeiro diagrama separa os pontos duplos a fim de tornar a curva mais fácil de seguir. No segundo diagrama substituem-se os terços centrais de cada um dos segmentos da aproximação anterior por um “oito” em dois quadrados, continuando a separar-se os pontos duplos, tal como no diagrama anterior.



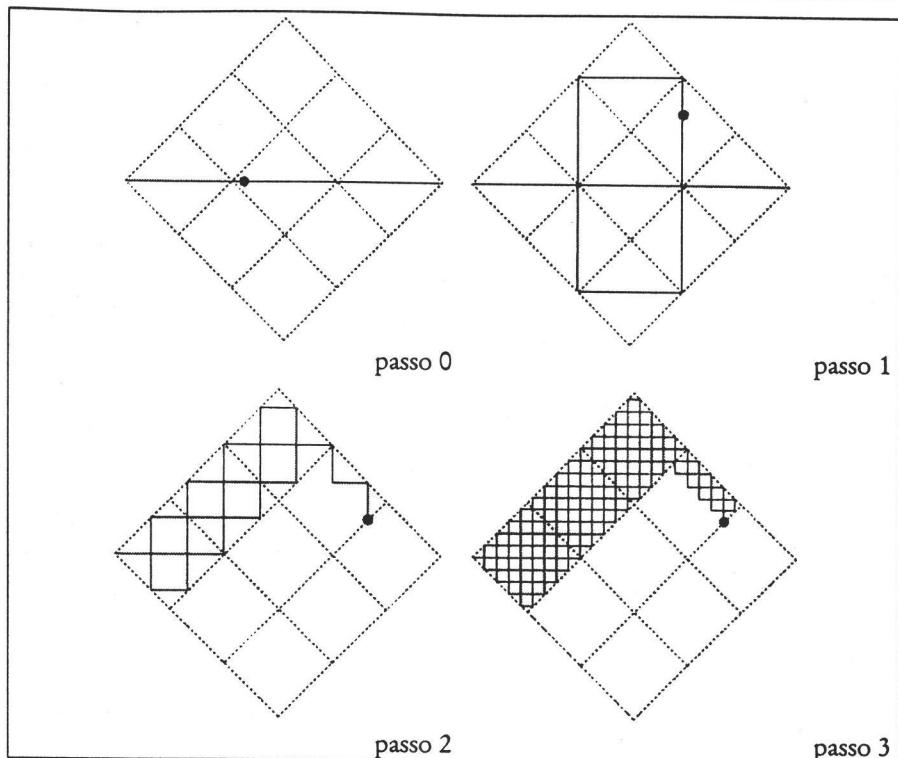


Fig. 12.18. : Etapas seguidas na formação de uma curva de Peano. As etapas podem repetir-se um número infinito de vezes preenchendo todo o espaço bidimensional pela curva

Nos estados finitos mais avançados da construção surge uma forma estranha a que Mandelbrot (1975) denomina por “ilha de Peano”. O seu invólucro é um quadrado de área duas vezes superior à do quadrado inicial. *As baías penetram-na tão profunda e uniformemente que não há ponto da região que não acabe por se partilhar entre a terra firme e a água em proporções aproximadamente iguais!* (MANDELBROT, 1998)

A curva de Peano estabelece uma correspondência contínua entre os pontos do perímetro do quadrado original e o interior do quadrado final, mas esta correspondência não é unívoca. A curva tem um número infinito de pontos duplos. De facto, a curva de Peano co-

bre na globalidade o plano, pelo que mostra uma homotetia interna e uma dimensão fractal igual a 2.

12.6.4. Tapete de Spierpinski

O tapete de Spierpinski é um fractal de um género um pouco diferente, mas, também de um grande nível de complexidade. O ponto de partida (o iniciador) da construção não é, desta vez, um segmento de recta, mas um triângulo equilátero no plano. Para construir um tapete de Spierpinski, divide-se o mesmo em quatro pequenos triângulos iguais entre si e remove-se o triângulo (inverso) situado ao centro (conforme figura). Os três triângulos restantes são a imagem reduzida do primeiro na relação $\frac{1}{2}$. A operação repete-se para cada um dos restantes triângulos de seguida até ao infinito. O conjunto limite obtido é o tapete de Spierpinski. Estes apresentam a propriedade, difícil de imaginar, de que qualquer ponto arbitrário é um ponto de ramificação, uma bifurcação da estrutura.

O tapete de Spierpinski diferencia-se da curva de von Koch, fundamentalmente, porque se corta e recorta sem cessar. “*Um ponto sobre uma curva é denominado um ponto de ramificação se a fronteira de toda a vizinhança arbitrariamente pequena tem mais de dois pontos em comum com a curva [...]. A intuição parece indicar que é impossível que uma curva não seja constituída senão por pontos de ramificação*” (HAHN, citado em BOUTOT, 1993). Esta convicção intuitiva foi refutada pela curva de Spierpinski, em que todos os pontos são pontos de ramificação. O tapete de Spierpinski não é formado senão pela sua própria intersecção, o que parece um desafio ao simples bom senso. A sua dimensão topológica é igual a 1

(é uma curva). A sua dimensão de homotetia é de $\log N / \log(1+r) = \log 3 / \log 2 = 1,5849$.

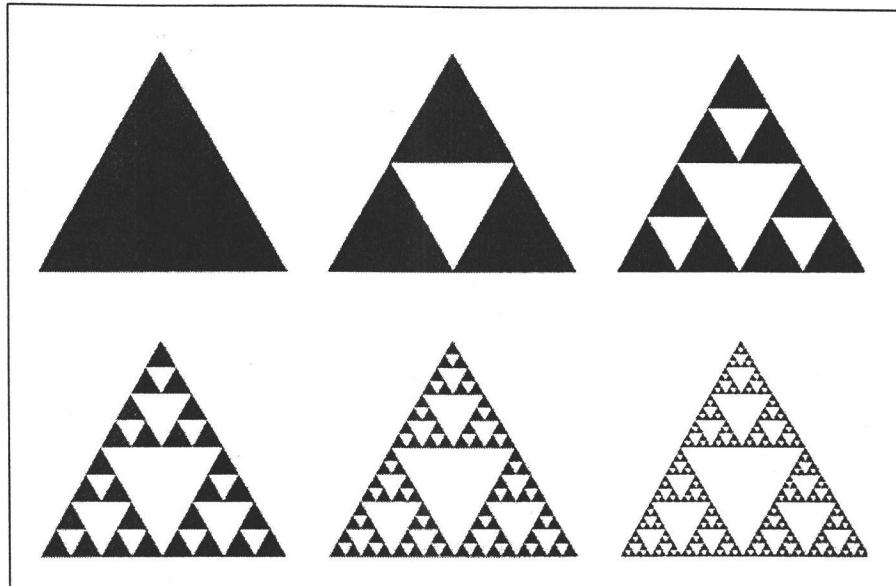


Fig. 12.19. : Construção do Tapete de Spierpinski

A esponja de Spierpinski-Menger, ou um queijo no espaço a três dimensões, como a denomina Mandelbrot, segue o mesmo princípio de construção do tapete de Spierpinski. Se se continuar a construção indefinidamente, obtém-se um objecto geométrico no qual cada face exterior é um tapete de Spierpinski. No final desta operação, obtém-se uma figura tal que a sua área é nula e o perímetro total dos seus buracos é infinito. Repare-se que as intersecções da figura-limite com as medianas ou as diagonais do cubo inicial, são todas conjuntos triádicos de Cantor.

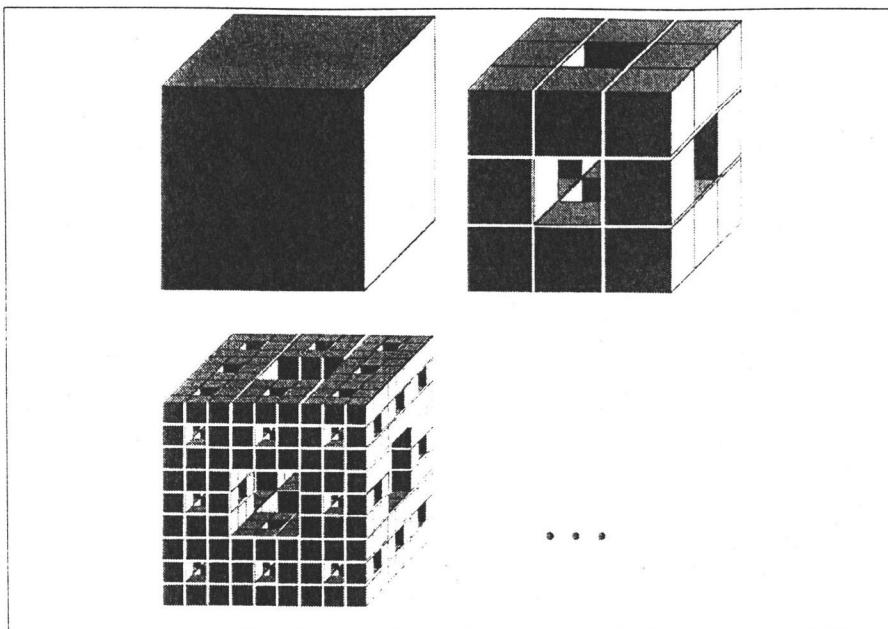


Fig. 12.120: A Esponja de Spierpinski-Menger

12.7. O Movimento Browniano

Acontece por vezes que uma gota de água fique prisioneira numa porção de lava quando do arrefecimento daquela. No começo do século XIX, o botânico escocês Robert Brown descobriu uma gota de água num bocado de quartzo; esta gota de água permaneceu intacta durante milhões de anos e nenhum esporo ou pólen trazido pelo vento ou pela chuva a contaminaram. Ele examinou a gota de água com o auxílio de um microscópio: suspensos na água, um grande número de partículas minúsculas estavam animadas de um movimento irregular e incessante. O movimento era familiar a Brown: ele já o tinha observado para grãos de pólen em suspensão na água. Esta nova observação tornava caduca a sua explicação anterior do fenómeno que “a vitalidade é conservada pelas [“moléculas” de uma planta] muito tempo após a morte da planta e que estas moléculas “vivem” uma vez que elas mexem. Brown concluiu então, que o movi-

mento das partículas presas no interior do quartzo deveria ser um fenómeno mais físico do que biológico, mas não foi mais longe no seu raciocínio.

A explicação correcta do movimento browniano é agora bem conhecida: um grão de pólen ou de poeira suspensos num fluído está sujeito a um bombardeamento incessante pelas moléculas que constituem o fluído. A quantidade de movimento de uma molécula isolada não é nunca suficientemente importante para que o seu efeito sobre a partícula suspensa seja visível ao microscópio. Contudo, se um grande número de moléculas colidem ao mesmo tempo com a partícula, de um lado, elas podem deslocá-la de uma maneira notável.

Por consequência, o movimento browniano é um duplo fenómeno aleatório: o trajecto da partícula suspensa torna-se aleatório pelas flutuações aleatórias das velocidades das moléculas vizinhas. Como o microscópio constitui um filtro que não visualiza senão os efeitos das flutuações relativamente importantes do ambiente molecular local, o movimento observado não permite entrever a complexidade do verdadeiro trajecto. Se o poder de resolução do microscópio pudesse ser aumentado de um factor dez, cem ou mil, os efeitos devidos aos bombardeamentos por grupos de moléculas cada vez mais pequenos seriam detectados. Em cada amplificação, as partes da trajectória da partícula que apareciam ser rectilíneas apareceriam irregulares e erráticas. O trajecto de uma partícula animada de um movimento browniano é um dos primeiros fenómenos naturais cuja característica é ser semelhante a si próprio em cada acréscimo, o que o torna num objecto fractal (LAVENDA, 1997)³⁹(fig. 12.20).

³⁹ Texto inserido em L'ordre du chaos, Bibliotheque pour la Science, 1997.

Desde o começo do século, o estudo do movimento browniano tem vindo a ser aprofundado no âmbito da Física, da Química e da Matemática. Albert Einstein utilizou-o como método de observação para confirmar a existência dos átomos e das moléculas. Mais tarde, Einstein mostrou que a medida de certas propriedades de partículas no movimento browniano permitem determinar numerosas constantes físicas importantes tais como as massas dos átomos e das moléculas e o valor do número de Avogadro⁴⁰. O estudo do movimento browniano melhorou igualmente a compreensão teórica dos princípios da termodinâmica, princípios que tinham sido formulados sob a base de generalizações empíricas muito sumárias.

Mais recentemente, o estudo do movimento browniano deu lugar ao nascimento de técnicas matemáticas importantes para o estudo de processos aleatórios. Estas técnicas foram aplicadas ao controlo do “ruído” electromagnético, melhoraram a compreensão da dinâmica dos aglomerados estrelares, da evolução dos sistemas ecológicos e flutuações bolsistas.

⁴⁰ O número de Avogadro é igual a 6×10^{23} , ou seja, o número de moléculas elementares numa mole de um corpo. A mole é uma unidade química padrão para toda a substância.

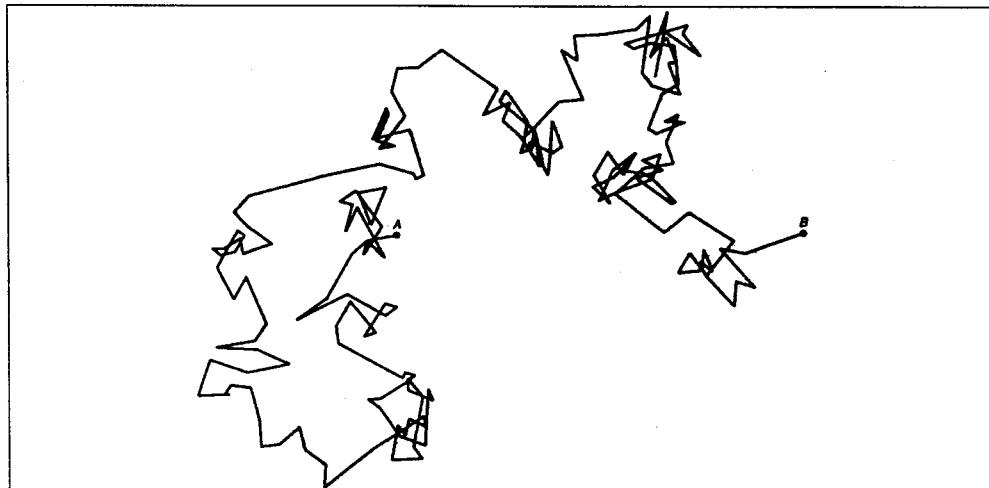
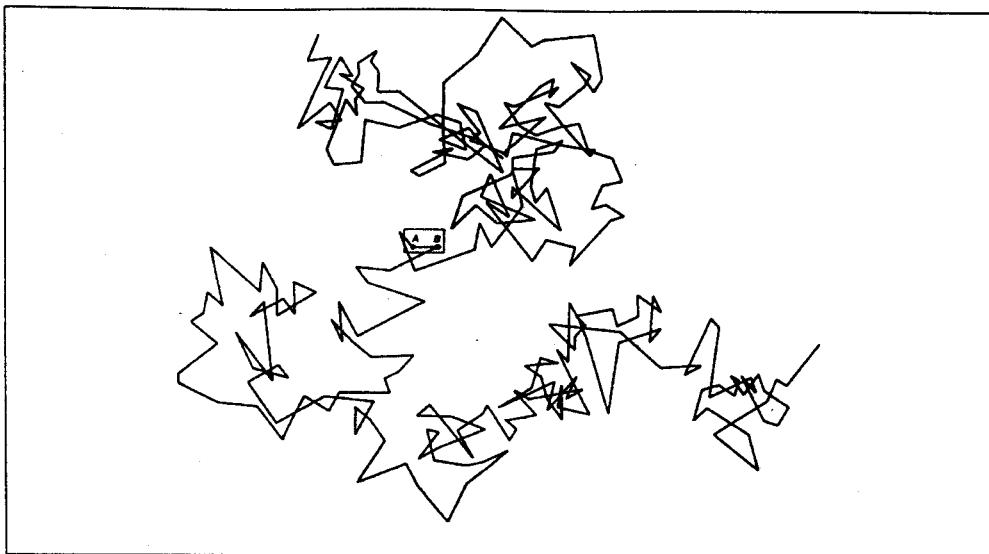


Fig. 12.21.: Movimento Browniano de uma partícula microscópica em suspensão na água (primeira figura). Este movimento de uma partícula foi desenhado pelo físico Jean Perrin, em 1912, os pontos angulosos da linha quebrada representam as posições da partícula em cada 30 segundos. Trata-se aqui de um processo físico e não do seu modelo matemático: cada segmento liga as posições sucessivas, sobre o plano focal de um microscópio, de uma partícula submetida a choques moleculares (MANDELBROT, 1998). Perrin verificou que estes gráficos dão uma pequena percepção da extraordinária descontinuidade da trajectória real. Se se ampliar uma pequena parte da trajectória e desde que a posição da partícula seja repetida 100 vezes mais, encontra-se, a uma outra escala, a complexidade da trajectória original (segunda figura). O segundo diagrama é uma simulação feita em computador por Bernard Lavenda (LAVENDA, 1997).

12.7.1. O Expoente de Hurst

Hurst foi um hidrólogo que iniciou o seu trabalho na barragem do rio Nilo, por volta de 1907, onde permaneceu durante 40 anos. O seu trabalho, nesta zona, consistia no estudo do controlo dos reservatórios de água. O reservatório ideal deveria comportar um sistema de descargas que evitasse o transbordo ou o esvaziamento a níveis tais que pudessem colocar em risco o abastecimento de água.

A construção de um modelo para o sistema em causa comportava uma variável não controlável – a quantidade de precipitação – a qual seguia um percurso aleatório. Esta situação é normal no caso em que se trabalha com grandes sistemas que possuem vários graus de autonomia.

Hurst desenvolveu um novo método estatístico, designado por H , o expoente de Hurst. Este expoente tem um vasto campo de aplicação a análises de séries temporais por ser particularmente resistente. Assenta num conjunto de poucos pressupostos fundamentais sobre o sistema em estudo e permite a classificação de séries temporais distinguindo-as em aleatórias e não-aleatórias, mesmo quando as séries aleatórias não seguem uma distribuição Gaussiana, isto é, não seguem uma distribuição normal.

Para a resolução do problema das descargas do reservatório ideal, Hurst estudou a forma como o reservatório variava em excesso em torno do seu nível médio. Como seria de esperar, a variação dessa flutuação registava alterações conforme o intervalo de tempo utilizado nos cálculos. Se as séries seguissem um percurso aleatório, a variação

aumentaria com a raiz quadrada do tempo: regra de $T^{1/2}$, onde T representa o aumento de tempo. De modo a padronizar a medida sobre o tempo, Hurst concebeu uma relação não limitada, dividindo a variação pelo desvio padrão das observações a qual, denominou por análise de variação re-escalada – análise R/S. Hurst verificou que a maioria dos fenómenos naturais, incluindo as descargas fluviais, temperatura, chuva e mancha solar seguem um percurso aleatório tendencioso – uma tendência com ruído. A medida da tendência e o nível do ruído podiam ser calculados verificando qual o afastamento de H em relação a 0,5.

Considerando uma série temporal geral, pode reformular-se o trabalho de Hurst definindo, numa primeira etapa, a variação comparável às flutuações dos níveis de altitude do reservatório. Para tal inicia-se o processo, com uma série temporal actual, com u observações:

$$X_{t,N} = \sum_{u=1}^t (e_u - M_N) \quad (31)$$

Onde: $X_{t,N}$ = desvio acumulado em N períodos
 e_u = afluxo no ano u
 M_N = média dos N períodos

A variação determina-se pela diferença entre os níveis máximos e mínimos alcançados em ++:

$$R = \text{Max}(X_{t,N}) - \text{Min}(X_{t,N}) \quad (32)$$

Onde: R = variação de X
 $\text{Max}(X)$ = valor máximo de X
 $\text{Min}(X)$ = valor mínimo de X

Para comparar diferentes séries temporais Hurst dividiu a variação obtida pelo desvio padrão das observações originais. O reescalo-

namento desta variação deveria aumentar com o tempo, tendo Hurst formulado a seguinte relação:

$$\frac{R}{S} = (a * N)^H \quad (33)$$

Onde: R/S = variação re-escalada
N = número de observações
a = uma constante
H = expoente de Hurst

Se a série seguir um percurso aleatório H deverá ser equivalente a 0,5, ou, dito de outro modo, a variação do desvio acumulado deverá aumentar com a raiz quadrada do horizonte temporal, N. Hurst aplicou este procedimento ao registo de descargas do rio Nilo tendo encontrado H=0,90. Este mesmo método foi aplicado a outros rios e independentemente dos fenómenos naturais, ocorridos em cada um deles, todos apresentavam um H superior a 0,50. Estes resultados aconteciam porque as observações não eram independentes ($H \neq 0,5$). Cada observação transportava consigo uma memória de longo prazo, ou seja, de todos os acontecimentos que a precediam. Acontecimentos mais recentes têm uma influência superior aos acontecimentos distantes mas estes continuam a exercer uma influência residual. Assim, o expoente de Hurst é o resultado de uma série de acontecimentos interligados. O que acontece hoje será determinante no futuro, do mesmo modo que, o presente é uma consequência de acontecimentos passados. O tempo surge então como um processo iterativo, cujo impacto do presente no futuro pode ser explicado através da seguinte correlação:

$$C = 2^{(2H-1)} - 1 \quad (34)$$

Onde: C = medida de correlação

H = expoente de Hurst

A interpretação do expoente Hurst pode sintetizar-se em três situações distintas:

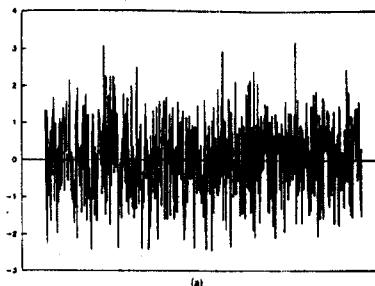
1. $H = 0,5$ – Indica uma série aleatória e os acontecimentos não são correlacionados entre si, ou seja, a correlação é nula, os acontecimentos passados não interferem no presente do mesmo modo que este não afecta os acontecimentos futuros;
2. $0 \leq H < 0,5$ – Trata-se de uma série anti-persistente, ou ergódica, frequentemente denominada como média reversível. Se o sistema esteve em alta no período anterior, é mais provável que esteja em baixa no período seguinte, ou inversamente, se esteve em baixa no período anterior é mais provável estar em alta no período seguinte. A anti-persistência deste comportamento dependerá da proximidade de H relativamente a zero o que irá provocar uma correlação negativa, em C, a tender para -0,5;
3. $0,5 < H < 1,0$ – Série persistente ou de reforço da tendência. Se a série esteve em alta (baixa) no último período é expectável a continuação positiva (negativa) no período seguinte. Estas tendências são, no entanto, aparentes, a persistência, ou o reforço da tendência, aumenta à medida que H se aproxima de 1,0, ou correlação de 1,0 na equação C. Quanto mais próximo H estiver de 0,5, maior será o ruído e menos definidas serão as tendências. Estas séries persistentes são movimentos brownianos fraccionários ou percursos aleatórios tendenciosos, cuja força da tendência dependerá da proximidade de H em relação a 0,5.

12.7.2. A Natureza Fractal do Expoente de Hurst

As séries persistentes, definidas como $0,5 < H \leq 1,0$, podem ser definidas como movimentos brownianos fraccionários. Num movimento browniano fraccionário há uma correlação entre os acontecimentos ao longo das escalas. Devido a essa correlação, a probabilidade de dois acontecimentos se realizarem sucessivamente não é igualmente provável, isto é de 50%. O expoente de Hurst (H) descreve a probabilidade de dois acontecimentos se realizarem consecutivamente: se $H = 0,6$ existe uma probabilidade na ordem dos 60% de se o último acontecimento for positivo o próximo também o ser.

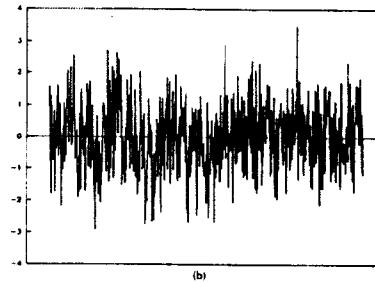
Pelo facto de cada ponto não ser igualmente provável, porque se trata de um percurso aleatório, a dimensão fractal da distribuição de probabilidades é um número compreendido entre 1 e 2. Mandelbrot demonstra que o inverso de H é a dimensão fractal. Um percurso aleatório com $H = 0,5$ teria uma dimensão fractal de 2.

Os gráficos seguintes mostram séries simuladas para $H = 0,52$, $0,72$ e $0,9$ (fig's 12.22., 12.23. e 12.24. respectivamente). Quando H se aproxima mais de 1 a série apresenta menos ruído e mais observações consecutivas com o mesmo sinal. O quarto gráfico (fig. 12.25) representa séries temporais acumuladas. À medida que H aumenta obtém-se uma linha mais plana e com menos recortes. O ruído é menor no sistema e as tendências ou desvios da média tornam-se mais acentuados.



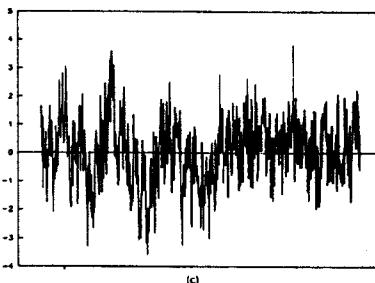
(a)

Fig. 12.22.: Ruído fractal: Observações. $H=0,52$ a correlação do sinal das séries é crescente



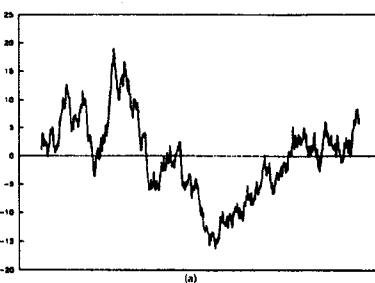
(b)

Fig. 12.23.: Ruído fractal: Observações. $H=0,72$



(c)

Fig. 12.24.: Ruído fractal: Observações. $H=0,90$



(a)

Fig. 12.25.: Ruído fractal: Observações Acumuladas. $H=0,50$

O expoente de Hurst calcula o recorte da série temporal. Um sistema perfeitamente determinista produziria uma curva plana. Uma

série temporal fractal dissocia uma série temporal aleatória pura, de um sistema determinista com perturbações aleatórias.

Cada variação percentual, numa série temporal de movimento browniano fraccionário, é constituída por um expoente médio de n números aleatórios independentes. Esta média contém um peso declinado das últimas observações M, representando M, o efeito extensivo de memória no sistema: teoricamente este efeito é infinito. Assim, para um N muito grande seria de esperar que a série convergisse para o valor de H = 0,5, uma vez que o efeito de memória vai diminuindo a tal ponto que se torna impossível a sua avaliação. Dito de outro modo, poder-se-á esperar que observações com N muito elevado revelem propriedades semelhantes às do movimento browniano regular, ou um simples movimento aleatório à medida que

$$\log\left(\frac{R}{S}\right) = H \times \log(N) + \log(a) \quad (35)$$

o efeito de memória se dissipasse. Desta forma, a regressão da equação logarítmica seria efectuada sobre informação anterior à convergência de H = 0,5.

$$C = 2^{(2H-1)} - 1 \quad (36)$$

É importante realçar que a medida de correlação obtida pela equação não se aplica a todos os incrementos, ou seja, não está relacionada com a função de auto correlação das variáveis aleatórias de Gauss. A função de auto correlação assume propriedades Gaussianas ou quase Gaussianas, na distribuição subjacente. Esta função é de grande eficácia quando se pretende determinar a dependência a curto prazo, mas tende a determinar uma correlação a longo prazo para séries não Gaussianas. Pelo contrário, a análise R/S é uma ferramenta muito poderosa. Não significa que a distribuição subjacente seja Gaus-

siana. Um valor de $H=0,5$ não prova a existência de um movimento aleatório Gaussiano, prova apenas que não existe um processo de grande memória, para qualquer sistema independente Gaussiano ou outro.

Pela análise R/S é possível identificar as observações irregulares o que permite determinar a extensão média do ciclo do sistema. Em termos de sistemas dinâmicos não-lineares a extensão média do ciclo é a extensão de tempo a seguir à qual se perde o conhecimento das condições iniciais.

Um cálculo de H significativamente diferente de 0,50 tem fundamentalmente duas explicações possíveis: (i) existe uma grande componente de memória na sequência de tempo em estudo, cada observação está correlacionada, em determinado grau com as observações que se seguem; e, (ii) a própria análise está errada e um valor de H anormal não significa que se esteja na presença de um grande efeito de memória.

Pode-se testar a validade dos resultados misturando ao acaso os dados e fazendo com que a ordem das observações seja completamente diferente da sequência de tempo inicial. Como se mantêm as observações a frequência da distribuição das observações permanece inalterada. Repetem-se de novo os cálculos do expoente de Hurst para a nova série de dados. Se a sequência de dados for completamente independente, então o cálculo do expoente de Hurst permanecerá virtualmente inalterado, porque não existia efeito de memória, ou correlação entre as observações. A verificar-se um grande efeito de memória a ordem dos dados seria importante e, ao misturar os dados, a estrutura é destruída. O valor de H deveria ser bastante próximo de 0,5,

mesmo mantendo inalterada a frequência da distribuição das observações.

12.8. Sistemas de Pequena Dimensão com Equações Conhecidas

12.8.1. O mapa de Henon

O atrator de Henon é um bom exemplo de um mapa bidimensional iterativo. A equação assume uma forma muito simples:

$$X_{(t+1)} = 1 + Y_t - a * X_t^2 \quad (37)$$

$$Y_{(t+1)} = b * X_t$$

em que X_t e Y_t são variáveis e a e b são constantes.

Quando $a = 1,40$ e $b = 0,30$ atinge-se um movimento caótico. A fig. 12.25 evidencia os valores de X e Y enquanto séries temporais. Em ambas as séries denota-se o movimento irregular.

O espaço de fase é apresentado na fig. 12.25. A sua estrutura não é aleatória, como na teoria do caos, mas os pontos constituem um traçado aparentemente aleatório. A ordem é diferente, dependendo do ponto de partida inicial, mas o resultado mantém-se sempre o mesmo: atrator de Henon.

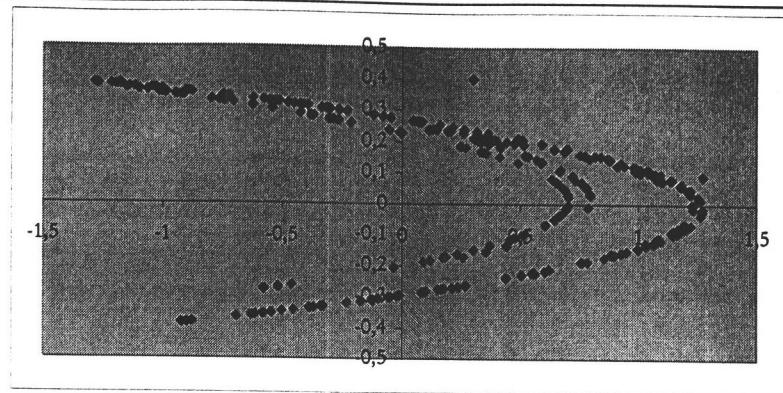


Fig. 12.26.: Atractor de Henon: Espaço de fase

O sistema de Hénon tem dois graus de liberdade: X e Y. Cada valor de X está dependente dos valores anteriores de X e Y e Y está relacionado com o valor anterior de X. Assim, cada valor depende do valor anterior, sendo a série temporal dependente do valor inicial utilizado, o espaço de fase mantém sempre a mesma aparência.

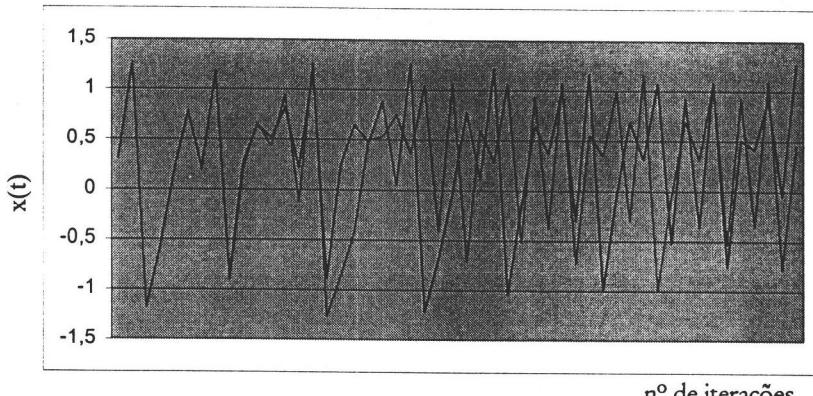


Fig. 12.27.: Atractor de Henon: Dependência sensitiva às condições iniciais

Conceba-se agora um segundo sistema de Hénon em que os valores iniciais diferem 0,01 em relação aos considerados primeiramente. Da análise da fig. 12.27 verifica-se que o traçado é inicialmente comum a ambos os valores, mas que rapidamente divergem. Trata-se de uma dependência sensível às condições iniciais. Apesar dos valores

diferirem apenas 0,01, irão divergir no tempo à medida que 0,01 é elevado ao quadrado com cada réplica e exercer uma retroacção directa, no valor de X seguinte, e indirecta, no valor de Y duas réplicas adiante.

As experiências numéricas com a equação de Henon são muito esclarecedoras na medida em que evidenciam a sensibilidade intuitiva em relação ao movimento num sistema não-linear, através do teste empírico ao sistema.

12.8.2. A equação logística de retardamento

A equação logística de retardamento revela-se interessante devido ao facto de exibir um comportamento denominado por bifurcação de Hopf, uma mudança de um atrator de pontos para um ciclo limite. Na equação logística de retardamento, o valor real de X depende dos dois valores anteriores de X. A sua forma matemática expressa-se por:

$$X_t = a * X_{(t-1)} * (1 - X_{(t-2)}) \quad (38)$$

em que X_t = uma variável

a = uma constante

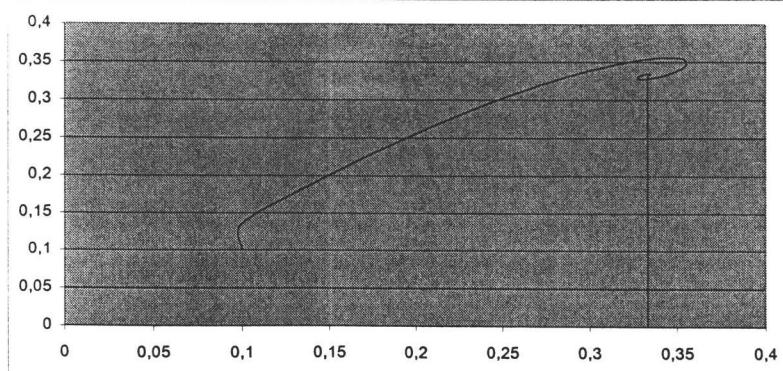


Fig. 12.28.: Equação Logística de Retardamento: $a=1,50$

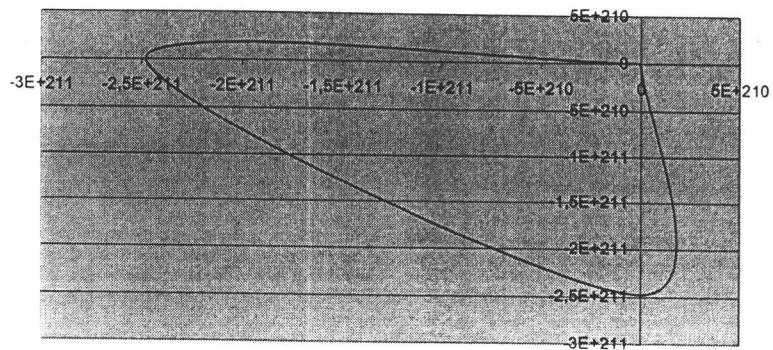


Fig. 12.29.: Equação Logística de Retardamento: $a=2,58$

A fig. 12.28 mostra o comportamento da função para um parâmetro de controlo de 1,50, o valor movimenta-se em espiral até chegar ao valor final. Ao aumentar o parâmetro de controlo, atinge-se um valor crítico em 2,58, o atrator assume a forma de um ciclo limite (fig. 12.29).

A equação logística de retardamento revela-se particularmente interessante porque vai mostrar a forma como o comportamento de um sistema dinâmico não-linear varia em função do seu parâmetro de controlo (a constante a).

12.8.3. Exponentes de Lyapunov

Uma das características importantes dos sistemas caóticos é a dependência sensível às condições iniciais. Este aspecto pode ser encarado segundo duas perspectivas. Na primeira perspectiva, o conceito descreve a dificuldade existente na especificação do problema. Quem

concebe um modelo define as equações de movimento apropriadas, mas a exactidão das previsões geradas pelo modelo depende da qualidade dos dados inseridos. Quanto maior for o horizonte temporal em análise, menos exactas serão as previsões. Este problema clássico de quem concebe modelos é tornado real pela natureza dos sistemas não-lineares, que ampliam os erros.

De acordo com a segunda perspectiva, o próprio sistema gera uma dependência aleatória através de um processo de “mistura” e a partir de um certo momento perde-se todo o conhecimento inicial. À medida que é ampliado pelas não-linearidades, o processo evolutivo poderá ser tão complexo que impossibilita voltar ao momento inicial do sistema.

Estas duas perspectivas podem ser combinadas numa perfeita continuidade. O momento actual é dependente do momento anterior, assim como, a exactidão das previsões efectuadas são dependentes da compreensão relativa do momento actual. Um único acontecimento pode influenciar indefinidamente o futuro, mesmo que o sistema tenha memória do acontecimento durante apenas um período de tempo finito.

A susceptibilidade de um sistema à dependência sensitiva das condições iniciais pode ser medida através de números denominados por Expoentes de Lyapunov, os quais medem a rapidez com que as órbitas vizinhas se afastam no espaço de fase. No espaço de fase existe um expoente de Lyapunov por cada dimensão.

Um expoente de Lyapunov positivo mede a dilatação no espaço de fase, isto é, mede a rapidez com que os pontos vizinhos se afas-

tam uns dos outros. Um expoente de Lyapunov negativo mede a contracção – quanto tempo demora o sistema a restabelecer-se após ter ocorrido uma perturbação. Imagine-se um pêndulo, fixo numa mesa e oscilando num movimento regular. Uma pancada na mesa provoca que o pêndulo perca o seu ritmo. Contudo, se não se verificar mais nenhum distúrbio, o pêndulo regressará a um ritmo estável, mas desta vez com uma nova amplitude. No espaço de fase, a órbita do pêndulo é caracterizada por um círculo fechado ou ciclo limite. Se se representar graficamente a acção no momento em que a mesa leva a pancada, ver-se-ão algumas órbitas desordenadas longe do ciclo limite, antes de se estabelecer num novo ciclo limite. O expoente de Lyapunov negativo mede o número de órbitas, ou o tempo necessário para que o gráfico, no espaço de fase, regresse ao seu atrator, que neste caso é um ciclo limite.

Os expoentes de Lyapunov dão um tipo de classificação de atractores. Os atractores convergem sempre para um ponto fixo. Deste modo, um atractor tridimensional é caracterizado por três expoentes de Lyapunov negativos. As três dimensões contraem-se para o ponto fixo.

Os ciclos limite tridimensionais apresentam dois expoentes negativos e um expoente igual a zero. Os ciclos limites têm duas dimensões que convergem entre si e uma na qual não ocorre nenhuma alteração na posição relativa dos pontos, o que dá origem às órbitas fechadas.

Finalmente, os atractores estranhos tridimensionais têm um expoente positivo, um negativo e um igual a zero. O expoente positivo revela a dependência sensitiva às condições iniciais, ou a tendência para pequenas alterações nas condições iniciais modificarem as previ-

sões. O expoente negativo faz com que os pontos que se afastam permaneçam dentro do raio de alcance do atrator. Para um atrator estranho, o equilíbrio é definido pelo afastamento a que os valores podem chegar antes de tornarem a um intervalo razoável.

No espaço de fase medem-se os expoentes de Lyapunov vendo como o volume de uma esfera muda ao longo do tempo. A taxa de crescimento exponencial do volume da esfera é uma medida do expoente de Lyapunov. A equação formal do i-ésimo expoente de Lyapunov (L_i) para i-ésima dimensão ($p_i(t)$) é dada por:

$$L_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{t} \right) \log_2 \left(\frac{p_i(t)}{p_i(0)} \right) \quad (39)$$

A parte linear da esfera cresce à taxa de $2^{L_1 t}$. A área das duas primeiras dimensões cresce à taxa de $2^{(L_1+L_2)t}$. O volume da esfera tridimensional cresce a $2^{(L_1+L_2+L_3)t}$.

Os expoentes de Lyapunov foram originalmente concebidos para a Teoria da Informação desenvolvida, como se analisou anteriormente, por Shannon. A Teoria da Informação media a eficácia dos computadores. Uma vez que os computadores são sistemas digitais de base binária, os seus dados são armazenados e gravados em formato binário. Shannon desenvolveu uma teoria da comunicação para medir a incerteza de que uma mensagem seja correctamente recebida. Através do conceito termodinâmico de entropia e medindo a entropia em bits, quanto mais bits de informação entrarem para o sistema, maior será a entropia ou a incerteza do sistema.

Aplicando uma expressão utilizada por Peters (1991) os “bits de exactidão” medem o que se sabe sobre as condições actuais. Admita-se que o maior expoente de Lyapunov era de 0,05 bits por dia, isto significa que por cada dia que passa se perdem 0,05 bits de poder de previsão. Se se puderem medir as condições actuais a um bit de precisão, após $1/0,05$, ou seja 20 dias. O impacte desse bit de informação dissipase ao fim de 20 dias e o sistema deixa de ter memória dele (PETERS, 1991).

Sabendo que o maior expoente de Lyapunov diz quanto fiáveis são as previsões para um determinado período de tempo, apenas se poderá medir a fiabilidade de um sistema para o qual se conhecem as equações de movimento.



Fig. 12.30: Expoente de Lyapunov

12.9. Síntese do Capítulo

12. O CAOS E A GEOMETRIA FRACTAL

- 12.1. Benoit Mandelbrot e o nascimento da Geometria fractal
- 12.2. Quanto mede a costa da Bretanha
 - 12.2.1. O Conjunto de Mandelbrot
- 12.3. A “Galeria de Monstros” de Poincaré
- 12.4. A equação logística
- 12.5. Objecto e estrutura matemática fractal
 - 12.5.1. Dimensão fractal de conteúdo
- 12.6. Alguns exemplos de conjuntos fractais
 - 12.6.1. Conjunto Triático de Cantor
 - 12.6.2. A Curva de Von Koch
 - 12.6.3. A Curva Original de Peano
 - 12.6.4. Tapete de Sierpinski
- 12.7. O Movimento Browniano
 - 12.7.1. O Expoente de Hurst
 - 12.7.2. A natureza fractal do Expoente de Hurst
- 12.8. Sistemas de pequena dimensão com equações conhecidas
 - 12.8.1. O Mapa de Henon
 - 12.8.2. A equação logística de retardamento
 - 12.8.3. Expoentes de Lyapunov

Com este capítulo pretendeu-se dar uma visão global das noções subjacentes à Teoria do Caos e à Geometria Fractal. Como complemento, procurou-se analisar ainda como caos e fractais se relacionam entre si, assim como com os aspectos do mundo matemático e com os próprios fenómenos naturais.

De há cerca de vinte anos para cá, a Matemática e as Ciências Naturais têm feito um percurso no qual poder, criatividade e expansão se tem tornado uma experiência interdisciplinar de primeira ordem. Esta vaga tem tocado diferentes suportes em torno das ciências.

A Geometria Fractal e a Teoria do Caos têm literalmente capturado a atenção, o entusiasmo e o interesse de uma gama

alargada de investigadores. Para os cientistas, a Teoria do Caos e a Geometria Fractal proporcionam um ambiente excepcional para explorar e modelizar sistemas complexos adaptativos.

Com a nova visão de encarar o mundo, a teoria do caos e a geometria fractal, têm corrigido uma antiquada concepção deste. Os sucessos alcançados nos campos das Ciências Naturais e da tecnologia criaram a visão de que o mundo, no seu todo, funcionava com a fiabilidade de um mecanismo de relógio, cujas leis só poderiam ser decifradas passo a passo. Após decifradas as leis, acreditava-se que os desenvolvimentos dos diversos acontecimentos podiam, em princípio, ser previstos correctamente.

Cativados pelo empolgante desenvolvimento das tecnologias informáticas e por uma crença generalizada de um maior comando e um melhor controlo da informação, generalizou-se uma esperança crescente nestas máquinas. No entanto, aqueles que formaram o núcleo duro da moderna ciência proclamam, agora, que essa esperança é injustificada; a capacidade de prever com maior rigor os acontecimentos futuros é inatingível.

Uma conclusão pode ser extraída das novas teorias: determinismo estrito e desenvolvimento aparentemente acidental não são mutuamente exclusivos, pelo contrário a sua coexistência é mais a regra da natureza. A Teoria do Caos e a Geometria Fractal evidenciam esta regra.

Quando se examina o desenvolvimento de um processo de longo prazo, utilizam-se os termos empregues na Teoria do Caos. Quando se está mais interessado nas formas estruturais, aplica-se a terminologia fractal, a qual é de facto a geometria cujas estruturas conferem a ordem à Teoria do Caos.

De um certo modo, a Geometria Fractal é a primeira e a mais adequada a uma nova linguagem capaz de descrever, modelizar e analisar as formas complexas encontradas na natureza. Mas enquanto a linguagem tradicional da Geometria Euclidiana, comprehende formas visíveis básicas, como linhas, círculos e esferas, a nova linguagem não se presta a observações directas. Esta nova linguagem é formada nomeadamente por algoritmos que podem ser transformados em formas e estruturas apenas com a ajuda do computador. A oferta destes elementos algorítmicos é incomensuravelmente grande e permite munir o decisior com um poderoso instrumento descritivo. Esta nova linguagem pode descrever a forma de uma nuvem, de vales e cascatas, linhas costeiras ou ainda dos mercados financeiros, e, em particular, do mercado de capitais.

Na essência, a Teoria do Caos e a Geometria Fractal questionam radicalmente a compreensão de equilíbrio – da harmonia e da ordem – na natureza como outros domínios científicos desde a Física à Biologia, da Fisiologia à Economia, entre outros.

A Teoria do Caos e a Geometria Fractal suportam de novos modelos holísticos e integrais, que abarcam as organizações complexas, entre as quais se enquadra o mercado de capitais. É altamente provável que os novos métodos e terminologias, conduzam a uma mais adequada compreensão de fenómenos que se estendem por todos os domínios do saber.

13. CONCLUSÃO DA SEGUNDA PARTE *DO CAOS À ORDEM, DA ORDEM AO CAOS*

A procura da unificação, ou dos princípios unificadores, que com Deus ou à sua margem, possam explicar todos os fenómenos desde a gênese da vida, ao movimento dos astros ou ao comportamento das sociedades ou dos mercados, tem constituído preocupação dominante dos filósofos e cientistas desde, pelo menos, a Grécia antiga, até aos dias de hoje, e continuará seguramente pelos tempos vindouros.

O universo, com os seus corpos celestes mudando de posição relativamente à Terra, de forma perpétua, cíclica e regular, estimula a contemplação e constituiu, naturalmente, uma primeira fonte de inspiração à reflexão e à teorização. Daí resultaram leis universais determinísticas, que condicionaram o pensamento e se repercutiram sobre a visão do mundo, não só do universo, mas de todas as coisas e fenómenos, simples e complexos, com que o homem se confronta.

Após um longo período onde o pensamento do homem repousava sobre um conjunto de certezas, concebendo o funcionamento do mundo com a regularidade de um relógio e o futuro rigorosamente determinado

*pelo passado, a ciência, emancipada da religião e da Igreja, não só des-
cobre a incerteza, como lhe atribui a causa pela estabilidade das organi-
zações e pela evolução.*

*Novas teorias e novas ferramentas de matemática e de geometria
vêm dar corpo à construção de visões sucessivamente mais abrangentes e
unificadoras dos fenómenos conhecidos , nomeadamente ao nível das
forças que os regem.*

*Neste novo contexto, uma atenção particular é dada à Teoria do
Caos e à Geometria fractal, pois elas proporcionam um ambiente ex-
cepionalmente favorável para explorar e modelizar sistemas complexos
adaptativos, que constituem, de facto, o objecto sobre o qual incide o
presente trabalho. Com efeito, a Teoria do Caos e a Geometria fractal,
com a sua linguagem formada por algoritmos que podem ser transfor-
mados em formas e estruturas apenas com a ajuda do computador, per-
mite munir o decisior com um poderoso instrumento descriptivo. Esta
nova linguagem pode descrever tanto a forma de uma nuvem como os
mercados de capitais. Na essência, a Teoria do Caos e a Geometria
Fractal questionam radicalmente a compreensão de equilíbrio, da har-
monia e da ordem- na natureza como nos domínios científicos, desde a
Física à Biologia, da sociedade aos mercados, por exemplo.*

Referências Bibliográficas

- BERGÉ, P.; POMEAU, Y.; VIDAL, C.** *L'ordre dans le chaos.* Paris, Hermann, 1998. (Colecção “Enseignement des Sciences”).
- BOUTOT, A.** *L'invention des formes : chaos, catastrophes, fractales, structures dissipatives, attracteurs étrangers.* Paris, Éditions Odile Jacob, 1993.
- BRIGGS, J. e PEAT, F. D.** *Un miroir turbulent: guide illustré de la théorie du chaos.* Trad. (I/Fr) de D. Stoquart. Paris, InterÉditions, 1991.
- DALMEDICO, A. D. ; CHABERT, J.-L. ; CHEMLA, K.** (Direcção). *Chaos et Déterminisme.* Paris, Édition du Seuil, 1992. (Série “Point Sciences”).
- DAVIES, P.** *About Time: Einstein's unfinished revolution.* London, Penguin Books, 1995.
- DESCARTES, R.** *Discurso do Método.* Trad. (Fr./P.) de Pinharanda Gomes. 2.ed. Lisboa, Guimarães Editores, 1994. (Colecção “Filosofia & Ensaios”).
- DESCARTES, R.** *Os Princípios da Filosofia.* Trad. (Fr./P.) de A. Ferreira. 6.ed. Lisboa, Guimarães Editores, 1998. (Colecção “Filosofia & Ensaios”).
- EKELAND, I.** *A Matemática e o Imprevisto: Símbolos do Tempo de Kepler a Thom.* Trad. (Fr./P.) de M. Vieira. Lisboa, Gradiva, 1993. (Série “Ciência Aberta”).
- EKELAND, I.** *Le Chaos.* Paris, Flammarion, 1995. (Colecção “Dominos”).

- FORTI, A. et. al. *La Mort de Newton*. Paris, Maisonneuve & Larose, 1996. (Colecção “Prometheus”).
- GELL-MANN, M. *O Quark e o Jaguar: aventuras no simples e no complexo*. Trad. (I./P.) de J. L. Malaquias. Lisboa, Gradiva, 1997. (Colecção “Ciência Aberta”).
- GLEICK, J. *Chaos: making a new science*. 3.ed. London, Abacus, 1993.
- GUILLEN, M. *Cinco Equações que mudaram o Mundo: o poder e a poesia da matemática*. Trad. (I./P.) de H. Aranha. Lisboa, Gradiva, 1998. (Série “Ciência Aberta”).
- LASZLO, E. *Conexão Cósmica: Guia pessoal para a emergente visão da ciência*. Trad. (I./P.) de Franklin R. F. Gonçalves. Petropolis, Editora Vozes, 1999.
- LORENZ, E. N. *A Essência do Caos*. Trad. (I./P.) de C. B. David. Brasília, Editora Univ. Brasília, 1996.
- LOSEE, J. *Introdução Histórica à Filosofia da Ciência*. Trad. (I./P.) de C. Lains. Lisboa, Terramar, 1998.
- LOUÇÃ, F. *Turbulência na Economia*. Porto, Edições Afrontamento, 1997. (Colecção “Biblioteca das Ciências do Homem”).
- MANDELBROT, B. B. *Fractals and Scaling in Finance: discontinuity, concentration, risk*. New York, Springer, 1997.
- MANDELBROT, B. B. *Les Objets Fractals: forme, hasard et dimension*. 4.ed. Paris, Flammarion, 1995. (Colecção “Champs”).
- MORIN, E. *O Método: 4. As ideias - a sua natureza, vida, habitat e organização*. Trad. (Fr./P.) de E. Campos Lima. Lisboa, Publicações Europa-América, 1992. (Colecção “Biblioteca Universitária”).

- PENROSE, R. *A Mente Virtual (The Emperor's New Mind)*. Trad. (I./P.) de A. J. Franco de Oliveira. Lisboa, Gradiva, 1997. (Colecção “Ciência Aberta”).
- PESSIS-PASTERNAK, G. *Será Preciso Queimar Descartes? : Do caos à inteligência artificial*. Trad. (Fr./P.) de M. Alberto. Lisboa, Relógio D'Água Editores, 1993.
- PETERSON, I. *Le Chaos dans le Système Solaire*. Paris, Pour la Science, 1995.
- POINCARÉ, H. *La Science et l'Hypothèse*. Paris, Flammarion, 1968. (Colecção “Champs”).
- POINCARÉ, H. *La Valeur de la Science*. Paris, Flammarion, 1970. (Colecção “Champs”).
- PRIGOGINE, I. e STENGERS, I. *A Nova Aliança: metamorfose da ciência*. Trad. (Fr./P.) de M. Faria, M. M. Trincheira. 2.ed. Lisboa, Gradiva, 1986. (Série “Ciência Aberta”).
- PRIGOGINE, I. e STENGERS, I. *Entre o Tempo e a Eternidade*. Trad. (Fr./P.) de F. Fernandes e J. C. Fernandes. Lisboa, Gradiva, 1990. (Série “Ciência Aberta”).
- PRIGOGINE, I. *O Fim das Certezas: O Tempo, o Caos e as Leis da Natureza*. Trad. (Fr./P.) de J. Alves. Lisboa, Gradiva, 1996. (Série “Ciência Aberta”).
- ROSMORDUC, J. *De Tales a Einstein*. Trad. (Fr./P.) de J. C. Fernandes. Lisboa, Editorial CAMINHO, 1983. (Colecção Universitária).
- SERRES, M. *As origens da geometria*. Trad. (Fr./P.) de A. Simões e M. da Graça Pinhão. Lisboa, Terramar, 1997.
- STEWART, I. *Deus Joga aos Dados?*. Trad. (I./P.) de A. Salvador. Lisboa, Gradiva, 1991. (Colecção “Ciência Aberta”).

- STEWART, I. *Os Problemas da Matemática*. Trad. (I./P.) de M. Urbano. 2.ed. Lisboa, Gradiva, 1996. (Série “Ciência Aberta”).
- STRUJK, D. J. *História concisa das matemáticas*. Trad. (I./P.) de J. Guerreiro. 3.ed. Lisboa, Gradiva, 1997. (Série “Ciência Aberta”).
- THÉODORIDÈS, J. *História da Biologia*. Trad. (Fr./P.) de J. C. da Rocha. Lisboa, Edições 70, 1984. (Biblioteca Básica de Ciência).
- THUAN, T. X. *Le Chaos et l'Harmonie: la fabrication du réel*. Paris, Fayard, 1998.

Terceira Parte

Equilíbrio ou Turbulência

O problema que suscitou o aparecimento da ciéncia económica, o «misterio» que fascinou Adam Smith como fascinava um economista moderno, foi o problema do mercado: há um sentido de orden no universo económico, e esta ordem não é imposta de cima mas resulta em certa medida das trocas entre individuos, cada uma deles procurando maximizar o seu próprio ganho. A história do pensamento económico, portanto, não é mais do que a história dos nossos esforços para compreender o funcionamento de uma economia baseada nas transacções do mercado

Mark Blaug

14 INFLUÊNCIA NEWTONIANA NO DESENVOLVIMENTO DA CIÊNCIA ECONÓMICA

A construção da economia como ciência tem sido influenciada pelo modelo da epistemologia que se baseava em leis extensivas, conclusivas e indutivas explicando todos os fenómenos segundo trajectórias gerais, no contexto de um mundomecanicista cartesiano. Este tipo de conhecimento positivo foi considerado como o único possível e de acordo com as normas da boa ciência. Mas desde os primeiros tempos da reflexão epistemológica que surgiram alertas contra esse reducionismo (LOUÇÃ, 1997). Este aspecto pode ser atribuído em parte a uma grande dependência da análise dos problemas económicos no que respeita às metáforas newtonianas e às concepções mecanicistas. Estas metáforas assentam numa noção de equilíbrio sem ter em conta o tempo e o seu carácter de irreversibilidade, elemento significativo da evolução sócio económica. As respostas políticas são decalcadas da mecânica clássica, e a maior parte das soluções propostas fundem-se no reducionismo e nos mecanismos clássicos estáticos weberianos (JUMA, 1996).

Os sistemas económicos são, no entanto, sistemas abertos que evoluem constantemente, reorganizados pela introdução de novas informações e de

novas tecnologias. Esta perspectiva de desequilíbrio toma em consideração também o comportamento económico não linear e as principais orientações devidas à introdução de novos conhecimentos e à utilização das ciéncias e tecnologias no desenvolvimento de um país. Esta problematização deveria logicamente conduzir a políticas alternativas, que não se preocupassem com o restabelecimento do equilíbrio económico, mas que, pelo contrário, colocassem o acento tónico na acumulação de capacidade tecnológica, na flexibilidade da organização, na experimentação social, no reconhecimento da diversidade e da autonomia. Esta visão demarca-se profundamente da concepção newtoniana do mundo (e dos seus fundamentos baconianos e cartesianos).

As diferenças fundamentais entre as ciéncias sociais, e também as Ciéncias da Natureza, e a Física, foram desprezadas, na maioria das vezes e a síntese neoclássica integrou conceitos essenciais da Física nos modelos como o modo legítimo de descrição e de explicação. De facto, essa foi a base para gerar predições, como sendo um critério decisivo em ciéncias sociais (LOUÇÃ, 1997). Contudo, o comportamento dos indivíduos varia em função das interacções e estes são, pelo menos parcialmente, conscientes da sua situação actuando em consequênciia. Estabelecendo a analogia com a Física, é um pouco como se a partícula – ou as molécula – pensassem e decidissem a maneira como se comportam. Na existênciia de leis sociais, os indivíduos procurariam, então, conhecê-las e tornéá-las de modo a retirar vantagens para eles próprios e, deste modo, seriam de imediato modificadas... ou seja, deixariam de o ser. Diferentemente das leis físicas que se definem como *uma relação matemática entre variáveis ou entre estados de um sistema, que é verificada por experiências ou então por observações, em condições determinadas, esta relação faz intervir constantes fundamentais, tais como a constante da gravidade, a velocidade da luz, a carga elementar, a constante de Planck e o número de Avogadro, a partir dos dados fornecidos por experiência de observação*, as leis da economia, como nas restantes ciéncias sociais, não podem ser

senão compreendidas como tendências historicamente datadas (GUERRIEN, 1999).

A dinâmica da Bolsa ilustra bem este efeito: se existisse uma “lei” que permitisse prever, por exemplo, o aumento de um título, então todos os indivíduos procurariam adquiri-lo, e certamente que não haveria mais preço para este título, naturalmente, por ausência de vendedores. Para que o preço exista é necessário haver vendedores, ou seja indivíduos que desconhecem a “lei” do aumento do título, ou, o que se traduz no mesmo, não crêem nessa possibilidade. Esta situação simples evidencia a importância do efeito da informação e da convicção dos indivíduos sobre o seu comportamento. Dito de outro modo, não existe relação estável e válida para toda e qualquer circunstância.

14.1 Os Conceitos Newtonianos nos Fundamentos Epistemológicos da Economia

O positivismo clássico, inspirado pelo paradigma newtoniano influenciou a própria concepção da economia política, que assumiu duravelmente uma perspectiva reducionista. O *homo economicus*, dotado com as leis newtonianas de movimento – locomoção e quantidade, sem tempo nem qualidade – e sem qualquer propensão social ou cultural à exceção do egocentrismo, do tipo definido por Mandeville, como fundação última da estrutura social, foi apresentado na economia como o elemento análogo para os átomos da física. Durante os últimos cento e cinquenta anos, esta história foi narrada uma e outra vez (LOUÇÃ, 1997).

O conceito de equilíbrio, as leis do movimento e a objectividade científica, são termos importados e adoptados directamente da Física

newtoniana. A esfera económica constituía um microcosmo do espaço celeste; conduzido por uma mão invisível, as forças da oferta e da procura deviam encontrar o seu próprio equilíbrio, enquanto as forças do mercado gravitavam no bom sentido. A adopção do modelo newtoniano deixou à economia uma série de instrumentos analíticos inadequados, no entanto, às realidades complexas da evolução económica.

William Petty aplicou a mecânica de Newton à economia, substituindo os argumentos por números e as relações sociais por agentes, marcando assim a origem distante da econometria. Adam Smith (1723-1790) apresentou claramente a analogia mecânica que é o sustentáculo do positivismo: *os sistemas assemelham-se em muitos aspectos a máquinas (...). Um sistema é uma máquina imaginária inventada para ligar habilmente esses movimentos e efeitos que já são na verdade realizados* (SMITH 1999). Evidentemente a sua principal obra, a “Riqueza das Nações”, não é reduzível a este programa mecanicista visto que é simultaneamente uma descrição histórica e, de facto, um texto tanto descritivo e baseado no método indutivo, quanto explicativo e dedutivo. A origem académica é importante porque o distingue completamente dos outros grandes tratados económicos de então, como os de Turgot ou Cantillon, em que o objectivo central era a actividade económica directa.

De entre a obra de Smith, destaca-se o deslumbramento com os mecanismos de funcionamento do mercado. *Descrevendo o mecanismo harmónico e religioso que sustentava as relações económicas, Smith não vinha apenas juntar-se a Newton e Lavoisier no esforço de desvendar do “relógio do universo”. Para o “Homme d'esprit” do século XVIII, o mercado perdia os aspectos caóticos e transformava-se numa actividade maravilhosamente coordenada, merecedora da atenção de qualquer “gentleman”. O desenvolvimento económico tornava-se numa actividade honrada (...)*

Por outro lado, existem fortes razões científicas para uma análise de particular acuidade na sua obra “A Teoria dos Sentimentos Morais”, numa altura em que a economia registava um ressurgimento liberal, as quais radicam essencialmente na compreensão profunda da obra do génio da liberdade económica, e em especial, da noção de “mão invisível”, um dos mais fecundos e incompreendidos conceitos da história da Economia (CÉSAR das NEVES, 1995).

O ano de 1836 viu surgir a publicação do célebre ensaio de John Stuart Mill (1806-1873) “*On the Definition of Political Economy and on the Method of Investigating Proper to It*”, que estabeleceu a sua reputação como um prestigiado comentador de questões económicas, reputação que aumentou ainda mais com uma obra maior sobre a filosofia da ciência (BLAUG, 1994). A influência de Newton em Mill foi mais consistente. Reflectindo o consenso geral do seu tempo, Mill considerava a astronomia de Newton como o paradigma das ciências sociais, se bem que não pudesse ser completamente traduzido para o domínio humano pela especificidade de perturbações das ciências sociais. Ciente disso, Mill sintetizou a herança positivista clássica de Newton e de Comte através de uma extensa mas confusa combinação de métodos e hipóteses, formando uma nova epistemologia.

David Ricardo (1772-1823) é um dos economistas cuja memória e reputação mais sofreu ao longo da História. Considerado por uns como uma referência quase sagrada, Ricardo foi dos poucos autores que conseguiu criar uma “escola de pensamento” totalmente dedicada ao culto da sua memória e ao desenvolvimento das suas teses, a denominada escola ricardiana, que dominou a Teoria Económica durante quase todo o século XIX, só encontrando paralelo nos fisiocratas, como os marxistas ou os keynesianos. Ricardo foi o primeiro economista clássico a aderir a uma

versão preliminar do Movimento Hipotético Dedutivo, combinando algumas das características centrais do positivismo, já presentes no essencialismo newtoniano com um método dedutivo. O contributo teórico de Ricardo constitui o primeiro sistema completo de análise económica da história, ao conceber uma estrutura intelectual global e integrada. Ricardo carreou para a investigação científica os seus dotes de homem de negócios. Os modelos por ele desenvolvidos são, simultaneamente, exemplos de elegância intelectual e de sentido prático. Para estes desenvolvimentos muito contribuíram as suas tarefas de capitalista activo e as suas funções de membro da Câmara dos Comuns que o colocavam no centro das questões do seu tempo e Ricardo punha o seu poder intelectual ao serviço desses propósitos. A sua extraordinária capacidade analítica e, em particular, o seu poder de abstracção fora do comum, levaram-no a construir modelos mais elaborados e estilizados, os quais tinham como única finalidade a resolução de problemas concretos, fossem eles a resolução de um problema bem preciso como a conduta do Banco de Inglaterra, ou a revogação das leis do milho. As hipóteses simplificadoras que Ricardo, com grande atrevimento e engenho, fazia a cada passo, tinham por detrás um simples desejo de compreender um problema concreto e delinear uma solução clara (CÉSAR das NEVES, 1995).

É sempre difícil saber se Ricardo considerava as previsões do seu sistema como afirmações tendenciais puramente condicionais ou como incondicionais previsões históricas, porque o traço distintivo do seu estilo de escrita é a minimização da distinção entre conclusões abstractas e aplicações concretas. De qualquer modo, não há dúvida de que a mensagem que os seus sucessores tiraram dos seus trabalhos foi a de que a economia é uma ciéncia, por causa não dos seus métodos de observação, mas da certeza dos seus resultados (BLAUG, 1994).

A síntese neoclássica manteria e desenvolveria à exaustão estas características introduzindo ao mesmo tempo uma importante mudança paradigmática quanto à definição da essência constitutiva (o valor do uso e não o valor de troca). O modelo cartesiano está no centro da tradição ortodoxa: o homem económico racional é análogo ao mecanismo estudado pelas ciências positivas, as regras da escolha são análogas aos critérios dedutivos da investigação científica, nesses contextos, os axiomas acerca da eficiência do mercado correspondem ao papel prescritivo da epistemologia, a teoria baseada na auto-avaliação mental é análoga ao carácter cumulativo da ciência positiva. A dominação do padrão cartesiano na economia ortodoxa, que daqui decorre, depende fundamentalmente dos axiomas do equilíbrio e racionalidade – lei de Say: assim que um produto é criado, cria um mercado para outros produtos na dimensão completa do seu próprio valor – e da epistemologia racialista que descreve uma sociedade mecânica e sem vida autónoma (LOUÇÃ, 1997).

Ricardo faleceu em 1823 e a década seguinte assistiu a um vigoroso debate sobre a validade do sistema ricardiano, acompanhado por uma tentativa da parte dos seus principais discípulos, James Mill e John Ramsay McCulloch, para identificar o próprio ricardianismo com a economia. Os períodos de controvérsia intelectual são susceptíveis de engendrar clarificações metodológicas, e assim foi nesta fase crítica da economia clássica inglesa. Tanto Senior como Stuart Mill viram necessidade de formular os princípios que governam os métodos da economia política. A Senior deve-se a primeira exposição da agora familiar distinção entre uma ciência pura e estritamente positiva, e uma arte de observação normativa, ou tornada de consciência, assim como a primeira formulação explícita da ideia de que a economia científica assenta em “*muito poucas afirmações gerais, que são o resultado de observação, ou tornada de consciência, que quase todo o homem assim que o vive, admite como familiares aos seus pensamentos*” e das quais são tiradas conclusões que se revelam verdadeiras apenas na ausência de “*causas perturba-*

doras particulares". Senior reduziu essas muito poucas afirmações a quatro: *i)* todas as pessoas desejam maximizar a sua riqueza com um mínimo de sacrifício; *ii)* a população tende a aumentar mais depressa que os meios de subsistência; *iii)* o trabalho combinado com máquinas é capaz de produzir um produto líquido positivo; e, *iv)* a agricultura está sujeita a rendimentos decrescentes (BLAUG, 1994).

Senior encontrava-se entre os mais originais dos economistas clássicos. Em todo o caso, a discussão de Mill sobre a matéria é mais cuidadosa e penetrante além de ter prestado mais atenção ao problema de verificação das conclusões da teoria pura. No seu ensaio "*On the Definition of Political Economy*", Mill abre com a distinção, de Senior, entre a ciéncia e a arte da economia política, que é a distinção entre uma colecção de verdades materiais e um corpo de regras normativas, e prossegue com a clarificação da economia, mais uma vez à maneira de Senior, como uma "*ciéncia mental*", fundamentalmente preocupada com motivações humanas e modos de conduta na vida económica, o que leva directamente a uma passagem famosa, da qual nasceu o muito difamado conceito de "*homem económico*". Esta definição de Mill contém características que carecem de ser aprofundadas. Mill não diz que se deva considerar o homem como ele é, na pretensão de prever correctamente a forma como ele se comportará nos assuntos económicos. Esta é a teoria do "*homem real*" que Senior manteve sempre, apesar do ensaio de Mill, no qual ele expressa que devem ser isolados certos motivos económicos, nomeadamente os da maximização da riqueza com sujeição aos constrangimentos de um rendimento de subsistência e de um desejo de lazer, ao mesmo tempo que admite a presença de motivos não económicos (tais como o hábito e o costume) até nas esferas da vida que caem sob o alcance normal da economia. Em resumo, trabalha com uma teoria de um "*homem fictício*", enfatizando o facto de a esfera

económica ser apenas uma parte da arena total da conduta humana. Nessa medida, a economia política abstrai duas vezes: uma na conduta que é de facto motivada pelo rendimento monetário e uma outra na conduta que envolve “*impulsos de diferente ordem*”. A teoria malthusiana da população é um desses “*impulsos de diferente ordem*”. É frequentemente esquecido que a pressão demográfica sobre a alimentação, em Malthus, repousa essencialmente naquilo que ele chamou a “*irracional paixão*” do homem pela sua reprodução, que dificilmente se coaduna com a noção do homem como agente eminentemente calculista (BLAUG, 1994). Mas com Malthus, a Economia toma consciência da irredutível realidade dos limites naturais. Em qualquer análise económica, e por muito extraordinário que seja o crescimento ou o ganho de bem-estar, o realismo exige que não se esqueçam as restrições físicas. A herança que a Economia recebeu de Malthus foi, simplesmente a adição à “mão invisível” de Smith, do conceito de escassez que passou a fazer parte do núcleo central da ciência (CÉSAR DAS NEVES, 1995).

Quer na obra de Senior, quer na de Mill, vale a pena salientar que nenhum deles relacionou a discussão do homem económico com o papel dos motivos não pecuniários dos trabalhadores nas escolhas de ocupação, que Adam Smith revelara como um elemento decisivo na determinação dos salários. Quando se contesta que esses motivos não pecuniários envolvem muito mais do que uma “*aversão ao trabalho e desejo de fruição de satisfações caras*”, consistindo na verdade, no desejo de maximizar todas as formas de rendimento psíquico, mesmo que à custa de rendimento monetário, e de minimizar a variação do rendimento incerto, e não apenas no de maximizar o seu valor médio, parece claro que o problema da especificação dos motivos que compelem o homem económico, é um pouco mais complexo do que o que Mill considerou. Dito de outro modo, ainda hoje

não é fácil decidir quais os critérios que devem e não devem entrarem nas funções de utilidade, que se supõe serem minimizadas pelos agentes económicos.

Em ciéncias sociais, tende-se a considerar o indivíduo como uma unidade elementar. Como as partículas em Física, os indivíduos são caracterizados por um certo número de parâmetros: as preferências pessoais dos indivíduos, as técnicas disponíveis e os recursos (ou dotações) de que dispõem inicialmente; estes últimos assemelham-se um pouco ao papel das “condições iniciais” da Física. As preferências são geralmente representadas por uma função matemática, denominada função de utilidade.

As variáveis e as funções definidas podem então ser ligadas? A dificuldade para estabelecer tais relações em economia está no facto de os parâmetros (ou funções) que caracterizam os indivíduos variarem de indivíduo para indivíduo. É aliás esta heterogeneidade que é a origem da permuta, uma das actividades sociais elementares: os especialistas, segundo as suas competências, permутam o que produzem com os que têm necessidade. Assim, em ciéncias sociais, considera-se um sistema, em que as “partículas elementares” são todas diferentes. As características dos indivíduos não são mensuráveis, parafraseando Guerrien (1999) *mesmo os pré-mrios Nobel de Economia ignoram quais são as suas funções de utilidade*. Nestas condições, é impossível deduzir “leis” ou relações precisas entre as variáveis do modelo (por exemplo, preço e quantidades produzidas ou consumidas).

Assim sendo e na impossibilidade de estabelecer leis quantitativas, os micro-economistas procuraram enunciar relações qualitativas formulando hipóteses sobre as preferências dos indivíduos. Foi assim que se

formulou a “*lei da procura*” segundo a qual, para a maior parte dos casos, a procura de um bem diminui quando o preço aumenta. No entanto, mesmo admitindo um mundo perfeito (à maneira dos físicos que raciocinam sobre os “gazes perfeitos” ou um campo sem atritos), os economistas não podem conceber leis deste tipo. Esta impossibilidade provém da complexidade das interacções entre indivíduos: entre um consumidor e um produtor, uma variação de preço é sempre desfavorável a um deles, podendo o efeito final assumir as formas mais diversas.

As páginas de Mill sobre o homem económico são imediatamente seguidas pela caracterização da economia política “*como essencialmente uma ciência abstracta*” que aplica “o método *a priori*”. O método *a priori* é contraposto ao método *a posteriori*, e Mill admite que a primeira designação é um tanto infeliz por ser, por vezes, utilizada para designar um método de filosofar que não é fundado, de modo algum na experiência: entendendo que o método *a posteriori* exige, como base das suas conclusões, não uma mera experiência mas uma experiência específica e por método *a priori*, o raciocínio a partir de uma hipótese pressuposta. A hipótese do homem económico é então fundada numa espécie de experiência, nomeadamente na introspecção e na observação dos nossos semelhantes, mas não é derivada de observações específicas ou de acontecimentos concretos. Uma vez que a hipótese é pressuposta, pode ser destituída de fundamento de facto, e neste sentido, pode ser dito que “*consequentemente as conclusões em economia política, em abstracto, só são verdadeiras se verificadas certas suposições*” (BLAUG, 1994).

Por ciência de economia política entendia Mill um corpo de análises dedutivas, assente em premissas psicológicas pressupostas e abstrai-

do, mesmo a respeito dessas premissas, todos os aspectos não económicos do comportamento humano.

Stuart Mill foi um dos teóricos mais destacados da epistemologia positivista, operando a transição entre as versões clássicas iniciais e o Método Hipotético Dedutivo mais elaborado. Sugerindo o que chamou de “método de análise e de síntese”, Mill descreveu a análise como o processo individual do cientista, inferindo leis gerais a partir desses elementos, sendo síntese a combinação desses elementos e efeitos (LOUÇÃ, 1997).

No seu ensaio *“On the Definition and Method of Political Economy”*, de 1836, Mill expõe: “Quando os princípios da economia política estão para ser aplicados a um caso particular, é necessário tomar em consideração todas as circunstâncias individuais desse caso; não apenas examinando a quais [...] das circunstâncias do caso sob apreço correspondem, mas, igualmente, que outras circunstâncias podem existir nesse caso que, não sendo comuns entre ele e qualquer larga e bem reconhecida classe de casos, não caíram sob o conhecimento da ciéncia. Essas circunstâncias têm sido chamadas “causas perturbadoras”.

Isto constitui a única incerteza da economia política; e não apenas dela, mas de todas as ciéncias morais em geral. Quando são conhecidas causas perturbadoras, a tolerância necessariamente introduzida para lidar com elas não mancha de forma alguma a precisão científica, nem constitui desvio algum do método *a priori*. As causas perturbadoras não são consideradas para se descartarem por mera conjectura. Como a fricção na mecânica, com a qual muitas vezes foram comparadas, podem ter sido primeiro consideradas como uma não concretizável redução, a fazer por palpite, ao resultado obtido a partir dos princípios gerais da ciéncia; mas, com o tempo, muitas delas foram trazidas para dentro do reduto da própria ciéncia abstracta e o seu efeito julgado tão susceptível de estimativa acurada quanto os mais notáveis efeitos que modificam. As causas perturbadoras têm as suas leis, tal como as causas que assim são perturbadas têm as suas;

e, pelas leis das causas perturbadoras, a natureza e o efeito da causa perturbadora podem ser previstas a priori, tal como a operação das leis mais gerais, que se diz serem modificadas ou concorrentes. O efeito das causas especiais deve então ser somado ou subtraído do efeito das causas gerais.

Devido à influência das causas perturbadoras aquele que não tiver estudado outra ciência, que não a economia política, falhará se tentar aplicar a sua ciência à prática.

Por causa da impossibilidade de conduzir experiências controladas nos assuntos humanos, o método misto indutivo-dedutivo a priori é o único meio legítimo de investigação filosófica nas ciências morais. Mas o método especificamente indutivo a posteriori tem o seu lugar próprio, *como um meio não de descobrir a verdade mas de a verificar:*

Nunca nos empenharemos cuidadosamente de mais, portanto, na verificação da nossa teoria, através da comparação, nos casos particulares a que temos acesso, dos resultados que nos levaria a previsão, com os mais fiáveis que podemos obter daqueles que foram realmente obtidos. A discrepância entre os factos reais aparece frequentemente como a única circunstância que chamaria a nossa atenção para alguma causa perturbadora. Frequentemente revela-nos que a própria base do nosso argumento é insuficiente; que os dados a partir dos quais raciocinámos compreendem apenas uma parte, e nem sempre a mais importante, das circunstâncias pelas quais o resultado é determinado” (citado em Blaug, 1994).

Mill evidencia uma extrema preocupação de “verificacionismo”, embora não admita equiparar a falha na verificação de uma tese, com a refutação da teoria que a sustenta: uma discrepancia entre a antecipação e o facto real denota, não que a formulação original esteja errada, mas apenas que é insuficiente. Este aspecto conduziu-o à seguinte formulação das *leis tendenciais*:

“Sem dúvida, afirma-se frequentemente de uma classe inteira aquilo que só é verdadeiro para uma sua parte, mas o erro não consiste em fazer uma assertão demasiado lata, mas em fazer o tipo errado de assertão; afirma-se um resultado real quando devia ter-se afirmado apenas uma tendência para esse resultado – um poder agindo com uma certa intensidade nessa direcção.

No que respeita às excepções: em qualquer ciéncia razoavelmente adiantada não há propriamente excepções. O que se pensa ser uma excepção a um princípio é sempre um e outro distinto princípio a sobrepor-se ao primeiro: uma ou outra força que choça com a primeira e que a desvia da sua direcção. Não existe uma lei e uma excepção a essa lei – a lei agindo em noventa e nove casos, a excepção num. Há duas leis, ambas agindo possivelmente em todos os 100 casos e provocando um efeito comum pela sua actuação conjunta. Se a força que, sendo a menos conspícuia das duas é chamada a força perturbadora prevalece suficientemente sobre a outra força num qualquer caso, para constituir esse caso que se chama excepção, a mesma força perturbadora age provavelmente como uma causa modificadora em muitos outros casos que ninguém chama excepções” (citado em Blaug, 1994).

As leis tendências encontram-se já em Ricardo e em Malthus. Na verdade, quase todas as proposições teóricas, quer nas ciéncias naturais, quer nas ciéncias sociais, são de facto leis tendenciais. Embora exista um mundo de diferença entre a maior parte dos enunciados tendenciais em Física e em Química, e virtualmente, todas as proposições desse género em economia e sociologia. Por exemplo, a lei quantitativa de Galileu sobre a queda dos corpos envolve seguramente uma cláusula *ceteris paribus*, porque a queda de qualquer corpo envolve a resisténcia do ar no qual o corpo está a cair. Galileu empregou a idealização do “vácuo perfeito” para se livrar dos efeitos que denominou de “acidentes”, mas forneceu estimativas da magnitude do montante de distorção que resulta de factores como a fricção que a lei abstracta ignorava. Mill estava perfeitamente a par desta ca-

racterística da cláusula *ceteris paribus* na mecânica clássica: “*Como a fricção na mecânica [...] As causas perturbadoras têm as suas leis, tal como as causas que por elas são perturbadas têm as suas*” (citado em Blaug, 1994). Nas ciências sociais e em particular na economia é comum encontrar enunciados tendenciais com cláusulas *ceteris paribus* não especificadas, ou especificadas apenas em termos qualitativos e não quantitativos. Em síntese, como aponta Blaug (1994): *a menos que de alguma forma se consiga restringir o significado de uma cláusula ceteris paribus, colocando limites definidos na operação das “causas perturbadoras” ou “compensadoras”, a argumentação falha na produção de uma previsão refutável mesmo em termos da direcção da mudança global, quanto mais nos termos da magnitude dessa mudança*” (BLAUG, 1994).

Mill, juntamente com todos os autores da tradição clássica, apelou fundamentalmente para os pressupostos na avaliação da validade, enquanto os modernos economistas apelam fundamentalmente para as previsões. Embora os autores clássicos não deixassem de se importar com as previsões, mantinham uma postura que, tal como pressupostos verdadeiros originam conclusões verdadeiras, pressupostos muito simplificados como os do homem económico, rendimentos decrescentes, um dado nível tecnológico, oferta de trabalho infinitamente elástica, a um dado nível salarial, entre outros, conduzem necessariamente a previsões muito condicionadas, nunca verificadas no curso dos acontecimentos, ainda que sejam feitos esforços para tomar em consideração as causas perturbadoras relevantes. Estas causas perturbadoras são, de um modo geral, causas perturbadoras menores, de natureza económica, mas também causas substantivas não económicas. Como Mill explicou, em Economia testam-se as aplicações das teorias para determinar se foram consideradas suficientes as causas perturbadoras de natureza económica para explicar os acontecimentos reais, depois de se considerar também as causas não económicas.

A validade das teorias nunca é testada, porque as conclusões são verdadeiras como um aspecto do comportamento humano face a um determinado conjunto de pressupostos, sendo estes também verdadeiros porque se baseiam em factos evidentes da experiência humana.

14.2 As Influências Mecanicistas na Economia

O interesse pelo conteúdo mecanicista da economia e a expulsão do seu conteúdo orgânico remonta ao fim do século passado. Jadis Veblen colocou a questão: “*Porque não é a economia uma ciéncia evolutiva?*”. As respostas são numerosas. Em primeiro lugar, na época em que se forma o pensamento económico, o pensamento evolutivo estava em estado embrionário. Charles Darwin apareceu um século depois de Adam Smith. No domínio das ciéncias biológicas, a investigação assentava na classificação, mais do que nas medições e na análise. Mas sobretudo, os grandes esforços foram feitos nos séculos XVIII e XIX, para adaptar as visões baconiana, cartesiana e newtoniana, à análise económica. Como diz Veblen: se “*a economia deve seguir o modelo ou o padrão de outras ciéncias ... a via está traçada, no que respeita `a direcção geral a seguir*”. É a via da evolução. Mas o caminho não foi tomado. Pelo contrário, os conceitos evolutivos da época pos-marshall encontraram refúgio em outros campos teóricos (JUMA, 1996).

De entre as influências mecanicistas na economia, encontra-se o conceito de vantagem comparada. O conceito de vantagem comparada pressupõe um mundo reversível, no qual os valores de cada produto são reduzidos a unidades quantificáveis, conhecidas à partida, e cujos efeitos podem ser determinados *a priori*. Este modelo reducionista pressupõe uma uniformidade de tecnologias e de modelos de consumo, admitindo unica-

mente variações na dotação de factores, as quais podem, também, ser convertidas em unidades reversíveis e homogéneas e analisadas pelas respectivas funções de produção. Este aspecto não condiciona, no entanto, a importância que o trabalho detém na concepção e na difusão das tecnologias produtivas. Importante, não é a escolha estática da técnica, mas a articulação dinâmica das tecnologias no interior de um sistema sócio-económico. Trata-se de um processo de adaptação que implica uma recepção e uma produção de informações e de conhecimentos constantes, o que converte a tecnologia num processo evolutivo, na medida em que desafia toda a análise estática.

A difusão da tecnologia é de novo largamente analisada pelo emprego de modelos agregados. Estes modelos utilizam as curvas lógicas habituais, que não reflectem as inovações surgidas, ignorando todas as tentativas necessárias quando da elaboração de uma tecnologia particular. Na realidade, os modelos de difusão possuem um forte elemento de linearidade e supõem a existência de uma trajectória newtoniana uniforme, que a tecnologia deve seguir. As condições iniciais surgem de uma forma ténue para serem conhecidas, donde se pode compreender o comportamento da tecnologia durante o processo de difusão.

Mesmo tratando-se de uma simplificação da teoria, sabe-se bem o conteúdo mecanicista dos temas centrais. Destes pressupostos deriva toda uma série de teorias relativas à transferência de tecnologias em vias de desenvolvimento. Estas teorias pressupõem que os sistemas tecnológicos são unidades dadas, cujos valores são conhecidos ou redutíveis a certas variáveis, como as proporções factoriais. Há necessidade de conhecer os níveis de rendimento e os coeficientes de trabalho. É então possível determinar o tipo de tecnologia que pode ser adaptada. A dicotomia cartesiana

entre capital e trabalho entravou a tentativa da teoria económica de assumir um papel de primeiro plano no desenvolvimento económico da evolução tecnológica; esta foi tratada como exterior ao processo.

14.3 Os Fundamentos da Complexidade dos Sistemas Económicos

É difícil compreender como as metáforas baseadas em conceitos estáticos e racionalistas podem fundar uma análise de sistemas dinâmicos e complexos. Os paradigmas alternativos apresentam as economias como sistemas complexos adaptativos sujeitos a reorganizações, pela introdução de novos conhecimentos e de novas tecnologias. As alterações económicas são consideradas como um processo de aprendizagem, no final do qual as sociedades se adaptam às condições em evolução constante: uma realidade de incertezas e não de equilíbrio.

Os economistas clássicos reconhecem a dicotomia entre sistemas estáticos e sistemas dinâmicos, sempre que estes fossem influenciados vantajosamente pela dinâmica mecânica mais do que pela evolução orgânica. É neste contexto que se pode compreender a dinâmica de Mill e de Smith. Smith reconhecia a evolução da sociedade através da complexidade e da diferenciação, e a sua apreciação da divisão do trabalho é disto um exemplo. Mas ele distinguia a diferenciação funcional nos sistemas zoológicos e nos sistemas sociais, sublinhando a diferença entre animais e seres humanos no sentido em que estes têm atributos específicos, que permitiam a afirmação da divisão do trabalho: a capacidade de mudar, trocar, pagar em natureza. Podendo fazer-se convergir estas faculdades para uma reserva comum, na qual “*cada um podia adquirir a quem produzisse os utensílios,*

concebidos por quem tinha talento para tal, conforme as necessidades” (SMITH, 1999).

Tanto a obra de Smith, quanto as obras de Ricardo e de Malthus, denotam uma falta de formulação explícita de princípios metodológicos. Este aspecto é particularmente evidente na obra de Smith, porque de facto empregou modos de raciocínio radicalmente diferentes em diferentes partes do seu trabalho. Nos volumes I e II da Riqueza das Nações faz uso liberal do método da comparação estatística, mais tarde associado ao trabalho de Ricardo, enquanto nos volumes III, IV e V e a maior parte de *The Theory of Moral Sentiments* exemplificam os variados métodos da chamada escola histórica escocesa, embora nem Smith nem qualquer outro membro da escola os tenham alguma vez descrito. De qualquer modo, parecem ter consistido, por um lado, na firme crença na teoria dos estádios da história, repousando na interacção entre “modos” ou tipos de produção económica definidos e certos princípios eternos de natureza humana, e por outro lado, no profundo empenho na simplicidade e elegância como supremo critério de explicação adequada tanto nas ciências físicas quanto nas ciências sociais. Adam Smith contribuiu com um ensaio sobre a filosofia da ciência, *The Principles which Lead and Direct Philosophical Enquiries; Illustrated by the History of Astronomy*, publicado postumamente em 1799. Tendo escrito apenas sessenta anos depois dos *Principia*, de Newton, Smith descreveu o método newtoniano como um método em que se estabelece *certos princípios primários ou provados, no início, a partir dos quais se justificam os vários fenômenos, ligando-os a todos na mesma cadeia*. Com efeito, *The Theory of Moral Sentiments* e a *Riqueza das Nações* surgem como tentativas de aplicabilidade do método newtoniano, primeiro à ética e posteriormente à economia (BLAUG, 1994).

Apesar da influéncia acentuadamente newtoniana, que é visível em toda a obra de Smith, e do sublinhar da vantagem de se poderem explicar diferentes fenómenos com um simples princípio familiar, como a gravidade, e a possibilidade de gerar previsões acuradas, Smith recusou-se a descrever a mecânica newtoniana como a “verdade”, contrariamente à atitude geral do seu tempo. *“Smith captou na sua obra uma parte da verdade essencial que fica depois de passar tudo o que é ‘importante’. Ele compreendeu bem a importância crucial do ‘pouco importante!’, daquilo que a realidade, na sua esmagadora maioria, é composta. Desde a sua obra, poucos economistas se ocuparam deste trivial, mas porque isso já estava feito. É esta a verdadeira razão por que, como dizia frequentemente Alfred Marshall, ‘It’s all in Adam Smith’”* (CÉSAR DAS NEVES, 1995).

14.4 As Concepções Evolucionistas

Um dos argumentos mais persuasivos da tese evolucionista deve-se a Veblen. A defesa da tese *do carácter evolucionista da ciéncia* foi directamente inspirada por considerações contra a causalidade mecânica, em particular contra a metáfora física. Veblen criticou a cadeia causa-efeito, que era vista pelos primeiros cientistas naturais e pelos economistas clássicos como a definição padrão de uma lei, de modo a «(...) exercer algum tipo de vigilância coerciva sobre a sequéncia dos acontecimentos» (Veblen, 1898: 378)³⁸. Evidentemente, o mesmo se aplica ao mecanismo biológico, como o que é actualmente defendido pela sociobiologia de Wilson. Assim, as diferenças entre as ciéncias pré-evolucionistas e as evolucionistas são de natureza metodológica e filosófica « (...) uma diferença na base da avaliação dos factos para objectivos científicos» (ib.: 376). O carácter teleológico da ação económica e as suas formas de determinação

³⁸ Excerto do texto de VEBLEN, Thorstein (1898), «Why is Economics not an Evolutionary Science?», Quarterly Journal of Economics, 12, July, pp 379-97, citado por LOUÇÃ, Francisco (1997) em “Turbuléncia na Economia”, pp 109.

recíproca e cumulativa sugerem uma visão genética da ciência, e «Portanto, o ponto de vista evolucionista não deixa margem para a formulação de leis naturais em termos de normalidade definitiva, tanto na economia como em qualquer outro ramo da ciência»(ib.: 392)» (LOUÇÃ, 1997).

Louçã (1997) faz uma síntese das diferenças entre os sistemas biológicos e os sistemas económicos, em que demonstra que a analogia entre os dois sistemas não permite metáforas de substituição ou de comparação. *Essas diferenças são nomeadamente ao nível da informação genética: (i) a existência de um sistema adaptativo dominante na sociedade, por exemplo, com processos de retroacção que não existem na selecção natural; (ii) a muito maior velocidade da transformação das unidades de transmissão de informação na sociedade, em relação à do sistema genético, e assim a evolução histórica é muito mais lenta na biologia do que na sociedade; (iii) o sistema genético é transmitido através de formas sexuais directas, enquanto que a informação na sociedade é transmitida através de formas múltiplas, indirectas e simultâneas; (iv) as linhagens na evolução biológica não se recombinam, enquanto que a recombinação é um acontecimento corrente no desenvolvimento da informação social.* Por outro lado, há várias combinações possíveis que são epistemologicamente relevantes, tais como a indeterminação dos sistemas, que não permite predições gerais significativas: *na biologia como na economia, a previsão de evoluções futuras implica pelo menos a habilidade de prever mutações genéticas tal como a capacidade de antecipar ou de considerar como fixa a evolução do ambiente, de modo a determinar plenamente a trajectória do processo – e ambas as condições são contraditórias entre si e impossíveis de satisfazer, cada uma por si ou as duas em conjunto. Em consequência, metáforas biológicas concretas podem ser usadas ao nível local, quando a similaridade e a causalidade podem ser invocadas como relevantes na metaforização (LOUÇÃ, 1997).*

14.4.1 A Meca dos Economistas

Marshall (1842-1924) é o primeiro economista a tentar introduzir as concepções evolucionistas no pensamento económico dominante. Para Marshall, “*a Meca da Economia é a biologia económica, mais vantajosa que a dinâmica económica*” (MARSHALL, 1997) Para este autor, economia e biologia eram duas disciplinas que se encontravam próximas, porque ambas tratam de matérias cuja natureza interna e constituição, assim como o próprio ambiente externo, variam de modo contínuo. Na economia o objecto de estudo centra-se nos seres humanos forçados a mudar e a progredir para o bem e para o mal (JUMA, 1996).

Se bem que Marshall tenha defendido a utilização de conceitos biológicos, no seu trabalho apenas transparece um conjunto de metáforas nesta óptica. A principal parte dos seus *Principles of Economics* não aborda, com excepção dos capítulos que tratam da organização industrial e da divisão do trabalho, a economia numa perspectiva evolucionista. Nesses capítulos, Marshall centra-se no conceito de sobrevivência do mais forte e nas concepções fisiológicas do comportamento humano. Ele considera as indústrias, de um modo geral, como árvores de uma grande floresta, que engrandecem, lutam para assegurar a água e a luz, perdem a sua vitalidade, envelhecem e morrem, excepção feita às sociedades por ações, que estagnam frequentemente, mas que dificilmente morrem (MARSHALL, 1997)

Os desenvolvimentos teóricos de Marshall denotam uma nítida influência darwiniana. Para Marshall *a evolução económica é progressiva. O seu progresso é por vezes arrastado ou retardado por catástrofes políticas: mas o seu*

avanco jamais é súbito; mesmo no mundo ocidental ou no Japão, ele centra-se no hábito, parcialmente consciente e parcialmente inconsciente. Ainda segundo Marshall, a contribuição dos indivíduos com mutações acumuladas é sempre medíocre: *pode aparecer um inventor, um organizador, um génio financeiro que com um rasgo modifica a estrutura económica de uma nação; contudo, uma análise aprofundada mostrará que a parte da sua influência não é senão transitória e superficial, que ele apenas pôs em marcha um movimento mais amplo, que se preparava há muito tempo* (MARSHALL, 1997).

Marshall imaginou uma forma de equilíbrio no crescimento das empresas: *uma empresa cresce e encontra forças mais importantes, e de seguida pode estagnar e declinar; na volta, encontra um balanceamento ou um equilíbrio de forças da vida e do declínio.* Aparentemente estes equilíbrios apresentam uma forma dinâmica. No entanto, Marshall não abandonou a sua visão do mundo cartesiano e newtoniano, porque os fundamentos da economia deviam deixar *um espaço relativamente importante com as analogias mecânicas* (MARSHALL, 1997).

A estaticidade fragmentária é considerada como uma característica temporária. Ele propôs um método económico no seio do qual são utilizadas as analogias mecânicas dos primeiros estádios da evolução económica para, de seguida deixar lugar às explicações biológicas dos estádios sucessivos. Marshall insistiu bastante sobre a necessidade de utilização de analogias mecânicas e de abstracções matemáticas. A matemática revelava-se de grande utilidade para a economia porque possibilita que se faça luz sobre *uma pequena parte de um grande movimento económico, mais do que representar as complexidades infinitas*. Por consequência, o sujeito teria de ser reduzido a elementos estáveis, que tinham recurso às matemáticas. Como os corpos celestes, as partes alteram-se

enquanto o todo permanece estático; os indivíduos envelhecem enquanto a população permanece estável, as empresas prosperam e vão à falência, enquanto o universo económico permanece imutável, o preço do trigo flutua em cada recolha, mas o valor médio do trigo permanece constante (JUMA, 1996).

Para Marshall, o controlo crescente exercido pelo homem sobre a natureza transforma o carácter e a importância das forças económicas e sociais de maneira newtoniana: *Verifica-se que o nosso sistema solar está em equilíbrio estável; mas a mínima alteração nas circunstâncias poderia tomá-lo instável, a uma breve escala, provocar uma alteração na órbita efectuada por um planeta e fazer precipitar um outro contra o Sol.* Do mesmo modo, a lei da oferta e da procura tem, numa primeira fase, uma aparência newtoniana: *Numa primeira fase da ciéncia económica, concebe-se a oferta e a procura como forças primitivas que se encaixam rigorosamente e tendem para um equilíbrio mecânico; contudo, posteriormente o equilíbrio é pensado não entre as forças mecânicas, mas entre as forças orgânicas, de vida e de morte.* As concepções biológicas de Marshall não tiveram, contudo, desenvolvimento, em grande parte motivado pelo papel preponderante assumido pelo pensamento neoclássico (MARSHALL, 1997).

Se bem que o pensamento económico pós marshalliano tenha sido dominado por concepções mecanicistas, registaram-se desenvolvimentos que tentaram injectar algumas noções de dinâmica. Um destes conceitos é o da concorrênciade mercado. Na economia tradicional, a concorrênci surge ao mesmo nível que os movimentos newtonianos: os recursos “gravitam” em torno de uma utilização óptima e os preços são estabelecidos aos níveis mais baixos possíveis. Nesta perspectiva a concorrênci assegura, no mercado, a ordem e a estabili-

dade exactamente como a força de gravidade dos corpos celestes newtonianos. Esta teoria não toma contudo em conta o comportamento concorrencial das empresas e impõe à economia, a adopção dos conceitos paradoxais de monopólio e de concorrência perfeita: *são duas situações nas quais a possibilidade de um comportamento concorrencial é excluída à partida* (JUMA, 1996).

14.4.2 O sistema económico como um sistema complexo adaptativo

Chamberlin pretendeu orientar a teoria económica através da introdução de conceitos dinâmicos. A sua análise tenta sintetizar os conceitos de monopólio e de concorrência com um método análogo ao utilizado nos processos químicos. A síntese química que exige um movimento contínuo e alterações constantes, desenha uma prospecção evolutiva no seio da qual as características estáticas e as dinâmicas são bem distintas. Do mesmo modo, o papel dominante da diferenciação contínua e a gama de produtos possíveis sugere implicitamente, um conteúdo evolutivo (JUMA, 1996).

A variação do produto detém, no modelo de Chamberlin, um papel essencial. Não é, contudo, explícito se a tecnologia deve ser considerada como uma constante, ou o contrário. No entanto, e dado que a tónica é colocada na variação do produto, parece admissível supor que a inovação deve jogar um papel decisivo neste processo. Com efeito, Chamberlin admitiu que um empresário tem necessidade de inovar para romper a ordem das coisas instituídas. “*O aparecimento no mercado de um novo produto exerce uma certa pressão sobre o mercado dos outros*

produtos, e quando os produtos são variáveis, e determinados pela maximização do lucro, uma parte desta pressão deve necessariamente ser exercida sobre a qualidade, de modo a manter os preços apetecíveis ao consumidor. Num mundo onde a tecnologia cria continuamente novos produtos, não é de estranhar a descoberta de que uma parte do processo global consista na deterioração de uns produtos a favor de novos produtos, ao nível do mercado de massas, no qual se concentra grande parte da população”(excerto de E.H. Chamberlin, *Monopolistic Competition*, citado em Juma, 1996). A evolução continua num processo de desenvolvimento, enquanto as empresas procuram adaptar-se às novas condições da concorrência.

Apesar do carácter dinâmico do modelo de Chamberlin, a sua teoria não é explicitamente evolutiva. De modo claro, o evolucionismo é expresso na teoria desenvolvida por Armen Alchian, que propôs a substituição do conceito de maximização dos lucros pelo conceito biológico de selecção natural. Esta perspectiva aplica os princípios de evolução biológica e de selecção natural, interpretando o sistema económico como um mecanismo adaptativo, que faz as suas opções de entre as acções de exploração resultantes da investigação adaptativa, da renovação ou do lucro. “*A competição representa um processo darwiniano que produz exactamente os mesmos resultados que se verificariam se todos os consumidores maximizassem a sua utilidade e todas as empresas maximizassem os seus lucros, em resultado do que o modelo neoclássico prevê correctamente, ainda que os seus pressupostos sejam atessos aos factos*” (BLAUG, 1994). O comportamento concorrencial entre empresas não é determinada pela maximização dos lucros, mas por um comportamento adaptativo, imitativo, de tentativas sucessivas de investigação do lucro.

A renovação é influenciada e consolidada pela renovação precedente, não pela motivação. O facto de as empresas que fomentam a sua própria renovação continuarem no mercado, deve ser considerado por um lado, como o resultado do seu próprio comportamento tendente à maximização dos direitos e, por outro, pela eliminação do mercado, de outras unidades concorrentes. Esta situação pode ser vista como nitidamente darwiniana: aqueles que realizam proveitos positivos sobrevivem, enquanto que, aqueles que aumentam as perdas, estão condenados a desaparecer. Alchian tinha bem presente uma descrição detalhada do comportamento das empresas no seio da concorrência, mas não conseguiu, no entanto, explicar de maneira convincente o papel detido pela evolução tecnológica na selecção económica natural. Este problema de raciocínio deriva da ênfase colocada sobre o comportamento imitativo, ao qual é atribuído o primeiro papel da inovação. “Os comportamentos de adaptação por imitação e as grandes inovações engrandecem o modelo. Os imitadores imperfeitos trazem oportunidades de mudança e o critério de sobrevivência da economia determina os imitadores que terão sucesso e que são provavelmente os imperfeitos”. Os pioneiros da inovação respondem às variações das condições de mercado. “A inovação é também o fruto de acções conscientes e intencionais, qualquer que possa ser a motivação última, desde que as intervenções radicais sejam motivadas pela esperança de obter uma maior renovação ou pelo desejo de evitar uma catástrofe eminente”. Esta perspectiva ignora as condições nas quais a inovação se torna um instrumento de concorrência dos mais fortes, porque determina as restrições que impõem uma alteração constante.

Como nas problemáticas neoclássicas, Alchian trata a mudança técnica como um factor exógeno por relação com a evolução econó-

mica, introduzida no sistema unicamente na base de uma adaptação ao mercado em evolução, mas não contribuindo necessariamente para alterar estas condições. Alchian não entende reformular toda a teoria económica numa perspectiva evolutiva; ele limita-se a analisar o comportamento das empresas e, nomeadamente, a não pertinência do conceito de maximização do lucro.

Segundo Blaug (1980), não há nenhuma hipótese tão estranha que não seja confirmada por provas que se acumulam à sua volta. Além de que a idade de uma hipótese defendida e a ausência de uma rival largamente aceite não fornecem “forte testemunho indirecto do seu valor”, conforme as próprias palavras de Friedman; toda a tese falaciosa que alguma vez foi sustentada, foi defendida com esses fundamentos. Permanece o que Blaug designou como a tese de Alchian, ou seja, a noção de que os pressupostos motivacionais em microeconomia podem ser construídos como enunciados “como se”. Isto pode ser visto como uma versão rasteira da tese da irrelevância dos pressupostos – não tem sentido debater o realismo de pressupostos “como se” porque esses pressupostos, por definição não são verdadeiros nem falsos –, ou lucros que de facto mudam o “locus” da ação racional do plano individual para o plano colectivo. Friedman apoia-se fortemente na tese de Alchian para repudiar de facto o individualismo metodológico que comumente se julga estar envolvido na abordagem neoclássica das questões económicas: em vez de derivar previsões testáveis em larga escala a partir da ação racional dos agentes individuais em pequena escala, as previsões microeconómicas são antes derivadas de uma nova espécie de mecanismo causal, a saber, um processo dinâmico de selecção que reconhece os homens de negócios que, por qualquer razão, agem como se fossem maximizadores racionais, enquanto penaliza com a falência, aqueles que agem de outro modo (BLAUG, 1994).

A referência a um processo dinâmico de selecção mostra imediatamente o que está errado no apelo à tese de Alchian: a microeconomia tradicional é largamente, se não inteiramente, uma análise estática, comparativa, intemporal e, como tal, é forte em resultados de equilíbrio, mas fraca nos processos pelos quais o equilíbrio é atingido. “*Deixe-se que a aparente determinante do comportamento empresarial seja qualquer coisa – reacção habitual, escolha aleatória, ou seja o que for*” diz Friedman; “*Sempre que esta determinante conduzir a um comportamento coerente com a racional e informada maximização de lucros, o negócio prosperá e adquirirá recursos com os quais se pode expandir; e, onde o não fizer, o negócio tenderá a perder recursos*”. Mas o processo pelo qual algumas empresas prosperam quando o seu comportamento real se aproxima do seu comportamento maximizador leva o seu tempo, e nenhuma razão foi dada para acreditar que estas empresas, tendo prosperado num período, agirão conscientemente no período seguinte; por outras palavras, “a reacção habitual” pode resultar numa qualquer tendência para as firmas lucrativas crescerem em relação àquelas que não são lucrativas, mas o “acaso aleatório” decerto que não (BLAUG, 1994).

Para sustentar a tese de Alchian, precisa-se de ser capaz de prever o comportamento em situação de desequilíbrio, ou seja, é necessário complementar a teoria padrão da empresa com uma teoria, até agora inexistente, da entrada e da saída, relacionada com o aparecimento e desaparecimento de empresas no ambiente económico. Admita-se que existem rendimentos de escala na produção, ou quaisquer outras vantagens de custos. Se uma empresa não maximizadora ganhar uma vantagem inicial sobre uma empresa maximizadora, por hipótese, por entrar na indústria num momento temporal anterior, as vantagens de escala podem permitir que a empresa não maximizadora cresça

mais depressa que a empresa maximizadora e o faça irreversivelmente; em consequéncia, as únicas empresas que se observam são as que não conseguem a maximização de lucros e que, de facto, sustentam indolênciа. Mesmo a mera presença de produtos diferenciados e da publicidade associada numa indústria, pode produzir um resultado semelhante. Deste modo, pode definir-se um conjunto de pressupostos – rendimentos constantes à escala, produtos idênticos, mercados de capitais perfeitos, reinvestimento de todos os lucros, etc. – que sustentam a tese de Alchian, mas tal procedimento só nos trará de volta, completando o círculo, à questão do realismo dos pressupostos. Em síntese, o problema da tese de Alchian é o mesmo que o da percepção do progresso “na sobrevivência dos mais aptos” da teoria darwiniana: para sobreviver é apenas necessário estar melhor adaptado ao ambiente do que os rivais e não se pode estabelecer melhor, pela selecção natural, que as espécies que sobrevivem são perfeitas, do que se pode estabelecer, pela selecção económica, que as empresas sobreviventes são maximizadoras de lucros. O que é verdade para as empresas, é verdade para as técnicas: uma vez que a solução ganhe avanço, toda uma indústria pode ficar submetida a uma técnica sub-óptima.

14.4.3 Institucionalismo e modelação de padrões

Nos escritos dos institucionalistas americanos encontra-se um modo de explicação que não é nem apriorismo, nem convencionalismo, operacionalismo, instrumentalismo, descriptivismo ou falsificacionismo: é o que tem sido designado por “modelação de padrões”, porque procura explicar acontecimentos ou acções através da identificação do seu lugar num padrão de relações que é dito caracterizar o sis-

tema económico no seu todo. Os modeladores de padrões rejeitam todas as formas de “atomismo” e recusam-se a abstrair de qualquer parte para o todo do sistema que é descrito e, se chegam a generalizar, fazem-no desenvolvendo tipologias. As suas explicações dão ênfase à “compreensão” mais do que às “previsões” e consideram que uma explicação contribui para a compreensão se novos dados forem integrados nos padrões afirmados (BLAUG, 1994).

Blaug (1980) considera o exposto anteriormente como uma descrição mais ou menos acurada dos métodos de alguns institucionalistas tais como Thorstein, Veblen, Clarence Ayers e talvez Gunnar Myrdal. Mas é difícil encontrar algo como a modelação de padrões nos escritos de John R. Commons, Wesley Clair Mitchell e John Kenneth Galbraith, que muitos vêem como institucionalistas címeiros. É claro que todos estes autores estão unidos em alguns aspectos: *nenhum deles quer estar associado a conceitos de equilíbrio, comportamento racional, ajustamentos instantâneos e conhecimento perfeito e todos aceitam a ideia de o comportamento de grupo ser influenciado pelo costume e pelo hábito, preferindo ver o sistema económico mais como um organismo biológico do que como uma máquina. Mas isto é muito diferente de dizer que partilham uma metodologia comum, ou seja, um método comum de validar as suas explicações* (BLAUG, 1994).

A economia institucional, ou institucionalismo, formulado por Veblen, Mitchell e Commons, lançou as primeiras bases dos conceitos evolucionistas. O institucionalismo não constitui um conjunto coerente de instrumentos de análise, mas uma amostragem de ideias críticas, tendo em comum a rejeição da economia tradicional, de um ponto de vista teórico e metodológico. Desiludidos pelas abstracções que pareciam absorver completamente a atenção da economia neoclássica, os

institucionalistas desejavam que as outras ciéncias sociais se integrassem no pensamento económico, recusando a causalidade empírica da economia clássica.

Veblen afirmou que a actividade económica evolui seguindo uma sequênciа progressiva, coerente com a estrutura teórica compacta necessária a toda a ciéncia evolutiva. Mas a economia tradicional permanecia agarrada a uma época *que as ciéncias naturais tinham atravessado havia já bastante tempo*. Com os novos instrumentos classificativos de análise económica, Veblen tenta reformular o contexto económico. O material activo no seio do qual evolui o processo económico é o material humano da comunidade industrial. No final, o processo de mudança cumulativa resultante é a sequênciа das mudanças nos métodos de fazer as coisas, é o método com o qual se examina os meios materiais de sobrevivéncia. A indústria e a tecnologia são os motores deste processo. Veblen escreveu no fim do século passado: *Sob a pressão das modernas exigências tecnológicas, os hábitos quotidianos do pensamento humano tendem a conformar-se a esquemas que, nas ciéncias, constituem o método evolutivo; o conhecimento que se coloca a um nível mais elevado ou mais arcaico é estranho, desprovido de senso. As ciéncias sociais e políticas devem seguir a corrente, porque elas já estão prisioneiras*. Veblen situa a sua concepção evolutiva num contexto institucional endógeno: *parece que a economia evolutiva deve configurar-se como a teoria de um processo de crescimento cultural determinado pelo interesse económico, a teoria de uma sequênciа cumulativa de instituições económicas definidas pelos termos do mesmo processo* (JUMA, 1996).

Veblen indica então as novas vias para a análise, mas não as desenvolve. O exame do papel da evolução económica aparece com Schumpeter. A obra deste pensador neoclássico contém as noções de evolução tanto implícitas como explícitas.

14.5. Inovação, ciclos de negócio e capitalismo

14.5.1.Na perspectiva de Schumpeter

Manifestamente influenciado por Walras (1834-1910) e por Marx (1867-1894), Schumpeter (1883-1950), é tão sensível às teorias económicas estáticas como dinâmicas. Restituindo a transição económica no contexto mais vasto da transformação social, Schumpeter adopta um modelo evolutivo no qual o primeiro papel é tido pela evolução tecnológica e pela capacidade das empresas. Pela influência de Walras, ele faz contudo, da noção de equilíbrio, uma regra teórica. “*Se em todos os mercados de produtos e serviços os vendedores e compradores fossem tão numerosos que nenhum deles fosse capaz de influenciar perceptivelmente a formação dos preços pela sua própria ação individual então pode provar-se que haverá uma tendência para um determinado estado do organismo económico, o designado estado de equilíbrio, no qual: (1) todas as empresas expandem a sua produção até ao ponto em que o preço corrente cobre exactamente o custo de produção de uma unidade adicional de produto; (2) todos os recursos, incluindo o trabalho, são plenamente utilizados; e, (3) sendo considerados custos, quer uma competitiva taxa de juro, quer uma competitiva taxa de receitas de administração, todos os lucros acima dos custos desaparecem. Estas proposições não conduzem a que, como muitos economistas do século XIX acreditavam, um capitalismo concorrencial tenda a produzir resultados ideais, mas servem para refutar alguns erros grosseiros como aquele que considera todo o processo económico, não conscientemente planeado por uma instância centralizada, como necessariamente caótico; ou que a ação motivada pelo lucro é só por isso menos eficiente na satisfação dos desejos dos consumidores do que seria uma ação agenciada apenas pelos desejos destes últimos”* (SCHUMPE-TER, 1946).

Schumpeter entende por sistema económico, *um sistema caracterizado pela propriedade privada (iniciativa privada), pela produção dirigida a um mercado e pelo fenómeno de crédito, constituindo este fenómeno a diferença específica que distingue o sistema "capitalista" de outras espécies, históricas ou possíveis.* (SCHUMPETER, 1928). Este conceito de sistema económico contém conceitos decididamente evolutivos, conforme o próprio Schumpeter escreveu: “*A primeira coisa a notar acerca do processo capitalista é o seu carácter evolutivo. O socialismo estacionário seria ainda socialismo, mas o capitalismo estacionário é impossível, é de facto uma contradição nos termos. Porque a figura central no estádio capitalista, o empresário, está preocupado não com a administração das unidades industriais existentes e do seu equipamento, mas com a incessante criação de novas fábricas e equipamentos envolvendo novas tecnologias que revolucionam as estruturas industriais existentes. Esta é a fonte de lucros, na medida em que excedam os juros sobre o capital próprio e a remuneração do trabalho de gerência e de comercialização, exactamente como é a fonte das fortunas capitalistas privadas*” (SCHUMPETER, 1946).

Para Schumpeter, o impulso fundamental que põe em marcha o sistema evolutivo do capitalismo e mantém em movimento o motor capitalista, reside nos novos bens de consumo, nos novos métodos de produção e de transporte, nos novos mercados e nas novas formas de organização industrial, criadas pela própria empresa capitalista. A inovação ilustra o processo de transformação industrial que altera permanentemente a estrutura económica interior, destruindo a antiga, para criar uma nova. Este processo de destruição criativa constitui o dado essencial do capitalismo (JUMA, 1996).

Na primeira fase das suas investigações, Schumpeter analisa fundamentalmente a dinâmica que provoca o processo de evolução. Nesta fase, identifica-se a influência exercida por Marx nas referências ao mecanismo ou à organização do processo económico, na sua tentativa de conciliação dos dois conceitos. Schumpeter seguiu as sugestões de Marx, dissipando a generalização prematura tirada do “*postulado darwiniano segundo o qual uma nação, uma civilização, ou mesmo toda a humanidade, deveria apresentar um desenvolvimento uniforme e monolítico*”. De igual modo, rejeita a visão newtoniana da sociedade, ao declarar que “*as transformações históricas não constituem nem um processo circular nem um movimento pendular em torno de um centro*” (SCHUMPETER, 1983).

O evolucionismo defendido por Schumpeter baseava-se em torno de dois conceitos centrais:

1. A economia era definida como um “todo orgânico”, movido por um processo de desenvolvimento com mutações. “*Em primeiro lugar, assinalamos a ideia de que a sociedade, sendo um sistema “orgânico” e não um sistema “mecânico”, pode ser produtivamente analisada em termos de uma analogia com organismos biológicos, tais como o corpo humano (...) mas a óbvia puerilidade desta ideia não nos deve cegar quanto ao facto de que a insistência na “natureza orgânica” do processo económico pode não ser mais do que o meio de apresentação de um sólido princípio metodológico como acontecia, por exemplo com Marshall. Teóricos – especialmente do tipo “planificador” – frequentemente caem na prática deplorável de derivarem resultados “práticos” de umas poucas relações funcionais entre algumas poucas variáveis agregadas em total desrespeito pelo facto de que tais estruturas analíticas são congenitamente incapazes de considerarem questões mais profundas ou relações mais sutis que não podem ser pesadas nem medidas (...)* As considerações “orgânicas” são

talvez o antídoto mais óbvio – se bem que por si só pouco adequadas – contra tal procedimento incivilizado”

2. Uma visão histórica e não-mecanicista do capitalismo como um conjunto de processos articulados de destruição e criação.
“Os fenómenos sociais constituem um processo único em tempo histórico e a sua característica mais óbvia é a mudança irreversível e incessante. Se por Evolucionismo queremos dizer não mais do que o reconhecimento deste facto, então todo o raciocínio sobre fenómenos sociais deve ser evolucionista em si mesmo ou tratar da evolução. Aqui, no entanto ,evolucionismo significa mais do que isso. Pode reconhecer-se o facto sem que isso se torne o pivot do nosso pensamento e o princípio que guia o nosso método. (...) Os vários sistemas [de James Mill] não eram evolucionistas no sentido em que o seu pensamento se dirigisse à questão da evolução. E é esse que deve ser para nós o critério que define o evolucionismo, tanto em relação à filosofia (...) quanto em relação a qualquer “terreno científico””.(SCHUMPETER e SCHUMPETER, 1996)

Uma diferença entre Marx e Schumpeter carece ser aprofundada. Na sua análise Marx, parte das flutuações sócio-económicas e avança a hipótese que a sociedade tenderia para o equilíbrio com o desaparecimento das classes sociais e o enfraquecimento das instituições, como o Estado. Cai assim, de novo, na tradição cartesiana e newtoniana. Schumpeter, pelo contrário, centra a sua análise sobre a hipótese de um estado de equilíbrio, interessando-se pela forma como este equilíbrio é destabilizado. Marx mostra-se mais interessado na destruição do capitalismo, enquanto Schumpeter concentra a sua atenção sobre as fontes e os efeitos da instabilidade no sistema económico.

Para Marx, o socialismo devia surgir do desmoronamento do capitalismo, enquanto para Schumpeter, devia resultar do êxito do capitalismo. Paradoxalmente, uma posição marxista conduz a consequências contra-revolucionárias, quando as fontes de variabilidade, a concorrência e a selecção, são eliminadas. Trata-se de uma impossibilidade lógica, se for aceite o postulado de que os sistemas sociais estão em mutação constante. No esquema schumpeteriano, contudo, a situação tende a voltar a um estado de quase-equilíbrio, com a diminuição das oportunidades de investimento e o fim do papel industrial. A teoria do desenvolvimento económico de Schumpeter coloca o acento nas forças endógenas que provocam a evolução económica. De modo a verificar-se o desenvolvimento económico, uma sociedade tem de fazer bastante mais do que, simplesmente, adaptar-se às alterações das condições de mercado. No sistema schumpeteriano, o desenvolvimento entende-se no sentido de “*alterações da vida económica que não são impostas do exterior, mas que surgem da iniciativa própria, no interior, do sistema*”. A transição é tanto cumulativa como pré-condicional: “*cada processo concreto de desenvolvimento funda-se, em último caso, nos desenvolvimentos anteriores. Todos os processos de desenvolvimento criam os seus próprios pressupostos para a etapa seguinte*” (JUMA, 1996).

A sua teoria evolutiva do desenvolvimento transcende o conceito de fluxo económico e a tendência para o equilíbrio geral. As alterações no fluxo circular e a ruptura do equilíbrio manifestam-se na esfera da indústria e do comércio (isto é do lado da oferta) e não na zona das “necessidades dos consumidores de produtos finais” (do lado da procura). “*É lógico, finalmente, que os factores externos e os factores de crescimento não esgotam a lista de influências que produzem e dão forma à mudança económica. Obviamente que a face da Terra seria muito diferente se as pessoas,*

para além de terem a sua vida económica alterada por acontecimentos naturais e elas próprias mudando-a através de ações extra-económicas, não tivessem feito outra coisa senão multiplicar e poupar. Se ela é como é, isso deve-se obviamente aos incessantes esforços das pessoas para melhorar, de acordo com os seus pontos de vista relativamente a métodos produtivos e comerciais, isto é, às mudanças nas técnicas de produção, conquista de novos mercados, introdução de novos bens, etc.. A esta mudança histórica e irreversível na maneira de fazer as coisas chamamos "inovação" e definimos: inovações são alterações nas funções de produção que não podem ser decompostas em passos infinitesimais. Por muitas carroagens que se juntem, nem por isso se consegue fazer um caminho-de-ferro" (SCHUMPETER, 1935).

De seguida, Schumpeter coloca a ênfase na visão evolutiva das transformações económicas nos “Ciclos de Negócios”: “Por “teoria dos ciclos de negócios” pode entender-se, em primeiro lugar, uma análise de um qualquer particular ciclo que a história registe, fazendo surgir de uma análise similar de muitos ou de todos os ciclos registados uma história racional do fenómeno. Em segundo lugar, também pode entender-se por aquela expressão, uma teoria geral, tão exaustiva quanto possível, de todos os elementos que contribuem ou parecem contribuir para os fenómenos que observamos e a sua interacção. Em terceiro lugar, pode ainda entender-se qualquer coisa muito diferente, por exemplo, uma teoria do que concebemos ser a sua causa fundamental” (SCHUMPETER, 1927). Para Schumpeter, a ciéncia económica é devedora da visão fisiológica e zoológica – e não da mecânica –, para uma análise racional dos factos, definindo a evolução económica como as alterações do processo económico causadas pela inovação, conjuntamente com os seus efeitos e as respostas provocadas no sistema económico (SCHUMPETER, 1989)

Na sua análise, Schumpeter aplica a mesma técnica utilizada por Marshall, segundo a qual as abstracções estáticas constituem a

norma teórica. Para sustentar esta tese, dissocie-se “o fenómeno global do crescimento industrial, em geral, na expansão das indústrias particulares que o constituem. Se fizermos isto para o período do capitalismo predominante concorrencial, encontramos, num dado momento, um conjunto de casos nos quais tanto a indústria em geral como as empresas individuais se constituem em resposta à procura proveniente do exterior, expandindo-se assim automaticamente; mas esta procura adicional advém praticamente sempre, como fenómeno secundário, de uma prévia mudança em algumas outras indústrias – primeiro nas têxteis, mais tarde nas metalúrgicas e nas máquinas a vapor e, ainda mais tarde, na produção de energia eléctrica e na indústria química –, mudança que não segue, mas cria expansão.

Em primeiro lugar – e por sua própria iniciativa –, expandem a sua própria produção, criando, por conseguinte, uma expansão da procura a partir de si mesmas e induzindo a partir daí, outros produtos e a expansão geral do ambiente envolvente que observamos – aumento da população incluído –, instâncias emergentes do processo, tais como o aparecimento do caminho de ferro. A forma pela qual cada uma destas transformações se concretiza conduz facilmente a uma afirmação geral: é por intermédio de novas combinações de factores de produção preexistentes, incorporados em novas fábricas e tipicamente em novas empresas, produzindo novos bens ou utilizando, novos métodos, isto é, métodos ainda não experimentados, ou dirigindo-se a um novo mercado, ou adquirindo factores de produção num novo mercado. Aquilo a que chamamos em termos não científicos, progresso económico, significa essencialmente aplicar recursos produtivos a usos até então, na prática, não experimentados, desviando-os de usos a que nunca tinham sido destinados. Isto é, aquilo a que chamamos “inovação”” (SCHUMPETER, 1928).

Este processo é essencialmente descontínuo escapando às descrições feitas em termos de teoria do equilíbrio. Com efeito, verifica-se a existência de um “elemento no processo capitalista incorporado no tipo de função empresarial, a qual destruiria, pela sua própria actuação e dentro do processo –

na auséncia de impulsos ou perturbações e mesmo na auséncia de "crescimento" – qualquer equilíbrio que pudesse ter-se estabelecido ou estado em vias de estar estabelecido: vemos que a acção deste elemento não é reduzível à descrição por via de passos infinitesimais e que ele produz as "ondas" cíclicas que são essencialmente a forma que o progresso "toma" num capitalismo concorrencial e que poderiam ser descobertas pela teoria se as não conhecessemos através da experiência. Mas através da actuação de um mecanismo e explicando os aspectos relativos aos períodos de depressão, surge ou tende a surgir sempre um novo equilíbrio, que absorve o resultado da inovação obtida no anterior período de prosperidade. Os novos elementos encontram as suas relações de equilíbrio, os rendimentos são reorganizados e a inflação devida à prosperidade é corrigida por uma automática deflação através da amortização de créditos a partir dos lucros, através de novos bens de consumo que ingressam nos mercados e através da realização de poupanças em vez da "criação" de créditos. Deste modo, as instabilidades que surgem do processo de inovação tendem a corrigir-se a si próprias e não continuam a acumular-se (...) não há apesar do sistema nenhuma instabilidade económica da ordem" (SCHUMPETER, 1928).

A instabilidade provocada, fruto da inovação, assume aspectos consideravelmente diferentes consoante se trate de um capitalismo concorrencial ou de um capitalismo de trusts. "A inovação no capitalismo concorrencial está tipicamente incorporada na criação de novas empresas, que é de facto o principal agente propulsor de famílias industriais; o desenvolvimento é forçado em todo o ramo pelo processo de baixa de preços e do desvio dos meios de produção, incluindo mão de obra, que são canalizados para novas empresas; tudo isto não só significa uma enorme quantidade de perturbação, mas também tem como resultado uma efectiva transformação das economias "internas" em economias "externas", apenas enquanto perturbação. (SCUMPETER, 1928).

Situação completamente distinta passa-se a nível de um capitalismo de *trusts*. A inovação acontece dentro das próprias unidades já existentes, defrontando-se com muito menos obstáculos e tendendo a ser uma resultante dos objectivos estratégicos delineados para um dado horizonte temporal.

A inovação, a força central do sistema schumpeteriano, é definida, então, como a criação de uma nova função de produção. A inovação por sua vez é responsável pela impressão que se tem de que o custo decrescente destroi o que já existe, o que provoca desequilíbrios, uma concorrência acirrada e a intrusão no sistema de novas funções de produção que, sem cessar, deslocam as curvas de custo existentes. O desequilíbrio produzido pela alteração tecnológica exige das empresas uma adaptação, ainda mais difícil, ao novo contexto. A situação assume um aspecto ecológico: uma perturbação num ecossistema abre novas oportunidades de adaptação e cria o terreno mais adequado ao desenvolvimento de certas espécies, e de certos nichos comerciais. Schumpeter denomina-os por espaços económicos.

Para algumas empresas “velhas”, abrem-se novas oportunidades de expansão: os novos métodos e os novos bens criam um novo espaço económico. Mas para outras, a afirmação de novos métodos significa a morte económica e para outras ainda, a contracção e o acentramento a um papel de segundo plano. Em síntese, as empresas e as indústrias estão condicionadas a submeterem-se a um processo de modernização, racionalização e restruturação, que pode ser difícil e doloroso. Schumpeter acrescenta: “É necessário observar que as partes vitais do mecanismo de evolução económica, que se vêm frequentemente dominar as situações comerciais, e proporcionarem resultados de importância fundamental, não po-

dem ser colocados em termos estatísticos, nem analisados de maneira teórica, senão em termos de produção total" (SCHUMPETER, 1989) A criação de um espaço económico, ou nicho de mercado, tem como consequência que as inovações, pelo custo de introdução que comportam, atraem massas de imitadores, a partir do momento em que se torna possível copiar ou modificar as novas tecnologias. No sistema schumpeteriano, estas oportunidades que se apresentam em grupos, são distribuídas de maneira desigual, porque as inovações não são acontecimentos isolados, nem se repartem de maneira uniforme no tempo. Pelo contrário, têm tendência a reagruparem-se, a manifestarem-se em conjunto e a concentrarem-se em certos sectores ou ambientes imediatos.

As transformações que resultam destes desequilíbrios não são uniformes, resultam de saltos e de sobressaltos, sendo no entanto possível reconhecer o epicentro: "*Em cada período histórico é fácil identificar o centro de deflagração do processo e associar a certos sectores industriais, e, no interior desses sectores, as empresas, de onde partiram essas perturbações que se propagaram de seguida a todo o sistema*". Schumpeter idealiza uma situação na qual as oportunidades de investimento são dissipadas e a função da empresa torna-se obsoleta, o que conrange a economia a uma prática socialista de quase equilíbrio. Daqui "*derixaria um estado mais ou menos estacionário. O capitalismo, que é essencialmente um processo evolutivo, atrofiar-se-ia. Os empresários não teriam mais nada a fazer, seriam confrontados com uma situação análoga à dos generais de uma sociedade onde a paz permanente está assegurada. Os lucros e as taxas de juro convergiriam para zero. As camadas burguesas dependentes dos lucros e dos juros do capital tenderiam a desaparecer. A gestão da indústria e do comércio assumiriam, inevitavelmente, as características burocráticas*". Esta visão de futuro prolongava-se nas realidades que se desenhavam. "*O progresso tecnológico está sempre mais nas mãos de equipas de especialistas que*

produzem o que é solicitado, e que fazem funcionar a máquina de maneira previsível e fiável. O charme romanesco que iluminava os começos da aventura comercial desapareceu, porque na era actual pode calcular-se com grande precisão muitas das coisas que antes, não podiam ser senão imaginadas num quadro de uma imaginação genial". Por fim, Schumpeter formula a sua última previsão: "Visto que a empresa capitalista, como resultado do seu próprio êxito, tende a automatizar o progresso, tiremos então a conclusão que ela própria tende a tornar a sua função supérflua – a desagregar-se sob a pressão do êxito" (SCHUMPETER, 1996).

Schumpeter concebeu um sistema económico em que a inovação afastaria violentamente o sistema do estado de equilíbrio e o conduziria a um estado estacionário (de quase-equilíbrio). O retorno do sistema económico a um estado de quase equilíbrio, associado a uma organização socialista, sugere que a ruptura de Schumpeter com a tradição neoclássica não era, de facto, verdadeiramente radical. O apelo a sistemas estáveis ou quase estáveis, que caracterizou a tradição intelectual a partir do século XVII, influenciou o pensamento de Schumpeter, do mesmo modo que marcou o pensamento de Marx. A obra de Schumpeter constitui, no entanto, um marco significativo na análise dos sistemas económicos em não-equilíbrio, concretamente através do desenvolvimento de metodologias de análise do desequilíbrio face a alterações tecnológicas (JUMA, 1996).

14.5.2.Na perspectiva de Keynes

John Maynard Keynes modernista e cubista da Economia, era antes de mais um genial homem do seu tempo. A maioria dos que

o interpretaram viram muitas coisas na pessoa e na obra de Keynes, mas estas eram simplesmente Jonh Maynard Keynes.

Ao longo da história do pensamento económico, apenas duas correntes de pensamento viram acrescentar ao nome dos seus mentores o sufixo “ismo”: o marxismo e o keynesianismo. A repercussão imediata do keynesianismo deriva da conjunção de três factores. *“Em primeiro lugar por se tratar de uma personalidade fora do comum, brilhante e provocante até à imodéstia, que não deixou indiferente nenhum dos seu contemporâneos. Em segundo lugar, de uma conjuntura dramática, marcada pela grande depressão, sublinhando com toda a evidência a incapacidade da teoria clássica dominante para explicar os acontecimentos e, por consequência, a impotência das políticas económicas para os dominar. Finalmente, e acima de tudo, uma obra densa, profundamente inovadora, particularmente nos conceitos e no vocabulário propostos, na maior parte dos casos obscuros, o que abrindo caminho à exegese, constituía já uma garantia de sucesso”* (DEFAULT, 1988).

“Keynes tinha um espírito pragmático não tratava abstrações, mas problemas reais, tais como os via e percebia. Nada estava mais longínquo do seu espírito do que a especulação abstracta das leis gerais. A sua teoria partia de uma visão directa e pessoal do mundo. E essa era a visão mais terrível que atingia o homem ocidental desde o fim das invasões bárbaras. Era a visão do mundo em derrocada da primeira metade do século XX” (CÉSAR DAS NEVES, 1995).

Nas páginas de abertura do “*Economic Consequences*” encontra-se um retrato lúcido, expressivo, inteligente e dramático da situação inglesa dos inícios do século XX e uma compreensão incisiva e

profunda dos verdadeiros mecanismos que então operavam. O elemento mais surpreendente deste livro é a sua data, 1919, anterior à explosão das principais consequências que intuiu. O mundo vivia um dos momentos mais dramáticos, que haveria de deflagrar na maior depressão produtiva e na pior guerra da história.

Este novo mundo parecia implicar a necessidade de reformulação de toda a ciência económica. Tratava-se de uma tarefa capaz de fazer hesitar o mais afoito. Mas para o espírito rebelde, empreendedor e modernista de Keynes, isto parecia um esforço natural, se tinha apreendido a complexa situação mundial, ele havia de conceber uma nova abordagem para a compreender. A oportunidade surgiu com o desprestígio generalizado que a ciência económica granjeou durante a “grande depressão” de inícios da década de 30. Nunca até então se tinha vivido um problema económico mais profundo e preocupante. Os economistas pareciam perdidos e o mundo perdeu a confiança nesses autores aparentemente inúteis.

“Sabe-se hoje que a incapacidade de explicar o que estava a acontecer tem razões aceitáveis. A “grande depressão” foi simplesmente, uma quebra no funcionamento do sistema económico, por destruição da confiança no sector financeiro. E se o sistema de trocas entra em colapso, é normal que a teoria que estuda e analisa esse sistema não consiga explicar esse colapso. A Economia comprehende e explica o mecanismo económico. E, exactamente por isso, tem dificuldades em compreender o seu inverso, o caos económico” (CÉSAR DAS NEVES, 1995).

Toda a abordagem da economia, feita por Keynes, baseia-se em sólidos princípios e argumentos filosóficos. No seu *Tratado sobre a Probabilidade* analisa detalhadamente duas das mais importantes categorias filosóficas: a indução, ou a lógica de acumulação de conhecimento e a lógica de construção de conhecimento. “O conceito de Keynes da construção do conhecimento assenta em duas noções correlativas: a indução não-demonstrativa e não-conclusiva, e a analogia que permite um crescimento significativo do conhecimento a partir da indução. Evidentemente, a analogia é um instrumento para um raciocínio qualitativo, que é a forma de pensamento apropriada para a maioria das instâncias do mundo orgânico.

Dois exemplos destas características qualitativas e orgânicas são a definição da probabilidade e das expectativas. A probabilidade é para Keynes uma “unidade orgânica”, recusando assim que pudesse ser reduzida a uma unidade física ou a uma frequência empírica [...] Keynes abandonou o conceito fisicista de necessidade para estabelecer o conceito de probabilidade típico das “ciéncias morais”. Proposições sobre causalidade são portanto consideradas como sínteses cognitivas de indução e de analogia, derivadas de análises cumulativas de processos cumulativos. Indicam um movimento sequencial no tempo: em *General Theory*, a causaçáo sequencial é destacada, de modo a que a última variável que define a causalidade no modelo é a exógena; mas este processo é sequencial porque é orgânico, e assim a causaçáo não pode ser reduzida a alguma evolução unilinear dos impactos a partir das variáveis exógenas sobre as variáveis endógenas, dado que as interacções múltiplas são causalmente significativas e são a própria razão para a não-aditividade das partes para a medida do todo. Dado que existem incerteza e expectativas nas economias reais, a causalidade é tanto endógena como exógena: é orgânica” (LOUÇÃ, 1997).

A visão organicista de Keynes conduziu-o a uma forte desconfiança como a última prova de verdade, tal como foram induzidos e generalizados pela metáfora Física. A sociedade é um todo orgânico, o que implica uma incerteza irredutível, donde um equilíbrio óptimo nunca é alcançado, ou seja, uma solução precisa dos sistemas relevantes não é atingível. O equilíbrio não implica necessariamente o óptimo e podem ocorrer diversos equilíbrios com consequências sociais muito opostas. Keynes concebeu diversos tipos de processos possíveis de desequilíbrio, quer a curto, quer a longo prazo: através de factores monetários (gerando incerteza), através do factor investimento e através de uma última categoria de alterações nos factores industriais que influenciam o volume de produto e da procura de dinheiro para efeitos de rendimento, os quais interactuam com o investimento. Todas estas situações evidenciam inovações e mudanças na estrutura industrial: o *Treatise of Money*, considerada a mais dinâmica obra desenvolvida por Keynes, inclui importantes análises das mutações económicas (LOUÇÃ, 1997).

Dos alicerces da economia keynesiana extrai-se que a sua análise do ciclo, dominada pelas flutuações da eficiência marginal do capital, era a conclusão directa do seu sistema orgânico, gerando por si só incerteza, e relações complexas e não-lineares. A origem desta concepção orgânica encontra-se na filosofia de Moore, apoiada posteriormente pela visão do mundo partilhada pelo grupo de Bloomsbury.

O paradoxo de Keynes é que o seu sistema não é evolucionista, dado que se baseia numa concepção orgânica, mas não inclui nenhum papel central da evolução histórica, apesar de Keynes, ter

indicado alguns dos mais importantes elementos para uma economia evolucionista. Para Keynes, um economista devia ser simultaneamente *matemático, historiador, homem de Estado e filósofo e de um modo muito marxista*, que “*nenhuma parte da natureza ou das instituições humanas devem estar fora do seu alcance*” (LOUÇÃ, 1997).

Keynes trabalhou de uma forma muito diferente dos restantes economistas. Ele começou os seus trabalhos recuando em relação ao tempo, para através dos fundamentos das teorias aceites poder entender onde poderiam estar os erros básicos. Só encontrando estes poderia demolir o que estava errado e reagrupar uma nova teoria coerente.

Em 1936, Keynes publicava finalmente o seu livro e a resposta onde os economistas clássicos tinham sido enganados: *The General Theory of Employment, Interest and Money*. O livro rapidamente ganhou fama por três razões principais. A primeira foi a de ter introduzido um conjunto de novos métodos de análise económica. A segunda, continha um ataque frontal no critério convencional de que as recessões seriam automaticamente corrigidas, porque a oferta real de moeda – capacidade aquisitiva da moeda – faria subir os salários do mesmo modo que diminuiria preço e taxas de juro. A queda dos preços, por outro lado, proporcionaria durante um determinado período de tempo um aumento da riqueza total porque o poder de compra subira. É neste ponto que Keynes acreditava que os economistas clássicos tinham cometido o principal erro. A terceira razão foi a recomendação de uma política prioritária da estabilização do preço em torno do emprego e do rendimento agregado, pela utilização activa do orçamento do estado.

Lars Tvede (1997) sumariza o tema central do livro da seguinte forma:

- Se aumentarem as despesas de investimento e de consumo num país, obtém-se um agregado denominado “rendimento nacional”;
- Se este rendimento é muito baixo para uma determinada população (com uma dada produtividade média) o desemprego acontece;
- O consumo parte do rendimento nacional, o qual é determinado pelo investimento. Se o investimento sobe o consumo sobe também – a questão é apenas quanto;
- Um investimento (nova “unidade adicional”) mantém-se circulando de mão para mão, onde cada destinatário poupa uma fracção e passa o resto, até que a totalidade tenha sido poupada. Este acréscimo no valor de uma unidade adicional investida é denominado para o efeito, de multiplicador, sendo a relação entre investimento e consumo determinada por esse efeito de multiplicador.
- O sistema não está em equilíbrio se as pessoas pouparam mais do que a sociedade investe. Dito de outro modo, uma relação entre rendimento, poupança e investimento pode ou não estar em equilíbrio;
- Assuma-se agora que o investimento caiu abaixo das poupanças feitas pelos particulares. Neste caso o rendimento começará a cair como que arrastado para baixo pelo efeito multiplicador;
- Como o rendimento dos consumidores cai, nesse sentido, eles próprios são incapazes de poupar a fracção que pou-

- pavam antes. Isto significa que as poupanças baixam até ao mais baixo nível de investimento. Por outras palavras, a sociedade cai para um equilíbrio de desemprego;
- Este equilíbrio pode permanecer por muitos anos devido à durabilidade do equipamento de produção existente (capital) e ao efeito cumulativo, quando as empresas tentam o mais baixo nível de bens inventariáveis (TVEDE, 1997).

Segundo a perspectiva dos economistas clássicos, a fundamentação de todo o desenvolvimento teórico proposto por Keynes, está completamente errada. Isto porque, se o investimento cai, então três situações são possíveis de se verificarem. Primeiro, as taxas de juro cairão porque muitas pessoas tentam poupar e muito poucos investem. Baixas taxas de juro encorajam novos investidores e tornam a poupança menos atractiva. Segundo, porque durante as recessões, os salários caem o que torna mais atractivo as novas oportunidades de negócio, que por sua vez, estimularão o investimento. E, finalmente, a queda do preço dos imóveis, dos bens de consumo e de capital significa que a capacidade aquisitiva real da moeda aumenta, o que exerce um poder de persuasão junto das pessoas, para começar a comprar de novo.

A estes argumentos Keynes teria respondido: “*Cometeram-se dois erros. Primeiro, o de pensar a economia como uma máquina mecânica. Não é. A economia, são seres humanos com emoções humanas. Quando a economia decresce as pessoas entram em pânico e extrapolam a tendência. Elas não tentam comprar em baixa porque não têm a chave onde está a baixa. A expectativa de longo prazo é muitas vezes uma ilusão –*

as pessoas são muito mais influenciadas por uma realidade de curto prazo. Quando extrapolam as (máis) condições presentes, pode-se dizer que vêm a “eficiência marginal do capital” decaindo. Desta forma, quando os negócios correm mal as pessoas preferem guardar o seu dinheiro sob a forma de liquidez – “debaixo do colchão”. Esta preferência pela liquidez pressiona a subida das taxas de juro, em tempo de incerteza. O segundo erro é assumir que um corte nos salários iniciará uma nova ascensão. Esquecem-se de que aqueles arruinam gradativamente muita da poupança, que deveria financiar o crescimento em equilíbrio. Se o investimento falha não devemos pressupor que o consumo falhe também” (citado em TVEDE, 1997).

O livro de Keynes “*The General Theory of Employment, Interest, and Money*” (KEYNES, 1997) teve um impacto tremendo e exerceu pressão sob a gestão da Economia de curto prazo em nítido contraste com o conceito de *laissez-faire*. Igualmente importante foi o seu método conjunto de uma forma operacional e verificável. Keynes desenvolveu a sua teoria de tal modo que podia testar muitos dos teoremas e quantificar os parâmetros. “Keynes introduziu três variáveis dependentes das expectativas: propensão ao consumo, eficiência marginal do capital e preferência pela liquidez. Tinha razão em fazê-lo e em sublinhar a incerteza irredutível dos sistemas orgânicos. A razão pelo qual o podia fazer [...] era que filosofia de Keynes sugeria a noção de organicidade e portanto libertava-o da restrição de conceito de equilíbrio, se bem, tal com já se disse, não tivesse sido capaz de incorporar estas noções numa abordagem dinâmica”

Em *General Theory* é dedicada uma secção inteira à crítica dos modelos matemáticos, nomeadamente dos “(...) métodos

simbólicos pseudo-matemáticos de formalizar um sistema de análise económica” levando o investigador a “ (...) perder de vista as complexidades e as interdependências do mundo real numa confusão de símbolos pretensiosos e iníteis” (KEYNES, 1997).

Louçã (1997) resume as reservas e críticas em relação aos métodos econométricos da seguinte forma: “(i) a complexidade da realidade é irredutível ao modelo: a ignorância da dimensão senso comum é perigosa e os modelos matemáticos tendem a esquecer-lo e a concentrar-se em explicações artificiais baseadas num pequeno número de variáveis e alguns dos factores relevantes podem ser ignorados ou mal especificados; (ii) a interdependência do mundo real pode complicar a tentativa de definir o modelo: alguns efeitos são também causas, o que deve ser evitado num modelo mecânico; (iii) o problema da especificação também pode emergir do facto de que algumas influências causais não serem identificáveis, separáveis e mensuráveis e que podemos ser incapazes de discriminar os efeitos de cada variável (por exemplo, devido à multicolinearidade, ou ainda porque o seu comportamento no tempo não é homogéneo, ou ainda porque não é representável num mundo linear); (iv) persiste o problema da incomensurabilidade: Keynes temia que a escolha do modelo dependesse da disponibilidade de dados estatísticos, e que essa forma de manipulação pudesse permitir qualquer “próva” desejável; e finalmente, (v) o método estatístico dificilmente pode considerar as variáveis qualitativas ou as variáveis inobserváveis das (expectativas), e pode conduzir à confusão entre significância estatística e económica.

Em consequência, Keynes suspeitava destes métodos que usavam séries de dados não experimentais e únicos para realizarem testes estatísticos originalmente concebidos para estudos laboratoriais no campo da Física. Em resumo, sempre que estamos no mundo dos sistemas orgânicos com estrutura-

ras que não são homogéneas ao longo do tempo, o método de correlação pode fracassar e, dado que este é o caso das variáveis mais relevantes, não é impossível nenhuma conclusão induzir a partir deste método.

A principal questão era o problema do método de correlação múltipla a séries não homogéneas em tempo real, e consequentemente o erro da especificação: o método e os resultados só são relevantes se o investigador puder indicar todas as possíveis influências sobre a variável endógena, se a teoria for previamente estabelecida, se for correcta e se houver dados suficientes para estabelecer a correlação – um conjunto de requisitos verdadeiramente laplaceano. De outro modo, podem-se obter resultados espúrios, e existe o perigo de que o erro da especificação permita qualquer conclusão que o investigador deseje” (LOUÇÃ, 1997).

Keynes concebeu um feito extraordinário. O resultado era um brilhante modelo de desequilíbrio e irracionalidade, da rigidez de preços e dos *animal spirits*. O modelo desenvolvido por Keynes era o oposto da teoria económica moderna, que se baseia nos postulados da racionalidade e do equilíbrio. Mas aquele modelo conseguia explicar o contrário do sistema económico moderno: o caos económico. Com Keynes, a teoria económica obtinha um modelo de colapso económico típico da “grande depressão”. Se a ciência corrente compreendia e explicava o funcionamento do mecanismo económico, com Keynes ela conseguia explicar o inexplicável, o não funcionamento desse mecanismo. Keynes completava o corpo científico existente, com a compreensão do que lhe escapava (CÉSAR DAS NEVES, 1995).

14.6. Síntese do Capítulo

14. A INFLUÊNCIA NEWTONIANA NO DESENVOLVIMENTO DA CIÉNCIA ECONÓMICA

- 14.1. Os conceitos newtonianos nos fundamentos epistemológicos da Economia
- 14.2. As influências mecanicistas na Economia
- 14.3. Os Fundamentos da Complexidade dos Sistemas Dinâmicos
- 14.4. As Concepções Evolucionistas
 - 14.4.1. A Meca dos Economistas
 - 14.4.2. O Sistema Económico como Sistema Complexo Adaptativo
 - 14.4.3. Institucionalismo e modelação de padrões
- 14.5. Inovação, ciclos de negócio e capitalismo
 - 14.5.1. Na perspectiva de Scumpeter
 - 14.5.2. Na perspectiva de Keynes

De entre as ciéncias sociais, a Economia é uma das mais newtonianas. Esta ciéncia social utiliza variáveis aparentemente fáceis de quantificar, tais como os preços e os produtos produzidos, consumidos e armazenados. Talvez por este motivo a palavra “lei” – como a lei da oferta e da procura – seja comum no léxico económico, mesmo evocando, estas leis, apenas um processo vago.

Na realidade, não existe uma única “lei” sobre a qual recaia um acordo geral, enquanto que as leis da Física são unanimemente aceites (tanto que elas não são infirmadas). Na economia, quando muito, podem isolar-se incógnitas de “tendências” ou de relações entre certas variáveis, que os economistas denominam “fatos estilizados”. Estas tendências não podem, todavia, ser senão aproximativas e, sobretudo, passageiras. Por um lado, porque os comportamentos dos indivíduos, dependem das suas crenças, costumes, tradições e outras regras sociais; e por consequênciia flutuam de acordo com elas. Por outro lado, as sociedades estão submetidas à História: as suas es-

truturas e as relações da própria sociedade evoluem no tempo, em função das crenças, mas também das condições materiais, ligadas às grandes descobertas científicas e técnicas.

Está a Economia, portanto, longe do mundo imutável da Física! Nestas condições os trabalhos de investigação em ciências sociais consistem, essencialmente, em determinar diversas “fases” na história da humanidade e em caracterizar o melhor possível a respectiva época. Dito de outro modo, o investigador em ciências sociais produz as principais “estruturas” da sociedade (divisão em grupos sociais, formas de organização da produção, etc.) e as relações entre certas variáveis.

Os conceitos newtonianos influenciaram durante três séculos o pensamento económico. A adopção do modelo newtoniano deixou à Economia uma série de instrumentos analíticos, tornados inadequados face às realidades complexas resultantes da evolução económica.

William Petty aplicou a mecânica de Newton à Economia, substituindo os argumentos por números e marcando assim a emergência da econometria. Com Adam Smith, os sistemas assemelhavam-se a máquinas e o mercado descrevia um movimento harmónico e religioso que sustentava as relações económicas. Stuart Mill considerava a astronomia de Newton como o paradigma das ciências sociais, embora não pudesse ser transposto na globalidade para o domínio humano pela especificidade das Ciências Sociais. David Ricardo contribuiu com o primeiro sistema económico de análise económica, ao conceber

uma estrutura intelectual, global e integrada. Para Stuart Mill, na Economia testavam-se as aplicações das teorias. Para determinar se foram consideradas suficientes, as causas perturbadoras de natureza económica. A validade das teorias não é testada, porque as conclusões só são verdadeiras face a um determinado conjunto de pressupostos.

De entre as influências mecanicistas na Economia, encontra-se o conceito de vantagem comparada, o qual pressupõe um mundo reversível, em que os valores de cada produto são reduzidos a unidades quantificáveis, conhecidas à partida e cujos efeitos podem ser determinados “à priori”

Estes conceitos começaram a estar comprometidos face às novas perspectivas de olhar a realidade. Com Marshall, introduzem-se as primeiras concepções evolucionistas no pensamento económico. Apesar de fortemente influenciado por Darwin, Marshall não abandonou a sua visão de um mundo cartesiano e newtoniano, porque os fundamentos da Economia, deviam deixar um espaço relativamente importante com as analogias mecânicas.

A seguir a Marshall, outros autores pretenderam orientar a teoria económica através da introdução de conceitos dinâmicos, entre os quais se conta Chamberlin. Veblen, Mitchell e Commons lançaram as primeiras bases dos conceitos evolucionistas. Influenciado por Walras e Marx, Schumpeter mostro-se tão sensível, às teorias estáticas como dinâmicas.

As alterações tecnológicas indicam a natureza dinâmica dos processos económicos, tornando menos pertinentes as metáforas estáticas e reducionistas da Física clássica. Este rompimento com as metáforas físicas acontece com John Maynard Keynes, que sublinhou com toda a evidência a incapacidade da teoria económica clássica para explicar os acontecimentos e a impotência das políticas económicas para os eliminar.

A corrente dominante do pensamento económico deve tomar em consideração as implicações filosóficas e práticas dos conceitos de não-equilíbrio. Os trabalhos de investigação multiplicam-se na tentativa de criar redes no seio das quais se enraízem as noções de desequilíbrio. Este é um alvo difícil de alcançar mas como no mundo de Priogogine, é necessária uma longa transição para passar do ser ao devir.

15. ECONOMIA DA INFORMAÇÃO

“*À medida que o século se encerrava, o mundo diminuía. O público rapidamente ganhava acesso a tecnologias de comunicação notavelmente mais rápidas. Os empresários, capazes de induzir economias de escala sem precedentes, construíam vastos impérios. Faziam-se grandes fortunas. O governo exigia que esses poderosos novos monopolistas fossem responsabilizados dentro da legislação antitruste. Cada novo dia produzia novos avanços tecnológicos, aos quais os novos modelos empresariais pareciam não ser mais aplicados. Mesmo assim, as leis básicas da economia afirmavam-se. Os que dominavam essas leis sobreviviam ao novo ambiente. Os que não as dominavam, fracassavam*” (SHAPIRO e VARIAN, 1999). Foi assim nos finais do século XIX, quando começavam a emergir os grandes gigantes da actualidade. Com as novas redes de telefone e telefonia, essas indústrias transformaram a economia dos Estados Unidos da América, do mesmo modo que as novas tecnologias actuais de informação e comunicação transformam, actualmente, a economia mundial. É claro que o mundo empresarial é hoje completamente diferente de há um século atrás. Mas tal como há cem anos, muitos gestores estão tão preocupados com as sucessivas mudanças tecnológicas que esquecem todo o ambiente externo que os circunda e que continua a conter as forças básicas para o sucesso ou o fracasso dos negócios. Aparentemente, as tecnologias de informação têm avançado de uma maneira caótica, o que torna ainda mais difícil a definição de padrões orientadores da estratégia empresarial a

seguir. No entanto, há ordem no caos e é através dessa percepção que se torna possível definir as políticas orientadoras.

Nos últimos anos, tem-se assistido a uma série de desenvolvimentos teóricos sobre o papel da informação na determinação do valor dos activos financeiros e no próprio funcionamento dos mercados de capitais. Antes destes desenvolvimentos teóricos, o funcionamento dos mercados assentava no pressuposto de que a informação privada era abundante entre os gestores de investimento. O estudo sobre a eficiência dos mercados evidenciou, não só que o acesso à informação tem um custo, mas que não é igualmente distribuído entre os diferentes agentes que compõem o mercado e ainda, que o contínuo crescente de informação avulsa tem acelerado a dificuldade de seleccionar e avaliar a informação que comporte de facto mais-valias no processo de tomada de decisão. Este novo papel atribuído à informação conduziu a alterações profundas no delineamento de estratégias de investimento.

Contudo, o volume cada vez maior de informação associado a uma crescente velocidade de circulação tem proporcionado o desenvolvimento de uma verdadeira *indústria de informação*, a qual tem contribuído para uma redução do nível de custos, mais rápida incorporação e maior transparência dos mercados. O desenvolvimento das novas tecnologias de informação aponta para a correcção de assimetrias de informação, evitando a obtenção prolongada de mais valias no mercado. No entanto, a realidade tem evidenciado que a posse, a utilização e a velocidade de circulação da informação, podem provocar distúrbios no mercado conducentes a rápidas desvalorizações dos activos e consequentes desequilíbrios de mercado. Esta situação coloca de novo o problema do risco e do comportamento do investidor nos processos de tomada de decisão e reforça o papel da informação como factor decisivo no funcionamento dos mercados e nos modelos de decisão de investimento.

15.1. Comunicação entre Potenciais Adversários

Os problemas relativos à comunicação entre partes cujos objectivos estão potencialmente em conflito são fundamentalmente diferentes daqueles que envolvem partes com objectivos comuns. Quem está do lado da oferta, por exemplo, tem tendência a sobrevalorizar as qualidades do produto em questão. Enquanto que, quem se encontra do lado da procura, tenderá a desvalorizar a importância que está disposto a pagar para obtenção desse mesmo produto. Potenciais adversários comunicam entre si informações com valor estratégico. Estas são transmitidas através de sinais que revelam duas propriedades importantes: *(i)* devem ser difíceis de falsificar; e, *(ii)* se certos indivíduos empregam sinais que transmitem informação favorável sobre si próprios, outros são forçados a revelar informação considerada menos favorável. Estes princípios são importantes na medida que ajudam a compreender como os agentes económicos juntam e interpretam a informação.

A primeira das propriedades decorre do *Princípio de Enganar Sai Caro*. Muitos produtos são tão complexos que o comprador não pode inspecionar directamente a sua qualidade. Nesses casos, as empresas que oferecem produtos de alta qualidade necessitam de meios para comunicar com os potenciais compradores. Caso contrário, não conseguirem cobrar preços suficientemente altos para cobrir os custos adicionais. Uma forma de ultrapassar este problema, consiste em a empresa desenvolver uma reputação de fabrico de produtos de alta qualidade a qual não seja dissociável dos objectivos de longo prazo da empresa (FRANK, 1998).

Empresas com elevados custos afundados têm uma motivação de continuidade a prazo. Porque o encerramento da sua actividade significa a

perda do valor de investimentos substanciais que não podem ser liquidados. Assim, os interesses materiais destas empresas levam-nas a fazer tudo o que é possível para permanecerem em actividade. Este aspecto constitui uma segurança para os compradores que podem, deste modo, confiar mais em quem lhes promete um produto de alta qualidade. Se uma empresa praticasse preços correspondentes a produtos de alta qualidade e posteriormente vendesse produtos de baixa qualidade, veria a sua sobrevivência comprometida e os custos afundados teriam sido em vão.

O segundo princípio é o *princípio de revelação total*. Este diz que, se certos indivíduos revelam valores favoráveis de qualquer atributo para poder obter benefícios, os outros são forçados a revelar os atributos, mesmo que estes sejam menos favoráveis (FRANK, 1998). O princípio da revelação total decorre do facto dos potenciais interessados não terem todos acesso às mesmas informações. Existem assimetrias semelhantes que dão origem a sinais importantes trocados entre os agentes económicos.

As assimetrias de informação ajudam a explicar, por exemplo, a razão porque um produto de baixa qualidade pode revelar esse facto através da oferta de garantia com cobertura muito limitada. A assimetria, neste caso, reside no facto de os produtores saberem muito mais acerca da qualidade dos seus produtos do que os consumidores. A empresa que sabe que tem o melhor produto, dispõe de um forte incentivo para fornecer informação aos consumidores. Um meio credível de realizar essa operação é fornecer os produtos acompanhados de uma garantia liberal contra defeitos de fabrico.

Quando o produto aparece no mercado com esta garantia liberal, os consumidores sabem de imediato mais do que anteriormente; não só

sobre a sua qualidade, mas também acerca da qualidade dos produtos seus sucedâneos. De uma forma particular, ficam a saber que os produtos que não disponham de garantia não podem ser de alta qualidade. À falta de qualquer outra informação acerca de um produto sem garantia, um consumidor prudente estimaria a qualidade pelo nível médio de produtos sem garantia. Mas isto significa que os compradores podem subestimar a qualidade dos produtos apenas ligeiramente inferiores aos melhores de todos.

Considere-se então a situação enfrentada por um produtor de segunda categoria. Se insistir em não oferecer uma garantia, os consumidores pensarão que a qualidade do produto é inferior àquela que, na realidade, ele tem. Deste modo, o produtor deverá oferecer uma garantia própria. Mas devido ao facto de o seu produto ser de segunda categoria, a respectiva garantia não pode ser tão liberal quanto a dos melhores produtos. Ao conceder esta garantia o produtor revela informação sobre o produto e ele próprio o hierarquiza numa determinada escala. No entanto, ao hierarquizá-lo coloca-o numa categoria superior ao grupo dos restantes produtos sem garantia, aos quais corresponde um nível de qualidade médio ainda inferior ao anterior.

O processo de queda progressiva está assim em andamento e, no final, todos os produtores terão de oferecer algum tipo de garantia ou então aceitar o facto de os consumidores classificarem os seus produtos como de baixa qualidade.

15.2. Assimetria de Informação

O problema da informação assimétrica foi abordado pela primeira vez por Akerlof, no seu artigo de 1970, *The Market for Lemons: Quality Uncertainty and the Market Mechanism* (VARIAN, 1987). Este teórico aborda o problema da informação assimétrica através do estudo dos desequilíbrios de mercado quando os potenciais compradores não podem verificar a qualidade do produto que lhes é oferecido. Colocados perante o risco de adquirirem um produto de inferior qualidade, os compradores vão oferecer no mercado um preço médio ponderado, inferior ao preço de mercado de um bem de qualidade superior. Este aspecto conduz a uma situação de *selecção adversa*, a qual leva ao afastamento do mercado dos vendedores de produtos de qualidade superior, conduzindo-o a uma nova situação de equilíbrio. O equilíbrio encontrado não corresponde, no entanto, a um equilíbrio óptimo, na medida em que mais informação poderia contribuir para melhorar a situação de alguns participantes no mercado, sem piorar a de outros. A não transparência do mercado, através da insuficiência de informação conduz a situações de *moral hazard*, em que os detentores da informação beneficiam de vantagens comparativas. Perante esta situação e de modo a corrigir estas ineficiências de mercado, os vendedores de produtos de qualidade superior fazem circular nova informação no mercado, a qual funciona como uma sinalização dos produtos a transaccionar e contribui para melhorar as condições de funcionamento do mercado.

De entre os mercados cujo funcionamento é afectado por ausência de informação simétrica com incidência a nível da oferta e da procura, destaca-se o mercado de crédito. As assimetrias de informação neste mercado traduzem-se em menores volumes de crédito e superiores taxas de juro.

O relacionamento entre banco e clientes resulta de uma interacção prolongada, favorável ao desenvolvimento de assimetrias de informação. O banco que concede financiamento a uma empresa, sua cliente, conhece melhor as características dessa empresa do que os bancos concorrentes. Este conhecimento permite-lhes a obtenção de vantagens comparativas que se traduzem num posterior poder de monopólio do banco em relação à empresa sua cliente (SHARPE, 1990). Sendo o acesso à informação oneroso e de difícil avaliação, as vantagens em termos de informação surgem apenas após as relações entre banco e clientes terem sido iniciadas. Novos clientes acarretam encargos com informação mais elevados e a previsão acerca da capacidade de reembolso dos créditos a conceder é cara e de difícil realização. Os volumes de créditos concedidos serão menores e as taxas de juro cobradas mais elevadas do que numa situação de equilíbrio, em condições de informação simétrica (GOODHART, 1989).

O facto de os bancos possuírem vantagens em termos de *informação interna* constitui um incentivo para tirar benefícios desta situação. As informações referentes às empresas suas clientes são confidenciais, uma vez que estas beneficiariam os concorrentes. As empresas ficam assim *informacionalmente cativas* e o banco retira vantagens desta situação, as quais poderão ir, nalguns casos, até à alteração posterior dos termos dos contratos já firmados com os clientes. Por outro lado, colocados perante a hipótese de financiamento de uma nova empresa, o banco negociará taxas de juro mais elevadas e exigirá maiores garantias por parte dos clientes. As altas taxas de juro têm um efeito de *seleção adversa*, porque, para aquele nível de taxa de juro, uma percentagem de clientes será automaticamente rejeitada e serão concedidos menores volumes de crédito.

Diversos bancos optam por apresentar contratos com diferentes combinações de garantias e taxas de juro, o que leva a uma selecção de clientes através da escolha por eles efectuada e a evidenciar o nível de risco envolvido no projecto submetido a apreciação. As garantias prestadas e o nível da taxa de juro negociada, constituem de facto, um poderoso instrumento de correcção de assimetrias no mercado do crédito (GOODHART, 1989).

15.3. Escolha em Contexto de Incerteza

A escolha situa-se entre duas alternativas igualmente arriscadas, ou entre uma alternativa pouco conhecida e outra relativamente familiar. As decisões económicas tomadas em contexto de incerteza são essencialmente jogos (FRANK, 1998).

A teoria económica formal da escolha entre alternativas incertas é da autoria de John Von Neumann e de Oscar Morgenstern. A hipótese central assenta no facto de que dois indivíduos escolhem a alternativa que confere a utilidade esperada mais elevada. A teoria da maximização da utilidade esperada admite uma função utilidade U que atribui uma medida numérica à satisfação associada aos diferentes resultados. A utilidade esperada de um jogo é o valor esperado da utilidade de todos os resultados possíveis.

O ponto fundamental da teoria é o de que os valores esperados dos resultados de um conjunto de alternativas, não necessitam de ter a mesma ordenação que as utilidades esperadas das alternativas. Existem algumas diferenças nestas ordenações porque a utilidade é

muitas vezes uma função não linear da riqueza final. No caso empírico mais comum, considera-se a utilidade como uma função côncava da riqueza total, o que significa que a função de utilidade tem o perfil característico representado na figura n.º 15.1. De um modo mais formal, $U(M)$ é côncava se, para qualquer par de valores M_1 e M_2 , a função se situar acima da recta que une os pontos $[M_1, U(M_1)]$ e $[M_2, U(M_2)]$. A função de utilidade de $U = \sqrt{M}$ é uma função côncava de M . De uma função de utilidade côncava em M , diz-se também que exibe uma rendibilidade marginal decrescente. Sendo a utilidade marginal, o declive da função de utilidade, diminuindo o mesmo à medida que M aumenta. Os indivíduos cujas funções de utilidade são representadas por funções côncavas da riqueza total, são avessos ao risco, o que significa que recusam sempre um jogo cujo valor esperado seja zero: *jogos justos*.

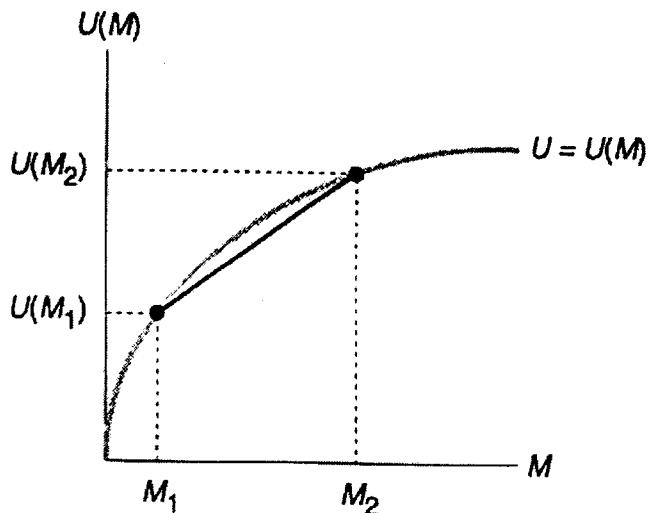


Fig. 15.1.: Função de Utilidade Côncava

Saber se as pessoas são ou não avessas ao risco é uma questão algo empírica. Sabe-se que, pelo menos às vezes, algumas pessoas não são avessas ao risco, do mesmo modo que a maioria das pessoas não é sempre avessa ao risco.

Considere-se uma pessoa com uma riqueza inicial M_0 que entra num jogo em que paga B , com probabilidade $\frac{1}{2}$, e $-B$ com a mesma probabilidade. Se esta pessoa for amante do risco, a sua função de utilidade assumirá uma forma geométrica semelhante à fig. 15.2., ou seja, é convexa em relação à riqueza total, o que implica que a utilidade marginal esperada por aceitar um jogo justo, EU_G , será maior do que a utilidade de o recusar, $U(M_0)$. Geometricamente, uma função de utilidade convexa é representada por uma curva cujo declive aumenta à medida que a riqueza total cresce.

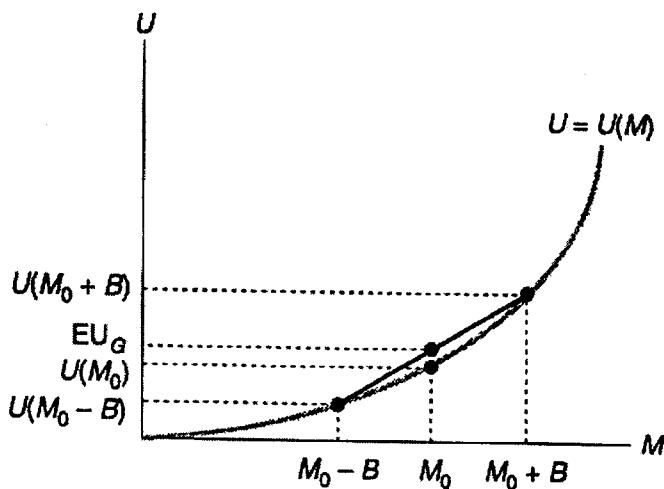


Fig. 15.2.: Função de utilidade de um indivíduo amante do risco

Diz-se que um indivíduo é neutro em relação ao risco se ficar geralmente numa posição neutra entre aceitar ou recusar um jogo justo. A função de utilidade representativa deste tipo de comportamento é linear, como a representada na fig. 15.3.

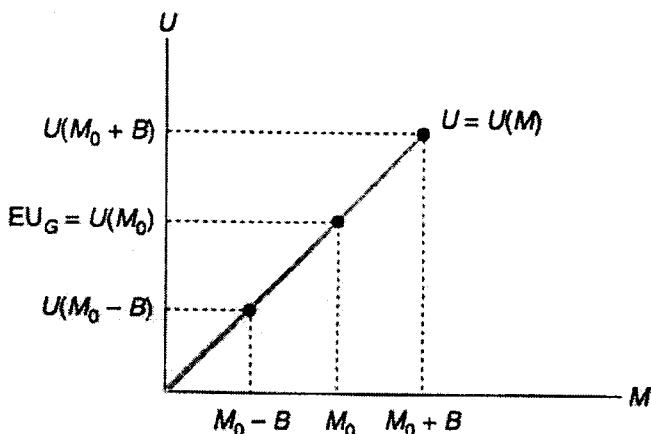


Fig. n.º 13.3.: Neutralidade em relação ao risco

Até agora, admitiu-se que os jogos apresentavam apenas dois resultados possíveis. Contudo, um jogo pode ter qualquer número de resultados possíveis. O valor esperado para um jogo com mais de dois resultados é a soma ponderada dos resultados possíveis, em que os ponderadores são as respectivas probabilidades de ocorrência. Assim, um jogo com três resultados possíveis B_1 , B_2 e B_3 , que ocorrem com as probabilidades p_1 , p_2 e p_3 , respectivamente, tem um valor esperado de $p_1B_1+p_2B_2+p_3B_3$. Dado que a soma das probabilidades é a unidade, sabe-se que $p_3=(1-p_1-p_2)$ e a utilidade esperada será :

$$p_1U(B_1)+p_2U(B_2)+p_3U(B_3). \quad (40)$$

Quando os riscos enfrentados pelos diferentes consumidores são independentes uns dos outros, ou seja, quando a probabilidade de acontecer um mau resultado a um consumidor é independente da probabilidade de acontecer ao outro, torna-se muitas vezes possível os consumidores agirem colectivamente para alcançarem um resultado preferido por todos eles. A partilha de risco funciona devido à propriedade estatística da lei dos grandes números: se um evento acontece independentemente com probabilidade p em cada uma das instâncias N , a proporção de casos nos quais esse evento ocorre, aproxima-se de p à medida que N aumenta.

O modelo de utilidade esperada oferece uma orientação de como escolher racionalmente em contexto de incerteza. A utilidade normativa do modelo é salientada pelo facto de as pessoas, frequentemente, parecerem necessitadas da sua orientação. Algumas decisões, no entanto, parecem contrariar a teoria da maximização da utilidade esperada. Os psicólogos Daniel Kahneman e Amos Tversky chamam a este tipo de inconsistência, o “efeito certeza”: uma redução na proba-

bilidade de um resultado por um factor constante tem um impacte maior quando o resultado era inicialmente certo do que quando era meramente provável (FRANK, 1998). As escolhas, nas situações em que ambas as alternativas são arriscadas, parecem implicar um menor grau de aversão ao risco do que o comportamento em situações nas quais uma das alternativas esteja livre de risco.

Uma parte da atracção das alternativas seguras é a mágoa que muitas pessoas parecem sentir quando tomam parte num jogo e perdem. Aquele que maximiza a sua utilidade esperada desejará ser cauteloso e evitar a falácia de “o mau resultado, ou resultado de uma má decisão”. Regra geral, a natureza humana prefere, obviamente, a certeza ao risco. Ao mesmo tempo, no entanto, o risco faz inevitavelmente parte do meio em que um indivíduo está inserido. Naturalmente, as pessoas desejam o maior ganho com o menor risco possível, mas a maior parte do tempo são forçadas a trocar riscos e ganhos. Quando se enfrenta a escolha entre duas alternativas com risco, defronta-se esta situação explicitamente. Nessas situações não é possível escapar ao esforço cognitivo necessário para conseguir tomar uma decisão sensata. Mas quando uma das decisões não envolve risco, torna-se muito mais fácil escolhê-la simplesmente e não desperdiçar muito esforço na decisão. Pelo contrário, quando apenas pequenas somas em dinheiro estão em jogo, existe um argumento muito forte para escolher a alternativa com o valor esperado mais elevado. O argumento para esta estratégia, como o que justifica a compra de seguros, assenta na lei dos grandes números. Neste caso, a lei diz que se se considerar e associar um grande número de jogos independentes pode ter-se a certeza que se obtém aproximadamente a soma dos seus valores esperados. Enquanto decisores, o truque é não esquecer que cada pequena

escolha arriscada é simplesmente uma parte de um conjunto de opções muito maior. Ao fim e ao cabo, a desilusão causada por uma pequena perda ocasional pode ser rapidamente ultrapassada se se pensar que qualquer outra estratégia poderia ter conduzido a uma perda virtualmente certa e de valor muito significativo.

O custo de oportunidade no longo prazo deve seguir uma estratégia avessa ao risco relativamente a decisões envolvendo apenas pequenos resultados, constitui uma perda, quase segura, de magnitude considerável. Ao pensar num problema como uma escolha de política para decidir acerca de um grande número de opções do mesmo tipo, uma estratégia aparentemente arriscada transforma-se noutra obviamente muito segura.

15.4. Modelos Comportamentais

O prémio Nobel Herbert Simon, foi o primeiro a convencer os economistas de que os seres humanos são incapazes de se comportar como os seres racionais descritos nos modelos da escolha racional. Simon foi um pioneiro no campo da inteligência artificial e deparou por acaso com este facto quando tentava programar um computador para “raciocinar” acerca de um problema. Descobriu, então, que, quando cada indivíduo tenta resolver um *puzzle*, raramente chega à solução de uma forma clara e linear. Em vez disso, procura ao acaso factos e informações potencialmente relevantes e, geralmente, desiste quando começa a compreender a solução. As conclusões são muitas vezes inconsistentes e até mesmo totalmente incorrectas. Mas, a maior parte das vezes, arranjam-se soluções razoáveis ainda que imperfeitas. Segundo Simon, os indivíduos contentam-se em “satisfazer” e não em “maximizar” a utilidade. Outra conse-

quência deste trabalho é a demonstração de que, mesmo relativamente a problemas transparentemente simples, as pessoas violam com frequência os axiomas mais fundamentais da escolha racional (FRANK, 1998).

A partir das ideias lançadas por Simon, desenvolveram-se diversos trabalhos acerca da tomada de decisões em contexto de informação incompleta. *“A percebemos-nos agora que, quando a agregação da informação é cara e a capacidade cognitiva de a processar é limitada, não é de forma nenhuma racional fazer escolhas com informação completa do tipo descrito nos modelos simples. Paradoxalmente, é irracional ser-se completamente bem informado. A literatura existente acerca da tomada de decisão em contexto de informação incompleta, longe de constituir um desafio ao modelo da escolha racional, favoreceu, na realidade, a nossa confiança nele”* (FRANK, 1998).

15.4.1. Função de Valor Assimétrica

O modelo de escolha racional assenta no pressuposto de que os indivíduos devem avaliar os acontecimentos, ou conjuntos de acontecimentos, em termos dos seus efeitos globais na riqueza total. Contudo, as pessoas parecem ponderar cada acontecimento separadamente, e dão muito menos importância ao ganho do que à perda. Kahneman e Tversky (1999) consideraram que os indivíduos não avaliam as alternativas como uma função de utilidade convencional, mas em vez disso, como uma função de valor, que se define nas alterações na riqueza. Uma propriedade importante desta função de valor é de que é muito mais inclinada nas perdas, do que nos ganhos. Geometricamente, esta função assume uma forma côncava nos ganhos e convexa nas perdas (fig. 15.4.). Esta propriedade é a análoga da utilidade

marginal decrescente do modelo tradicional. Esta refere que o impacte de ganhos ou perdas incrementais diminui à medida que os ganhos ou perdas se tornam mais elevados.

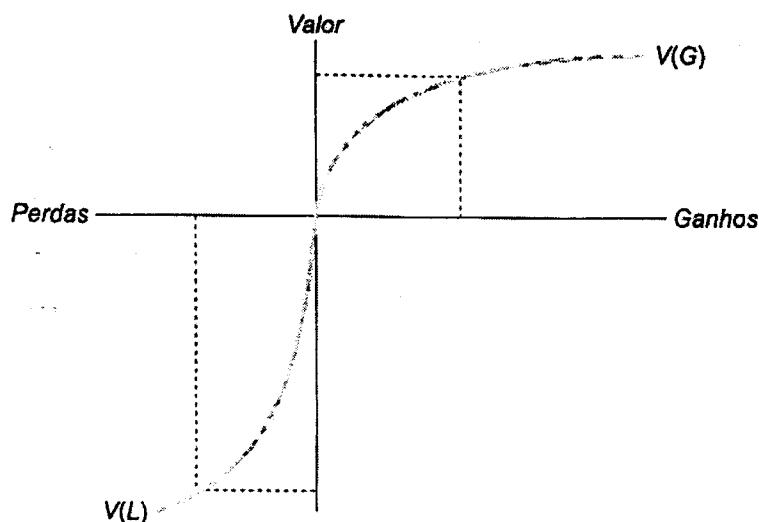


Fig. 15.4.: Curva em forma de S da função de valor

A função de valor apresenta duas características importantes. Uma é a de que os indivíduos tratam os ganhos e as perdas assimetricamente, colocando nas suas decisões, maior ênfase às últimas do que às primeiras. A outra, é de que os indivíduos avaliam primeiro os acontecimentos e só depois os valores, separados. A primeira destas características não significa necessariamente que se tenha um comportamento irracional, contrariamente à segunda que aparenta características de irracionalidade, pelo facto de tratar cada acontecimento em separado, em vez de conjugar o seu efeito combinado (KAHNEMAN, e TVERSKY, 1999).

15.4.2. Racionalidade e Decisão

A característica mais marcante da economia neoclássica, ou seja, a sua insistência no individualismo metodológico, assenta na tentativa de derivar todo o comportamento económico da acção dos indivíduos que procuram maximizar a sua utilidade, sujeitos aos constrangimentos da tecnologia e das dotações de factores: postulado da racionalidade. Em economia, racionalidade significa escolher de acordo com uma ordenação de preferência que é completa e transitiva, sujeita a informação perfeita e adquirida sem custos; onde exista incerteza sobre os resultados futuros, racionalidade significa maximizar a utilidade esperada, ou seja, a utilidade de um resultado multiplicado pela respectiva probabilidade de ocorrência (BLAUG, 1994).

Muitos acontecimentos da vida real evidenciam que mesmo quando os indivíduos têm ao seu dispor factos verdadeiramente relevantes, não tomam frequentemente decisões racionais. Existe ainda outra dificuldade relativa ao modelo de escolha racional, que é o facto de, com frequência, serem feitas inferências erradas acerca de quais são os factos relevantes. Mais importante ainda, muitos dos erros cometidos são sistemáticos e não aleatórios. Kahneman e Tversky identificaram três regras que os indivíduos utilizam para fazer julgamentos e suposições acerca do seu ambiente: predisposição, representatividade e valor inicial de ajustamento. Estas regras ajudam a economizar esforços cognitivos e dão respostas relativamente correctas a maior parte das vezes. No entanto, podem, também, dar origem a erros enormes e previsíveis em muitos casos (KAHNEMAN, e TVERSKY, 1981).

A heurística da predisposição diz que a frequência de um acontecimento, ou conjunto de acontecimentos, é avaliada, frequentemente, pela facilidade com que a memória consegue invocar exemplos semelhantes. A maior parte das vezes, existe uma correlação estreita e positiva entre a facilidade com que se pode invocar esse mecanismo e a verdadeira frequência do acontecimento. Quanto maior é a frequência com que ocorrem determinados acontecimentos, mais fácil é recordá-los. A frequência de um acontecimento não constitui, no entanto, o único factor que determina a facilidade de lembrança. A investigação sobre a memória demonstra que é tanto mais fácil recordar um acontecimento quanto mais ele for animado e sensacional. Os acontecimentos têm também tendência a estar mais disponíveis na memória se tiverem ocorrido à menos tempo. Um grande número de investigações indica que os indivíduos têm tendência a atribuir importância excessiva a informações recentes, quando fazem avaliações acerca de comportamentos relativos.

A segunda regra utilizada nos processos de decisão é a da representatividade. Os indivíduos calculam a probabilidade de um objecto pertencer a determinada classe pelo grau de representatividade que este tem da sua classe. Esta situação provoca frequentemente enbiesamentos substanciais, porque a representatividade é apenas um dos muitos factores que regulam esta probabilidade.

A estimativa a partir do estabelecimento de um valor inicial constitui a terceira regra que frequentemente origina estimativas enviesadas de importantes factores de decisão. De acordo com esta regra, os indivíduos fazem muitas vezes estimativas numéricas, escolhendo previamente uma base inicial adequada (mas, por vezes, irrelevante),

procedendo posteriormente a uma revisão (geralmente, insuficiente) dessa mesma base com fundamento em informações potencialmente relevantes. Este procedimento provoca, frequentemente, que os indivíduos envolvidos nesse projecto subestimem a taxa de fracasso relativa aos projectos com um grande número de fases. Um projecto desse tipo fracassa se algum dos elementos essenciais fracassar também, o que significa que, mesmo que a taxa de fracasso de cada fase seja extremamente baixa, um projecto com muitos factores em jogo tem elevadas probabilidades de fracasso. Dado que os decisores tendem a tomar como base a taxa de fracasso da fase típica e a efectuar uma revisão insuficiente a partir dessa base, é frequente sobreestimar a probabilidade de sucesso.

No modelo da escolha racional, não deveriam existir decisões difíceis. Entre duas alternativas com idênticos níveis de utilidade, é indiferente a opção seleccionada. Do mesmo modo, se uma das alternativas apresenta nitidamente uma utilidade superior, a escolha não deverá levantar dificuldades. Em ambos os casos quem opta não tem razões para sentir indecisão.

A realidade, apresenta-se contudo diferente. As decisões difíceis constituem mais a regra que a excepção. São inúmeros os casos para os quais as funções de utilidade não parecem esclarecer com clareza ordenações de preferências precisas. Esta dificuldade é acentuada quando as alternativas diferem no que respeita a medidas difícilmente, ou mesmo, não comparáveis entre si. O modelo de escolha racional considera que se dispõe de ordenações de preferências completas. No entanto, a tomada de decisão é, na prática, difícil, mesmo entre alternativas aparentemente simples.

Os psicólogos experimentais mostraram que o comportamento individual viola sistematicamente a racionalidade. Tais anomalias foram reconhecidas, há muito, nos trabalhos de investigação sobre a utilidade esperada, mas paradoxalmente não foram levadas a sério na teorização sob a acção racional em condições de certeza e de informação completa. Às evidências destas anomalias, a reacção dos economistas assume, essencialmente, duas formas distintas. Quando as anomalias dizem respeito ao comportamento individual, são frequentemente ignoradas ou explicadas como um produto da natureza artificial dos resultados laboratoriais. Quando os dados se referem a comportamentos agregados do mundo real, alega-se que as anomalias são distribuídas aleatoriamente, compensando-se no todo, ou mais especificamente, que os mercados tendem, com o tempo, a eliminar essas anomalias. Todavia, Blaug (1980) argumenta que as observações empíricas acumuladas são suficientes para sustentar a crença de que a concorrência, mesmo em mercados financeiros, não é bem sucedida na eliminação, a nível agregado, de todas as anomalias de título individual. Ainda Blaug enuncia o trabalho desenvolvido por Thaler que demonstra que rendimentos anormais ocorrem nos mercados bolsistas por volta da passagem de ano, de mês, de semana e mesmo de dia. Porém de acordo, com a Hipótese de Mercado Eficiente, os preços dos títulos seguem um percurso aleatório, porque os agentes nos mercados bolsistas têm expectativas racionais e exploram qualquer oportunidade de lucro no momento em que ela ocorre. Ora, se o pressuposto das expectativas racionais, que não é mais do que o *postulado da racionalidade estocasticamente vestido*, falha nos mercados financeiros, porque razão deverá ser considerado como sustentável, noutras mercados (BLAUG, 1994)?

É neste contexto que se desenvolveram teorias alternativas ao modelos de escolha racional como a “teoria prospectiva” de Kahneman e Tversky, uma teoria de utilidade não esperada para a tomada de decisões em contexto de incerteza, ou a teoria da satisfação de Simon, que pode ser descrita como uma teoria de acção individual não perfeitamente racional, quer em contextos de certeza, quer de incerteza (BLAUG, 1994). Estas concepções alternativas assumem um papel preponderante na previsão de decisões reais e constituem uma importante ferramenta para evitar as “armadilhas” mais comuns nos processos de tomada de decisão.

15.5.- Síntese do capítulo

15. ECONOMIA DA INFORMAÇÃO

- 15.1. Comunicação entre potenciais adversários
- 15.2. Assimetria de informação
- 15.3. Escolha em contexto de incerteza
- 15.4. Modelos comportamentais
 - 15.4.1. Função de valor assimétrica
 - 15.4.2. Racionalidade e decisão

A análise efectuada neste capítulo teve como objectivo fazer uma reflexão baseada nos desenvolvimentos teóricos que têm sido utilizados sobre o papel da informação na determinação do valor dos activos e no funcionamento dos mercados. Antes destes desenvolvimentos teóricos, o funcionamento dos mercados assentava no pressuposto que a informação era abundante. O estudo sobre a eficiência dos mercados veio colocar o desafio de que embora abundante, a informação de qualidade é um bem escasso e de difícil avaliação. O novo papel atribuído à informação conduziu a alterações profundas no delineamento de estratégias de tomada de decisão.

O cada vez maior volume de informação associado a uma crescente velocidade de circulação têm proporcionado o desenvolvimento de uma verdadeira indústria de informação, a qual tem contribuído para uma redução do nível de custos, mais rápida incorporação no mercado e maior transparência dos mercados. O desenvolvimento das novas tecnologias de informação apontam para a correcção de assimetrias de informação evitando

a obtenção prolongada de mais-valias no mercado. No entanto, a realidade tem evidenciado que a posse, a utilização e a velocidade de circulação da informação podem provocar distúrbios no mercado conducentes a rápidas desvalorizações dos activos e consequentes desequilíbrios de mercado. Esta situação coloca de novo o problema do risco e do comportamento do investidor nos processos de tomada de decisão e reforça a necessidade da consideração da informação como factor decisivo no funcionamento dos mercados e nos modelos de tomada de decisão.

16. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DOS MERCADOS FINANCEIROS

Falar da indústria bancária é falar de uma indústria que nasce pela necessidade, por um lado, de produzir e vender um produto, o dinheiro, e, por outro, da necessidade de regulamentar regras de conduta e de orientação que a pouco e pouco se foram generalizando a todos os países. Os avanços tecnológicos, a capacidade de inovação e a procura sempre crescente de melhores níveis de rendibilidade conduziram a um processo não menos universal, de desregulamentação da actividade bancária e ao aparecimento de um sector de excelência no campo das novas tecnologias da informação.

O produto dinheiro, sob a forma de papel moeda, tal como foi concebido e mantido durante séculos, foi a pouco e pouco, cedendo lugar ao que hoje é conhecido como dinheiro digital e, sendo comum ouvir-se falar de empresas virtuais, a Banca ocupa hoje um lugar de excelência neste campo. Três grandes características marcam a indústria bancária ao longo dos tempos e com particular incidência nas duas últimas décadas: a regulamentação, a desregulamentação e a inovação.

A indústria bancária europeia registou profundas alterações, principalmente ao longo das duas últimas décadas. A criação de um mercado



financeiro unificado na União Europeia e a instabilidade económica a que estão sujeitos mercados como o dos Estados Unidos da América³⁹ ou do Japão, são particularmente importantes para os bancos europeus e para aqueles que, não sendo de origem europeia, operam neste território. Este conjunto de situações evidenciou a ineficácia dos mecanismos regulamentares do sector e obrigou as autoridades monetárias a repensar a regulamentação dos mercados financeiros e o modo de funcionamento da indústria bancária, como um todo.

A situação actual apresenta uma similitude de sistemas económicos entre países tão diferentes, como os EUA, o Japão, o Canadá e os próprios membros da União Europeia, o que conduz a que a desregulamentação do sistema financeiro, ou a re-regulamentação como alguns autores preferem adoptar, apresente características semelhantes em todos os países citados.

Embora continue a ser um sector fortemente regulamentado, consequência dos elevados volumes transaccionados e da multiplicidade de intervenientes, as novas medidas regulamentares emanadas do sector bancário apontam para a remoção ou aligeiramento de barreiras competitivas, relacionadas fundamentalmente com: (i) o controlo de preços ou taxas de juro; (ii) as restrições de produtos; (iii) as limitações de âmbito organizacional e de ordem geográfica; e, (iv) as imposições fiscais, quer explicitamente a nível do rendimento, quer implicitamente a nível do controlo dos activos.

A remoção ou aligeiramento das barreiras competitivas alteraram completamente a estrutura do sector bancário a partir de meados dos anos

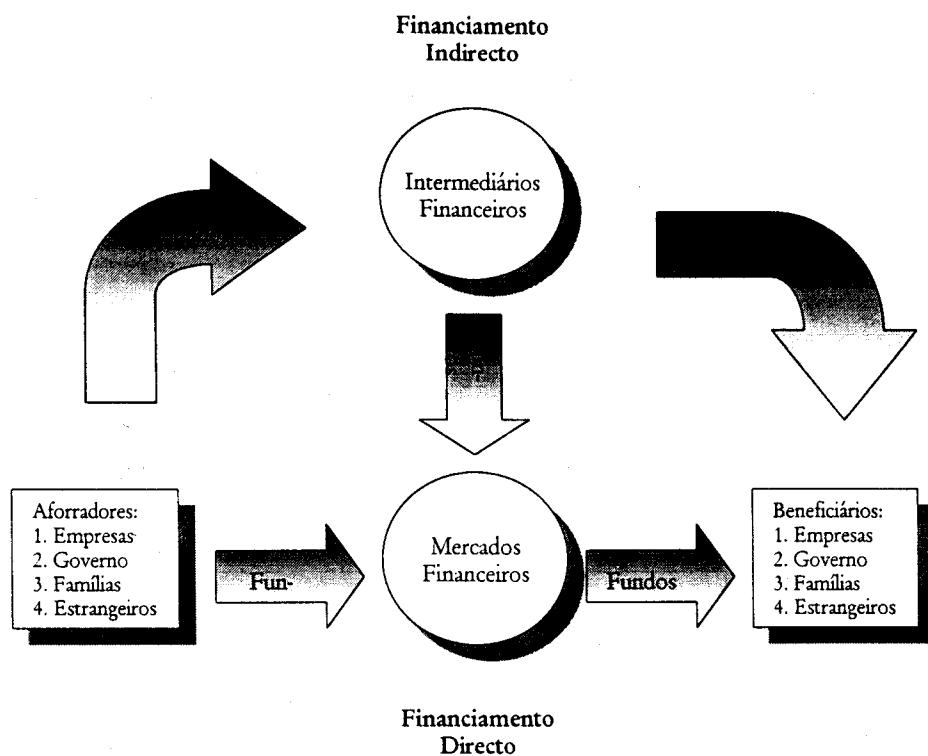
³⁹ Adiante designados como EUA
502

90, sendo a última década caracterizada por alterações estratégicas de fundo resultantes de numerosos factores como a desintermediação, a instabilidade económica nos mercados internacionais, a desregulamentação dos mercados financeiros nos países industrializados e principalmente, pela criação do mercado europeu em 1993.

Os efeitos do processo de internacionalização e liberalização dos mercados financeiros afectaram de igual modo instituições e clientes de serviços financeiros, os quais passaram a beneficiar de um volume crescente de instrumentos de crédito, novos produtos financeiros e melhorias tecnológicas que permitem uma maior autonomização na disponibilização desses instrumentos, quer no mercado de produtos nacionais, quer no mercado de novos produtos.

16.1. Mercados e Intermediários Financeiros

O sistema financeiro pode ser descrito como uma estrutura global, da qual fazem parte diferentes categorias de instituições, de natureza monetária ou não monetária.



Fonte: Mishkin, 1995

Fig. 16.1.: Fluxos de Fundos no Sistema Financeiro

A multiplicidade de instituições e de outros agentes económicos que compõem o sistema financeiro, conduziu a que este se organizasse em diferentes mercados financeiros, os quais partilham entre si a função económica essencial de canalizar fundos dos detentores de excedentes de poupanças, por disporem de rendimento disponível superior às necessidades de consumo, para as famílias ou empresas que apresentam escassez de fundos (fig. 16.1.). Deste modo, a poupança constitui-se em função do rendimento, independentemente dos valores das taxas de juro. Uma vez constituída, a poupança pode ter dois destinos: aplicada ou entesourada. A taxa de juro é o prémio de renún-

cia à liquidez e o seu valor é determinante no processo de decisão para os aforradores, sobre o destino a dar à poupança realizada.

Ao possibilitar o movimento de fundos para aplicação em oportunidades de investimento produtivo, os mercados financeiros contribuem para elevar os níveis de produção e melhorar a eficiência do sistema económico na globalidade. Investimento e poupança são processos dissociados, a decisão de investimento é independente da capacidade de poupança por parte do investidor. A rendibilidade esperada pelo investimento é suficiente para garantir o financiamento, o qual pode ser efectuado pelo recurso a crédito através da capacidade de criação de moeda dos próprios bancos.

As bases da teoria da intermediação financeira desenvolvidas por Keynes, defendem a existência de um motivo de financiamento para a procura de moeda, apenas viável na presença de instituições bancárias que constituem a parte mais importante do que é comumente designado como intermediário financeiro. Estas instituições, além da recolha de poupança através dos depósitos, contribuem para a criação de moeda até ao limite máximo permitido pelo multiplicador de crédito. Nesta perspectiva, os intermediários financeiros podem então classificar-se em dois grupos fundamentais: os monetários e os não monetários. Os primeiros têm a faculdade de criar moeda que circula em todo o sistema económico. Enquadram-se, neste grupo, as autoridades monetárias (normalmente Ministério das Finanças e Banco Central), que supervisionam todo o processo de criação de moeda, e todas as outras instituições monetárias (OIM's) que se congregam num grupo que comprehende, para além dos bancos comerciais, as instituições especiais de crédito e todas as outras instituições que recolhem

depósitos e criam moeda. Os intermediários financeiros, não monetários, compram títulos primários em contrapartida da oferta de créditos não monetários sobre eles próprios, tais como obrigações de caixa, títulos de participação, acções e outros títulos de crédito.

A principal função da intermediação financeira consiste então na aquisição de títulos primários a utilizadores finais de fundos e na emissão de dívida indirecta para colocação na carteira de credores originais. Embora os títulos primários constituam o principal activo dos intermediários financeiros, estes agentes económicos possuem outros activos financeiros, como títulos de dívida indirecta de outros intermediários, e activos reais. Em suma, o investimento pode ser financiado de uma forma directa, quando se obtêm os fundos necessários directamente dos aforradores, ou de uma forma indirecta quando o financiamento entre aforradores e investidores é facilitado pelos serviços de um intermediário financeiro.

Ainda que possível e admissível no sistema económico, o recurso a financiamento directo manifesta-se perfeitamente inoperante. De facto, quando estão em causa pequenos montantes, o que sucede frequentemente face à existência de numerosos aforradores detentores de somas relativamente modestas, não é possível encontrar colocações directas adequadas (entenda-se aplicações em formação de capital fixo). O investidor em capital real terá dificuldade em encontrar um credor que disponibilize a importância exacta de que necessita, do mesmo modo que os credores terão dificuldade em encontrar colocações com os exactos prazos de reembolso desejados.

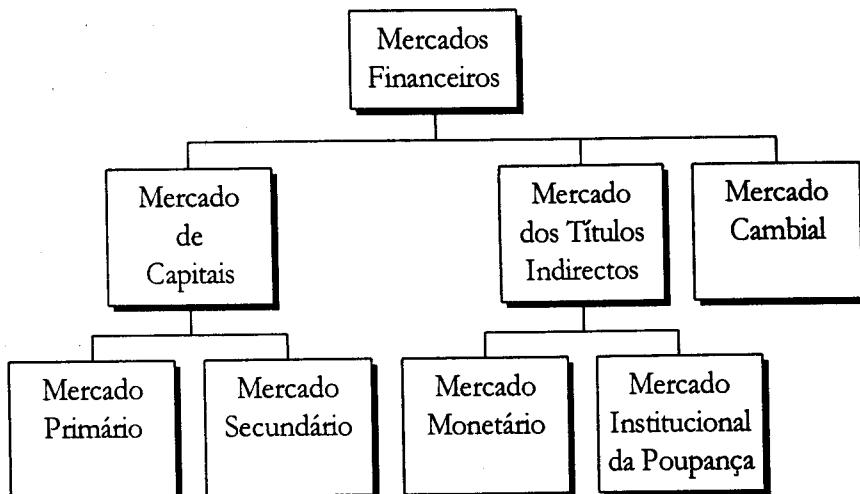
Por outro lado, pequenos montantes impedem uma adequada diversificação das aplicações, o que aumenta o nível de risco envolvido nas transacções, para além de ser pequeno o número de investidores individuais que domina as técnicas de gestão do risco. Acresce aos dois factores limitativos do financiamento directo, as dificuldades de liquidez geradas na maior parte das situações, por se tratar vulgarmente de aplicações que revestem a forma de quotas ou partes de capital de empresas de responsabilidade não limitada.

Em contrapartida, o financiamento indirecto apresenta um grande número de vantagens porque permite a colocação de pequenos montantes, junto das instituições de crédito, com melhores condições de segurança e liquidez, assim como ultrapassar um conjunto de dificuldades que se prendem directamente com o financiamento directo. O recurso ao financiamento indirecto permite, então, a obtenção de economias de escala porque origina uma carteira com uma gama diversificada de risco, agrupa fundos de diferentes proveniências, o que possibilita a obtenção de somas mais elevadas com redução dos custos médios de transacção na compra de activos e uma gestão do risco mais eficaz, pelo facto de serem controladas pelas próprias instituições financeiras que se encontram mais habilitadas para este tipo de actividade.

Campbell (1982) analisa a questão do tipo de benefícios oferecidos pelos intermediários financeiros, o que conduz a que determinados mercados sejam dominados por intermediários e outros não. Segundo este autor, os modos de intermediação e os serviços prestados, por aqueles operadores de mercado, apresentam múltiplas e distintas formas, devendo recorrer-se à estrutura do próprio sistema financeiro

para um completo entendimento. Sendo uma estrutura global composta por diferentes categorias de instituições, de natureza monetária e não monetária, o sistema financeiro apresenta-se organizado em diferentes mercados, nos quais se processam diferentes transacções que estimulam o crescimento económico. Os mercados financeiros assumem uma gama alargada de formas. Se alguns mercados aparecem formalmente organizados, outros pelo contrário são mercados perfeitamente informais em que todo o processo de negociação é efectuado via comunicações electrónicas, não se verificando qualquer contacto pessoal directo entre os diferentes participantes do mercado. Independentemente da estrutura e do modo como se encontram organizados podem classificar-se os mercados financeiros de acordo com a estrutura constante no diagrama seguinte:

Estrutura dos Mercados Finaceiros



Fonte: Adaptado de Barata, 1993

Fig. 16.2: Estrutura dos mercados financeiros

O mercado primário é o mercado onde são transaccionados os títulos primários, isto é, no momento da sua emissão. Os preços dos novos títulos são frequentemente estabelecidos como resultado das análises de mercado e reflectem vulgarmente o valor actual esperado dos meios libertos futuros gerados pela entidade emissora. No entanto, os títulos emitidos por uma entidade não acontecem com uma tal periodicidade que possibilitem ao mercado ter a exacta noção do valor da entidade emissora. A acontecerem actualizações, verificam-se pelo limitado entendimento das condições económicas dos participantes nesse mercado. Por outro lado, é difícil que um único ou um número bastante reduzido de investidores absorvam a globalidade de novos títulos emitidos, pelo que a emissão deve ser distribuída por um número alargado de compradores, de modo a assegurar a sua venda.

Os mercados secundários existem quando vendedores e compradores trocam uma forma de títulos, já emitidos, por outra forma. Estes mercados contribuem para a melhoria de eficiência do mercado de títulos porque permitem um acompanhamento contínuo das condições económicas das empresas com consequente fornecimento de informação aos participantes no mercado. A disponibilidade de informação permite identificar as condições económicas das entidades emissoras, ajustar as previsões sobre o valor futuro e fixar novos preços de mercado dos títulos transaccionados.

O prazo de maturidade dos instrumentos financeiros é outra das formas de diferenciar os mercados. Se os títulos negociados são instrumentos financeiros de curto prazo, o mercado denomina-se mercado monetário. Quando o prazo de maturidade excede o prazo de um ano, o mercado é denominado mercado de capitais. O mercado

monetário é o mercado no qual compradores e vendedores negoceiam instrumentos financeiros com prazos de duração inferiores a um ano, trata-se portanto de um mercado de curto prazo. Neste mercado, os diversos agentes económicos oferecem ou procuram dinheiro, em função da optimização de gestão das respectivas tesourarias. Os bancos centrais intervêm neste mercado como agentes reguladores da emissão monetária e das taxas de juro. A procura por instrumentos financeiros de curto prazo, com diferentes prazos de duração, tem registado um interesse crescente por parte das empresas, resultante em grande parte das flutuações das taxas de câmbio e de juro e da necessidade cada vez maior de uma gestão equilibrada do capital circulante das empresas.

Sempre que um título negociável seja susceptível de emissão pública, isto é, quando a entidade emissora faz anúncio público da emissão e a ela podem acorrer vários subscritores pertencentes a determinado universo, pode falar-se da existência de um mercado de capitais, também denominado como mercado de longo prazo, porque o prazo de duração dos títulos é superior a um ano. Neste mercado, são então transaccionados os títulos representativos de financiamento directo (obrigações e acções), emitidos pelo Estado e pelas empresas.

16.2. Regulamentação

Historicamente, a diferença fundamental entre bancos comerciais e outras instituições financeiras, resulta da capacidade de criação de moeda, conservando aqueles apenas uma parte do total dos depósitos sob a forma de liquidez. Estas diferenças são determinadas pela existência de restrições regulamentares fixadas pelos organismos de tutela, os quais poderão obri-

gar ao ajustamento ou redefinição de estratégias dos organismos actuantes. No contexto actual, estes organismos dependem dos poderes públicos, os quais podem revestir aspectos muito diversos e conferir à intervenção pública múltiplas modalidades, centrando-se a intervenção das autoridades monetárias em dois objectivos fundamentais: *preservar o sistema bancário e melhorar a eficiência dos mercados financeiros.*

A capacidade de criação de moeda tem sido o factor mais determinante da necessidade das autoridades monetárias regulamentarem as operações dos bancos comerciais, de modo a assegurarem a respectiva solvabilidade. Por definição, a maior parte dos depósitos bancários está sujeita a ser levantada a qualquer momento, enquanto os activos detidos pelas instituições bancárias apresentam diferentes períodos de maturidade e escassez de liquidez a curto prazo.

Se um número suficientemente grande de depositantes retirasse simultaneamente todos os seus depósitos, o banco correspondente e o sistema bancário na globalidade, enfrentariam sérios problemas, como aconteceu nos EUA no começo da década de 30. Com efeito, a estrutura do sistema não estava preparada para situações deste tipo, o sistema financeiro não conseguiu actuar eficaz e atempadamente e as falências dos bancos seguiram-se em catadupa, decaindo o número de bancos de 25 000 em 1929 para 14 000 em 1933. A oferta da moeda reduziu-se e os depósitos bancários sofreram um decréscimo de cerca de 35% no período compreendido entre 1929 e 1933 (JOHNSON, 1993).

Quando o presidente Franklin Roosevelt assumiu a presidência dos EUA em 1933 (1933-1945), o estado da economia era calamitoso e o sistema bancário encontrava-se em situação de colapso (JOHNSON,

1993). A reforma do sistema bancário foi a sua principal prioridade e toda a legislação daí resultante foi uma tentativa de protecção do sistema e para procurar evitar que situações daquele tipo viessem a ocorrer de novo.

Na sequência dos acontecimentos verificados, o Congresso dos EUA aprovou uma série de medidas regulamentares de funcionamento do sistema bancário (1933-34). De entre o pacote legislativo concebido neste período, assumiu particular relevância a Lei Bancária de 1933, também conhecida por Lei de Glass-Steagall. Criada após o período da Grande Depressão, esta lei surgiu como uma tentativa de criar medidas rápidas de restabelecimento de confiança dos diversos agentes económicos no sistema bancário comercial, de modo a evitar canalizações de fundos para actividades comerciais *especulativas* e eliminar conflitos de interesses e transacções internas, resultantes do *casamento* existente entre banca comercial e banca de investimento (GART, 1994).

Ao longo de sucessivas décadas, as autoridades financeiras dos EUA e, de um modo similar, em todos os países da Europa Ocidental, procuraram criar regras prudenciais que visassem proteger o sistema de riscos demasiadamente elevados. O processo de regulamentação bancária foi praticamente universal e pode sintetizar-se em cinco pontos fundamentais: (1) intervencionismo acentuado dos poderes públicos, no acesso à actividade e modo de funcionamento das instituições financeiras; (2) seguro de depósitos; (3) regulamentação das políticas quanto à fixação de taxas de juro; (4) restrições à expansão geográfica das instituições; e, (5) dissociação dos bancos comerciais dos outros agentes de intermediação económica.

A primeira das medidas citadas teve como objectivo a fixação de um nível obrigatório mínimo de reservas - manutenção de um mínimo de capital sob a forma líquida relativamente ao total do activo - e o rácio da solvabilidade - uma percentagem em relação ao número total de acções pendentes em activos líquidos. Esta medida regulamentar revelou-se particularmente importante na evolução histórica do sistema bancário, uma vez que procurou garantir a cedência de crédito de um modo honesto e eficiente e simultaneamente surgiu como uma tentativa de evitar que as autoridades financeiras aplicassem inadequadamente os fundos provenientes dos aforradores: em actividades fraudulentas; desvios; e, concentração de fundos em carteiras com risco muito elevado.

O segundo instrumento regulamentar estabeleceu quais os activos financeiros que os bancos podiam conservar em seu poder e constituiu o *Federal Deposit Insurance Company (FDIC)*, o qual viria a ser gerido por um organismo da tutela governamental, com fundos provenientes dos próprios bancos. O objectivo fundamental da constituição do seguro de depósitos foi criar um mecanismo de protecção de eventuais prejuízos resultantes da falência de uma instituição financeira. Este mecanismo revelou-se de grande eficácia desde a sua criação, em 1930, mesmo nos períodos de grande instabilidade financeira.

O contexto económico verificado no período da Grande Recessão pôs em evidência a necessidade de regulamentação das políticas de fixação de taxas de juro, as quais viriam a ser legisladas pelo Regulamento Q. Este regulamento impôs um maior rigor na política de preços praticados, concretamente através da proibição de pagamento de juros em contas correntes e obrigatoriedade de regulamentação do pagamento de juros respeitantes a contas de depósitos a prazo.

Segundo o então Senador Glass, a lei destinou-se a colocar um ponto final na competição verificada entre os bancos no pagamento de remunerações em depósitos a prazo. A excessiva competição induzia os bancos ao pagamento de elevadas taxas de juro naquele tipo de operações, situação que obrigava ao investimento em aplicações de fundos com risco muito elevado numa tentativa de obtenção de melhores níveis de rendibilidade. A forte competição do sector e os riscos assumidos nas diferentes operações financeiras, colocou as instituições bancárias em sérias dificuldades financeiras e esteve na origem de grande parte das falências verificadas (GART, 1994).

A regulamentação da expansão geográfica das instituições bancárias, incluída na Lei Bancária de 1933, constituiu o quarto grupo de medidas adoptadas pelo Presidente Roosevelt, o qual teve como objectivo impedir o crescimento exagerado de determinadas instituições, evitando situações de poder monopolístico e de concorrência excessiva. Neste sentido, alterou o regulamentado na Lei de McFadden, de 1927, em duas vertentes. Numa primeira vertente, através da liberalização de certas restrições quanto à capacidade de actuação dos bancos nacionais operarem noutras Estados que não o de origem e, numa segunda vertente, pela limitação da abertura de estabelecimentos sucursais, de modo a impedir a expansão indirecta entre fronteiras estaduais.

Finalmente, o quinto grupo de medidas promulgado pela Lei de Glass-Steagall, regularizou a dissociação das actividades dos bancos comerciais, dos bancos de investimento. A Lei Bancária de 1933 dividiu a indústria bancária em dois sectores, consoante o tipo de actividade desenvolvido: banca comercial para captação de depósitos e concessão de fi-

nanciamentos e banca de investimento para processos de fusões e aquisições e lançamento de títulos. A delimitação das actividades da banca comercial constituiu uma importante medida de protecção aos utentes dasquelas instituições, pela diminuição do risco assumido nas operações financeiras autorizadas.

As razões apontadas justificaram a regulamentação do sistema financeiro, o qual foi inicialmente aplicado nos EUA e posteriormente adoptado também na Europa Ocidental. O sistema cresceu de acordo com as medidas aprovadas por Franklin Roosevelt, entre 1933 e 1934, de modo a superar a crise financeira que ocorreu nos EUA nos anos da Grande Depressão. Estas medidas registaram uma aplicação crescente na Europa Ocidental, que veio a resultar numa nova regulamentação do sistema financeiro a partir do início da década de 70.

Da mesma forma que o processo de regulamentação bancária foi praticamente universal, assim aconteceu com o processo de desregulamentação, que viria a ocorrer, de facto, a partir de 1980, embora encontre as suas raízes nos anos 60, quando os bancos americanos e europeus começaram a procurar caminhos de fuga à legislação vigente, concretamente no que se refere às taxas de juro e à delimitação geográfica do âmbito de actuação.

16.3. Desregulamentação

Nos últimos anos, concretizaram-se importantes desenvolvimentos no sistema financeiro internacional, em particular a nível da Comunidade Europeia, com consequências assinaláveis em termos de

funcionamento do sistema bancário dos diversos Estados-Membros. Muitos dos instrumentos financeiros utilizados hoje em dia eram inexistentes há 20 anos atrás. O número de novas instituições e instrumentos financeiros colocados à disposição dos aforradores com elevados, médios ou poucos fundos disponíveis, para investimento, registaram crescimentos acelerados nas duas últimas décadas. Estes aspectos levantam a questão de quais os factores que explicam a completa alteração dos sistemas financeiros e a proliferação de novos produtos disponíveis aos consumidores (MISHKIN, 1995)?

“Os domínios da regulamentação foram-se modificando através do tempo e do espaço tendo em conta, em primeiro lugar, as particularidades históricas e culturais, em seguida, o lugar destinado às instituições financeiras na economia, e por fim, as legislações em vigor. As limitações recatram sucessivamente sobre o crescimento, para evitar a imprudência, sobre as práticas oligopolísticas, para não prejudicar a eficácia do sistema financeiro e, finalmente sobre as condições necessárias para entrar e sair do sector bancário” (CARMOY, 1992). As barreiras criadas pela regulamentação dos sistemas financeiros, obrigaram as empresas a exercerem um tipo de gestão centrado na procura de formas de desvios e fugas à própria regulamentação.

A inovação dentro da indústria bancária resultou essencialmente do travão imposto ao desenvolvimento pelas autoridades através dos sistemas regulamentares e do aparecimento e aplicação ao sector das novas tecnologias de informação que vieram permitir a redução dos custos operacionais e proporcionar a criação de novos serviços aos clientes, para além de uma mais ampla difusão da informação que conduziu a um maior grau de segurança no processo de tomada de decisão.

O novo cenário de actuação dos diferentes intervenientes nos mercados financeiros, conduziu as autoridades a um repensar das políticas de regulamentação de modo a contemplar a importância assumida pela desintermediação, o aparecimento a um ritmo constante de novos mercados e instrumentos, a transformação estrutural do comportamento das clientelas, a intensificação e a generalização dos factores de concorrência a nível mundial, e por fim, as possibilidades de transferências de fundos oferecidas pelas novas tecnologias (CARMONY, 1992).

Os factores citados conduziram ao desaparecimento de boa parte das regulamentações existentes, as quais foram no entanto acompanhadas pela substituição de normas de tipo prudencial e por importantes alterações na condução da política monetária. Este processo surgiu como consequência da própria internacionalização da actividade económica, que obrigou à necessidade de melhorar a autonomia dos sistemas financeiros e evidenciou a ineficiência dos mecanismos tradicionais de controlo administrativo.

O processo de desregulamentação bancária cujo início ocorreu nos EUA, registou uma propagação extremamente rápida em países com sistemas bancários muito diferentes e assumiu uma grande diversidade de situações. A partir de meados dos anos setenta, e em particular na última década, tem vindo a desenvolver-se um importante processo de liberalização dos mercados financeiros a nível mundial, o qual se tem traduzido na abolição progressiva dos controlos ao movimentos internacionais de capitais, na eliminação dos limites de crédito e das restrições legais à liberdade de fixação das taxas de juro, e da su-

pressão de regulamentos e controlos que afectaram a generalidade dos mercados financeiros tradicionais (restrições à estrutura do balanço e restrições no acesso ao mercado e à expansão territorial das actividades).

A crescente integração dos mercados financeiros e dos fluxos de capitais a nível internacional teve importantes reflexos nas estruturas dos mercados dos vários países. Nos últimos anos, verificaram-se alterações, quer no número de instituições, quer nas práticas prevalecentes dos diferentes enquadramentos regulamentares, o que veio constituir mais um factor para a intensificação da concorrência.

O processo de desregulamentação não afectou de igual modo todos os mercados nem os diversos segmentos da actividade bancária. A nível da União Europeia, as condicionantes específicas da crescente integração das economias dos vários Estados-Membros reflectiram-se nas alterações do quadro regulamentar comunitário e condicionaram as modalidades de liberalização e de integração financeiras. Embora o ritmo das alterações não tenha seguido um padrão uniforme, entre os diferentes Estados que compõem a União Europeia, registou-se um padrão comum de substituição gradual de soluções administrativas por regras de mercado e de transposição progressiva das alterações de enquadramento regulamentar comunitário, para os vários mercados nacionais.

Na indústria bancária, a adopção pelos vários Estados-Membros da Directivas Comunitárias relativamente ao sector, promoveu a gradual integração dos mercados e permitiu o incremento das actividades transfronteiriças, com idêntico impacte no aumento da

concorrência a nível local. De facto, na generalidade dos países da União Europeia, a crescente internacionalização e integração dos sistemas financeiros condicionou a dimensão e o ritmo do processo de liberalização interna dos vários sistemas nacionais. Diversas Directivas Comunitárias procuram dar cumprimento ao objectivo de integração financeira, proporcionando aos bancos e outras instituições financeiras com sede em Estados-Membros, a possibilidade de operarem em todo o território da União, sujeitas apenas à supervisão prudencial das autoridades do país de origem. Neste contexto, assume particular relevância a questão de harmonização de conceitos, rácios e limites prudenciais aplicáveis à actividade das instituições, de forma a garantir a desejada solidez do sistema e a evitar distorções nas condições da concorrência.

16.4. Inovação Financeira

Como em qualquer outro sector, as instituições financeiras desempenham a sua actividade com o objectivo de obtenção de lucros com a venda dos seus produtos. Os produtos desenvolvidos pelas instituições financeiras devem cumprir os objectivos que justificam a sua actividade e satisfazer, em simultâneo, as necessidades dos clientes.

A inovação no sector financeiro resulta das alterações a nível das condições de oferta e da procura dos produtos disponíveis. O estímulo à inovação financeira acentuou-se sobretudo pelo facto das instituições financeiras se defrontarem com regulamentos muito restritivos, o que as obrigou a encontrar formas de contornar os regulamentos. A toda esta situação verificada nos mercados financeiros, não foi alheia a rápida inova-

ção tecnológica aplicada ao tratamento e transferência de grandes volumes de informação, os quais vieram a reflectir-se na integração crescente dos mercados (PINTO, 1994).

A análise da inovação no sector financeiro tem de ter em conta, necessariamente, os factores que provocaram o aparecimento das diferentes inovações. Muitos analistas financeiros sustentam que a inovação resulta do desejo de maximização dos lucros, quer por particulares, quer por empresários. Dito de outro modo, a inovação é conduzida com o objectivo de gerar ou manter riqueza. Esta teoria assenta no pressuposto que uma alteração nas condições económicas estimula a procura de inovações que proporcionem melhores níveis de rendibilidade (MISHKIN, 1995).

No começo dos anos 60, particulares e instituições que operavam nos mercados financeiros foram confrontados com alterações drásticas no contexto económico: as taxas de inflação e de juro dispararam, tornando difícil qualquer previsão sobre a evolução futura, situação que alterou as condições de procura dos mercados financeiros. Por outro lado, com a introdução de grandes computadores nos serviços centrais dos bancos, iniciou-se o processo de automatização em larga escala, o que veio a proporcionar ganhos em termos de tempo, com consequente melhoria a nível da competitividade.

A década seguinte caracterizou-se pelo desenvolvimento das telecomunicações e da tecnologia informática, proporcionando aos utilizadores maior flexibilidade de execução de operações como levantamentos, depósitos e transferências de fundos. Este novo cenário alterou as condições do lado da oferta e a regulamentação financeira começou a evidenciar desajustamentos em relação à realidade. As instituições financeiras cons-

tataram que os velhos métodos de desempenho tradicional das actividades deixaram de ser atractivos sob a óptica da rendibilidade. Os serviços e produtos financeiros oferecidos não encontravam procura nos mercados. Muitos intermediários financeiros não tinham capacidade através dos instrumentos tradicionais de atrair fundos no mercado e sem estes, teriam de *sair fora do negócio*. A sobrevivência das instituições financeiras no novo cenário económico dependia da capacidade de investigação e desenvolvimento de novos produtos e serviços que encontrassem aceitação no lado da procura, isto é, teriam de provar a sua capacidade de gerar níveis de rendibilidade positivos. Este processo veio a ser designado por *engenharia financeira* e toda a investigação desenvolvida demonstrou a possibilidade de enriquecimento no novo contexto económico.

O processo de inovação financeira pode ser explicado pela interligação entre os diferentes mercados e as próprias instituições financeiras e resulta essencialmente da conjugação de quatro factores: instabilidade financeira, regulamentação, automatização, e procura de novos serviços (fig. 16.3).

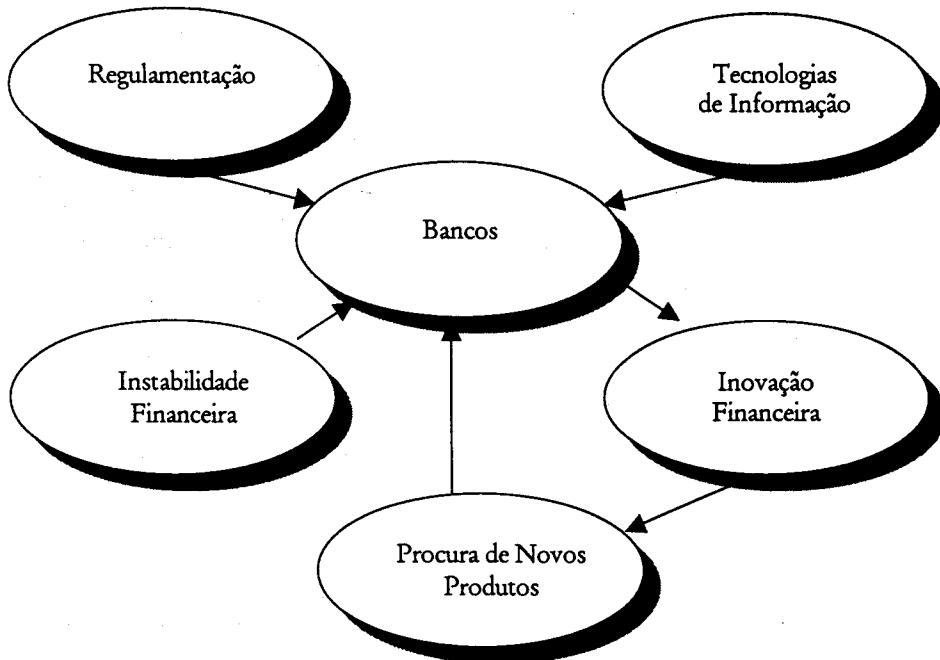


Fig. 16.3.: Processo de Inovação Financeira

A crescente volatilidade das taxas de juro, registadas nos últimos anos, foi o principal factor económico responsável pelas alterações verificadas na procura dos produtos financeiros. A introdução do sistema de câmbios flutuantes, após o colapso, em 1971, do sistema de paridades fixas acordado em Breton Woods e as crises económicas associadas aos choques petrolíferos, originaram fortes variações nos preços, nas taxas de juro e de câmbio e provocaram acréscimos sem precedentes nos níveis de risco envolvidos nas diferentes transacções financeiras. As diferentes perturbações económicas, ainda que em grau variável, afectaram na generalidade os interesses dos aforradores, dos

investidores, das instituições de crédito e dos restantes operadores dos mercados financeiros.

Como resposta à situação verificada, os intermediários financeiros debruçaram-se na procura de novas formas de actuação nos mercados, o que veio a traduzir-se na multiplicação e diversificação de modalidades alternativas de poupança, de financiamento das empresas e de cobertura de riscos, com implicações na política monetária. Deste processo de inovação financeira surgiram e assumiram particular importância os *empréstimos de taxa variável*, principalmente a nível dos empréstimos hipotecários, e o desenvolvimento do *mercado de derivados financeiros*, ou mercado a prazo de instrumentos financeiros, que compreende o mercado dos *futuros* e o das *opções*.

O lançamento de *empréstimos obrigacionistas com taxas de juro variáveis*, surgiu como resposta à relutância dos investidores adquirirem *obrigações de taxa de juro fixa*, independentemente da sinalização do mercado. A grande vantagem deste instrumento assentou no facto do risco associado a flutuações da taxa de juro ser directamente transferido para a entidade emissora do empréstimo. Este instrumento registou um crescimento muito rápido nos mercados internacionais, resultante da percepção das vantagens em relação à volatilidade das taxas de juro.

Na década de oitenta, um novo instrumento financeiro, denominado *swap*, veio provocar o declínio dos empréstimos obrigacionistas de taxa flutuante nos mercados internacionais. Na sua forma original, o termo *swap* descrevia uma operação financeira que consistia na venda de uma divisa no mercado de câmbios e simultaneamente na sua reaquisição a prazo, ou vice-versa. O mecanismo associado aos ins-

trumentos *swaps* veio facilitar a cobertura do risco cambial e o domínio destas operações financeiras registou um favorável desenvolvimento sobretudo a partir de 1980, com o acentuar da volatilidade das taxas de juro. Actualmente, o termo *swap* é aplicado a operações de empréstimos ou de colocação de capitais no mercado das taxas de juro à vista e a prazo. Nos mercados financeiros internacionais são frequentes *swaps* de taxas de juro, através das quais são permutadas taxas de juro fixas por taxas de juro variáveis, permitindo aos intervenientes no mercado a partilha de riscos associados às variações não previstas das taxas de juro.

Entre as inovações financeiras, assumiu particular destaque o mercado de derivados financeiros. Este mercado teve origem em Chicago, em 1977, tendo aparecido na Europa, o primeiro mercado deste tipo, em 1982, com a criação do *London International Futures Exchange* (LIFE), a que se seguiu o *Marché à Termes des Instruments Financiers de Paris* (MATIF). Os princípios de funcionamento do mercado de derivados apresentam semelhanças com os mercados a prazo de mercadorias e a sua função básica consiste em organizar a transferência do risco de variação do preço dos activos, dos agentes expostos que não desejam assumi-lo (*hedgers*), para aqueles que aceitam voluntariamente o endoso (*traders*). De entre as características deste mercado, destacam-se o crescimento permanente, que se tem verificado mesmo em períodos de recessão, o carácter internacional e multiproduto, dado que todos os produtos financeiros negociados em mercado podem ser suporte de produtos derivados (acções, obrigações, certificados de depósito, divisas, índices bolsistas, *swaps* entre outros) e a multiplicidade de operadores finais, que inclui particulares, empresas e operadores institucionais.

A discussão em torno dos factores que suscitaram o aparecimento da inovação financeira não pode ser dissociada das alterações verificadas em torno das condições de oferta de produtos e/ou serviços financeiros. A este nível, a fonte mais importante centrou-se no desenvolvimento das tecnologias de informação e das telecomunicações. De todos os sectores da actividade económica os bancos têm sido os grandes utilizadores e impulsionadores das tecnologias da informação. O desenvolvimento destas tecnologias contribuiu significativamente para a redução dos custos operacionais e para o aumento da velocidade de processamento das diferentes operações bancárias.

As novas tecnologias de informação permitiram alterações significativas no quadro da gestão bancária tradicional, possibilitaram o aparecimento de novas oportunidades de negócio e o desenvolvimento de uma gama alargada de produtos apenas limitado pelo nível de procura capazes de sustentar. Numa fase posterior, o sector bancário aproveitou o desenvolvimento informático para uma maior aproximação ao cliente. O ponto central desta fase consistiu na criação do ficheiro de cliente. A principal vantagem desta inovação residiu na capacidade de armazenamento central de toda a informação disponível sobre um determinado cliente, conjuntamente com a possibilidade de separação de serviços específicos ou outro tipo de informações de carácter individual.

Associado ao desenvolvimento das tecnologias de informação, um conjunto de inovações financeiras revolucionou toda a estrutura e lógica de funcionamento das instituições bancárias. Entre as diferentes inovações, o incremento e a propagação dos cartões de crédito assu-

miu tamanhas proporções nas transacções comerciais, que levou à denominação da era actual como *era do plástico*.

Os avanços registados no campo informático e nas telecomunicações melhoraram a capacidade de aquisição de informação sobre o mercado de títulos, diminuindo os problemas de informação assimétrica, e permitiram o aparecimento de novos instrumentos financeiros como os *junk bonds*⁴⁰, o aumento do papel

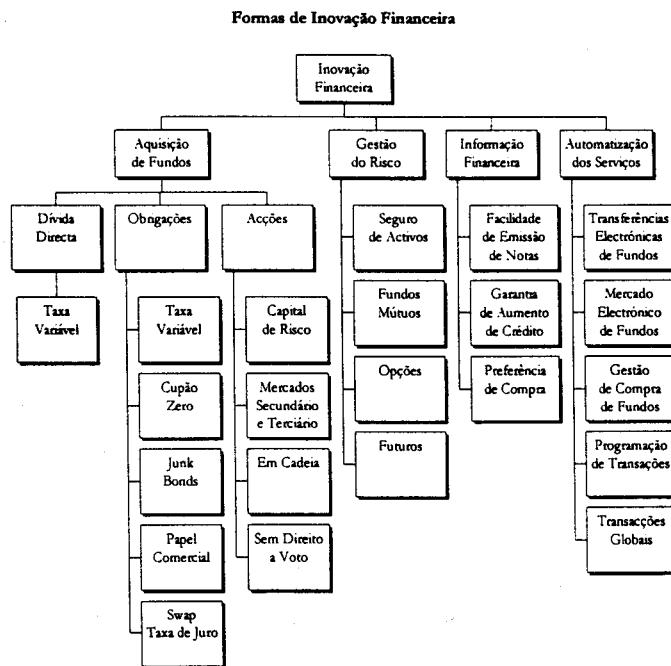


Fig. 16.4: Formas de inovação financeira

comercial⁴¹ e a internacionalização dos mercados financeiros (fig. 16.4.).

⁴⁰ Obrigação emitidas por uma sociedade, com o objectivo de voltar a comprar o seu capital.

⁴¹ Títulos de crédito de curto prazo, que podem ser emitidos por empresas que cumpram cumulativamente os requisitos previstos na regulamentação.

A gama de produtos bancários tornou-se o lugar privilegiado do progresso tecnológico. As transferências electrónicas de fundos continuam a constituir uma das mais importantes inovações tecnológicas, tendo em conta o impacte resultante na criação de novos produtos bancários e a melhoria no modo de gestão das instituições bancárias (CARMÓY, 1992). A utilização de transferências electrónicas de fundos registou uma crescente aceitação por parte das instituições e do público em geral. As suas aplicações têm sido constantemente enriquecidas de modo a proporcionar aos utilizadores um número crescente de operações e serviços, sendo cada vez maior o número de caixas automáticas e pontos terminais de venda.

Outro aspecto importante resultante da difusão das tecnologias de informação foi a restruturação operacional dos balcões dos bancos. Durante sucessivos anos, os bancos procuraram instalar o maior número possível de balcões, de modo a conseguirem uma maior proximidade do cliente e consequentemente, aumentarem as suas quotas de mercado. A ideia de expansão como forma de obtenção de vantagens competitivas com reflexo positivo nos níveis de rendibilidade pode actualmente ser conseguida através da simples instalação de uma máquina de pagamento automático e as funções administrativas associadas, afectadas directamente aos serviços centrais.

As incidências do progresso tecnológico tiveram um reflexo particular a nível da alteração da natureza dos custos. Este aspecto explica em grande parte a entrada no sector bancário de outro tipo de produtos e serviços pertencentes a sectores tão distintos como cadeias de supermercados, estações de serviço e outro tipo de empresas industriais ou de prestação de serviços.

16.5. – Síntese do capítulo

16. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DOS MERCADOS FINANCEIROS

- 16.1. Mercados e intermediários financeiros
- 16.2. Regulamentação
- 16.3. Desregulamentação
- 16.4. Inovação financeira

Este capítulo encontra-se estruturado em quatro pontos: mercados e intermediários financeiros; regulamentação; desregulamentação; e, inovação financeira. No primeiro ponto são revisadas as características gerais de um mercado financeiro e o conceito de intermediário financeiro. No segundo, analisaram-se as causas da necessidade de criação de medidas rígidas de regulamentação do sector, as quais se encontravam inicialmente relacionadas com a manutenção de adequados níveis de solvabilidade das instituições, eficiência dos mercados financeiros de modo a evitar problemas de informação assimétrica e preservação das regras de livre competitividade do sector. No terceiro ponto, abordaram-se as novas medidas de regulamentação do sector que procuram conjugar o grau de flexibilidade, necessário à adaptação do sistema financeiro, com as regras de prudência exigidas a um eficaz funcionamento das mesmas instituições. Finalmente, no último ponto foram analisados os efeitos do processo de internacionalização e liberalização dos mercados financeiros, que estiveram na origem de toda a alteração do modo de funcionamento das instituições financeiras, através do volume crescente de ins-

trumentos de crédito, da inovação e concepção de novos produtos financeiros e do desenvolvimento das tecnologias de informação que possibilitaram uma maior autonomização e velocidade de disponibilização dos novos instrumentos financeiros, quer a nível dos mercados tradicionais, quer a nível dos mercados dos novos produtos.

17. EQUILÍBRIO, EFICIÊNCIA E CAOS NOS MERCADOS DE CAPITAIS

O caos é um estado de vitalidade e ao mesmo tempo de declínio (CHORAFAS, 1994). Num ambiente dinâmico não podem existir condições de equilíbrio no processo de transição gradual que caracteriza as alterações entre mudança e ordem. Albert Einstein desafiou o conceito de equilíbrio baseado nos mecanismos newtonianos de que as condições gravitam em torno de um certo estado de estabilidade (CHORAFAS, 1994). O desafio lançado por Einstein viria a conhecer de facto, um grande incremento após a segunda guerra mundial, através do desenvolvimento de leis físicas que alteraram radicalmente as hipóteses de que os sistemas gravitam em torno da estabilidade.

Os mesmos princípios que caracterizam comportamentos caóticos e, consequentemente, instabilidade, são aplicáveis também a modelos económicos e a modelos da sociedade em geral. Os modelos de equilíbrio dos mercados, assentes no pressuposto de eficiência dos mercados em que os preços reflectem toda a informação actual e sobre os quais é possível prever acontecimentos futuros, embora tenham sido desenvolvidos e venham a ser aplicados há mais de 50 anos, apresentam como forte limitação à validação dos resultados apresentados, o facto de tratarem o tempo como uma variável controlável.

Se as leis de movimento de Newton puseram um fim à ideia de posição absoluta no espaço, a teoria da relatividade de Einstein colocou um termo à noção de tempo absoluto, isto é, não existe um tempo absoluto único; Pelo contrário cada pessoa tem a sua própria medida do tempo. Esta medida do tempo depende de onde se encontra essa pessoa e como ela se movimenta. Com estas duas contribuições, espaço e tempo tornaram-se entidades dinâmicas. Quando um corpo se movimenta ou uma força actua, afecta a curvatura do espaço e do tempo. Algo similar pode ser verificado no comportamento dos mercados financeiros (CHORAFAS, 1994).

O problema de fundo com a Economia não tradicional e a análise financeira, prende-se precisamente com abandono das equações muito simples, séries temporais elementares, e com a hipótese de distribuição normal em estatística. O domínio necessário é o de “capitalizar na ruptura” das outras ciências. E qual poderia ser o melhor campo de aprendizagem do que o da Física onde os conceitos de caos e complexidade tiveram origem? As teorias desenvolvidas pelos homens são simplesmente modelos de um universo ou de uma parte restrita dele. De uma forma geral, reflectem hipóteses num conjunto de regras que relacionam quantidades no modelo com observações e medidas obtidas. Tanto na Física como na Economia, estes modelos existem na mente humana e não têm qualquer outra realidade. No entanto, auxiliam no cálculo de previsões acerca de resultados futuros e de outras observações.

Na Física, por exemplo, quer num sentido microscópico quer macroscópico, matéria é qualquer coisa que tem massa “m” e ocupa um espaço físico, enquanto a energia é definida como a capacidade para gerar trabalho. O princípio de conservação da energia diz que nada pode ser criado nem destruído, mas pode ser convertido de uma forma a outra, ou seja, massa e energia são equivalentes. Este aspecto pode ser visto como antecessor dos mode-

los utilizados em Economia, dado que o melhor desenvolvimento matemático dos sistemas físicos muitas vezes serve como procedimento (CHORAFAS, 1994).

Laplace (1749-1827) foi o primeiro a assumir que há leis similares às leis físicas que governam tudo o resto, incluindo o comportamento humano. Esta crença foi mais aprofundada por Heisenberg famoso pelo *princípio de incerteza* – o qual é uma propriedade fundamental do mundo em que se vive. O estudo dos sistemas físicos ensinam, também, uma grande parte sobre descontinuidades e o seu impacto. Uma descontinuidade é um aparente salto em distância, o qual pode ser causado por um súbito acréscimo na dimensão do atrator principal (espaço de solução). As descontinuidades normalmente acontecem como resultado de uma crise interior. Uma vez que um grande salto ocorre, qualquer tentativa de elaboração de previsões com base em valores derivados de aproximações lineares estará, necessariamente, condenada ao fracasso. Esta situação aplica-se em muitos ramos da ciência e muito particularmente na Economia. A Matemática não linear sugere que há, de facto, infinitas possibilidades de descontinuidades, isto é pequenas combinações de factores que provocam saltos, embora muitos destes saltos possam ser de pequena magnitude.

17.1. Dinâmica não Linear e Complexidade

Em linguagem corrente pode definir-se uma situação complexa quando diversos componentes mantêm em comum o facto de interactuarem entre si. Como diz Pagels (1988), “*a complexidade é uma medida quantitativa que pode ser atribuída a um sistema físico ou a uma computação que se situem algures entre a ordem simples e o caos completo. Um cristal de diamante, por exemplo, com os seus átomos bem*

arranjados, é algo “ordenado”; uma rosa que possui uma combinação de ordem com aleatoriedade no conjunto das suas componentes, é “complexa”; o movimento das moléculas dos gases é verdadeiramente “caótico”. A complexidade cobre portanto, o vasto território compreendido entre a ordem e o caos.” (PAGELS, 1990).

Os progressos significativos registados em três direcções - investigação matemática de sistemas dinâmicos não-lineares; aplicações dos resultados matemáticos a análise de modelos de evolução de sistemas reais, entre os quais se englobam os modelos do campo da Física, da Biologia e da Economia, entre outros; e, a análise dos chamados *sinais experimentais*, i.e., séries temporais supostamente geradas por sistemas dinâmicos (desconhecidos) - têm contribuído para o crescente aumento de interesse pela Teoria do Caos. Este interesse centra-se fundamentalmente em duas vertentes. A primeira vertente assenta no facto de que comportamentos caóticos, embora nem sempre facilmente identificáveis, se verificam. A segunda vertente desenvolve-se a partir da análise de que o comportamento caótico dos sistemas dinâmicos pode ser descrito por um número relativamente pequeno de instrumentos matemáticos e por pesquisas de investigação de diferentes domínios científicos, que demonstram características de aplicabilidade independentemente do campo de investigação de origem ser a biologia, a física, a economia, etc.. Os modos de comportamento previstos resultantes de análises e de simulações numéricas dos modelos teóricos têm muitas vezes sido confirmados por experiências físicas em diferentes disciplinas, embora num número ainda não muito expressivo no campo da economia (MEDIO E GALLO, 92).

De facto, a explosão do interesse pela Teoria do Caos resulta da grande capacidade de aplicabilidade e interligação de desenvolvimento de conhecimento e experiências entre campos distintos da ciência. Inicialmente de âmbito puramente matemático, aplicado à astronomia e à geociências, a Teo-

ria do Caos registou um interesse exponencial com o aparecimento e aperfeiçoamento das tecnologias informáticas tendo rapidamente entrado em campos tão diversos como a Física, a Química, a Biologia e por último as Ciências Sociais e as Artes. A Teoria do Caos surge então, com o *objectivo de estudar o comportamento irregular de simples equações determinísticas*, proporcionando instrumentos mais sofisticados que expressam mais adequadamente a vida real (CHORAFAS, 1994). A ocorrência do caos determinístico dá-se sempre que se verifiquem equações não-lineares, isto é, a soma de quaisquer duas das suas soluções não constitui uma solução. Esta característica é essencial para a existência de caos determinístico.

Os termos linearidade ou não-linearidade referem-se simplesmente às propriedades das soluções das equações, ou seja, indicam se as soluções podem ou não ser adicionadas, obtendo novas soluções

17.2. A Hipótese de Eficiência de Mercado

A hipótese de eficiência de mercado tem sido dos conceitos de investimento financeiro mais debatido e testado. Esta hipótese tem como principal função justificar a utilização do cálculo de probabilidades na análise de comportamento dos mercados de capitais. Perante mercados que apresentem características de sistemas dinâmicos não-lineares a utilização da análise estatística padrão pode conduzir a resultados pouco ajustados à realidade. Esta questão realça a necessidade de reavaliação das hipóteses subjacentes à teoria do mercado de capitais.

Em mercados eficientes, os preços fixados reflectem toda a informação disponível, quer a informação pública, quer a informação que deu

origem ao estabelecimento dos preços verificados em períodos anteriores. Alterações de preço ocorrem apenas quando uma nova informação é recebida. Num mercado, eficiente a especulação não pode acontecer porque os preços reflectem toda a informação conhecida e deste modo os investidores acreditam que os preços são justos. Este pressuposto tem subjacente o comportamento racional dos investidores, duma forma colectiva os investidores sabem seleccionar a informação importante. Na posse da informação e avaliados os níveis de risco, a *consciência* colectiva de mercado determina o preço de equilíbrio.

Segundo a hipótese de eficiência de mercado, os rendimentos são independentes - variáveis aleatórias que seguem um *passeio aleatório*. Então, segundo esta hipótese, as alterações de preço que podem ocorrer no momento presente resultam unicamente de acontecimentos não esperados. Informações respeitantes ao período anterior reflectiram-se nos preços do período anterior e por isso não influenciam os preços do momento presente, donde os rendimentos do período anterior não estão relacionados com os rendimentos do período actual. Em síntese, a hipótese de eficiência de mercado diz que a informação passada não afecta a actividade de mercado, uma vez que toda a informação é pública e disponível. Deste modo, se é recolhido um número suficientemente grande de alterações de preço a distribuição de probabilidades torna-se numa distribuição normal ou quase normal, o que abre a possibilidade de aplicabilidade de um grande número de testes estatísticos e de técnicas de modelação conducentes a soluções óptimas no processo de tomada de decisão.

No entanto, a experiência das instituições financeiras evidencia o problema da volatilidade da correlação, a qual não pode ser estimada através dos instrumentos analíticos clássicos. Como resultado, e em contraste

com os primeiros 80 anos deste século, a análise do comportamento caótico evidencia as potencialidades de identificação de oportunidades de negócio.

A mais importante destas oportunidades prende-se com a compreensão dos movimentos dos mercados e com a previsão de alterações a curto prazo. Em substituição da análise clássica, das séries temporais como processos lineares, os estudos recentes recorrem à Teoria do Caos para examinar a informação contida em séries temporais e determinam os atractores multidimensionais, ou seja, espaços de solução que ajudem a definir o equilíbrio temporário do sistema. Este processo de análise através de espaços de solução ajuda na construção de campos vectoriais que possibilitem a elaboração de previsões a curto prazo permite identificar instabilidades periódicas e reduzir o número de acontecimentos não previstos, através da compreensão da estrutura na variação do espaço de fase.

Um conceito básico na relação do comportamento de sistemas dinâmicos é o da *bifurcação*. Em dinâmica não linear, esta identifica a cisão das possíveis soluções depois de uma dada situação - *fase crítica* (CHORAFAS, 1994). Uma fase crítica está ligada a valores de parâmetros de controlo, os quais apresentam um limiar em que a própria natureza do comportamento dinâmico muda. Numa bifurcação acontece por vezes que a soma da energia transportada pelos rastos resultantes se apresenta menor que o rastro original. Esta situação pode ser identificada através da intermutabilidade entre energia e matéria. O sistema pode bifurcar, como exemplificado nos eixos das coordenadas X e Y da figura seguinte, ou pode fazer a transição do comportamento da forma estável para a turbulenta e eventualmente caótica (CHORAFAS, 1994).

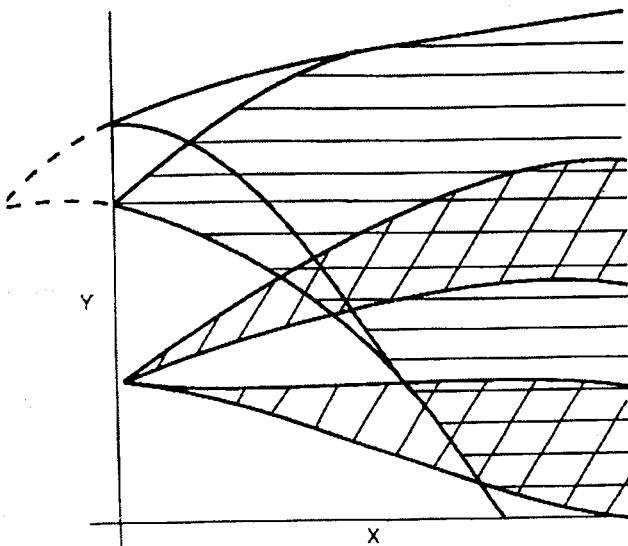


Fig. 17.1.: Diagrama de bifurcação e atractores caóticos

As aproximações não-lineares de curto prazo que recorram à utilização de atractores caóticos tornam possível prever o início de uma crise (momento decisivo), através da análise dinâmica das séries temporais identificando no início a próxima bifurcação *catastrófica*. Através da Teoria do Caos é possível descrever sistemas aparentemente aleatórios com recurso a regras simples, formulando modelos que gerem previsões mais correctas apesar da turbulência verificada.

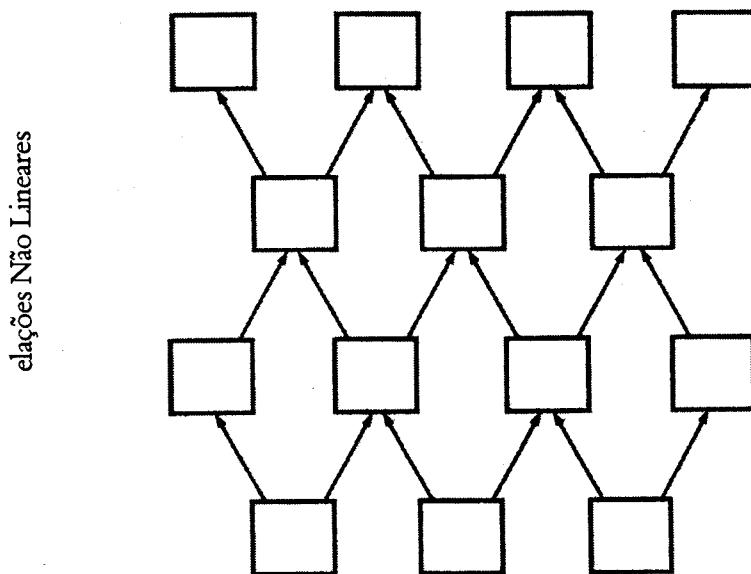
A implementação da teoria do caos na economia financeira resulta essencialmente dos espaços de solução de dinâmica não linear. Um sistema caótico pode produzir resultados aparentemente aleatórios, que não são contudo aleatórios, cada conjunto de valores é limitado dentro de um determinada região. As sucessivas bifurcações ilustradas na fig.17.1, exemplificam as descontinuidades que impedem previsões de longo prazo. Em cada região definida por uma dada bifurcação existe uma dependência sensitiva nas condições iniciais. O caos afecta todo o sistema que apre-

sente qualquer tipo de dependência sensitiva nas condições iniciais. Qualquer pequena alteração nas condições de um ponto de início, tornam a capacidade de previsão do modelo ou do comportamento com um elevado grau de dificuldade, senão mesmo impossível.

A análise financeira tradicional peca muitas vezes por não considerar que *alterações descontínuas exigem um tipo de pensamento descontínuo*. Pensar de uma forma descontínua é uma forma de considerar o improvável e mesmo o absurdo. Num período de transição de estabilidade para caos - e vice versa - não deve ser descurada nenhuma situação porque a descontinuidade é a regra e não o equilíbrio (CHORAFAS, 1994).

A fig. 17.2 ilustra o comportamento dos mercados e evidencia a infra-estrutura de um comportamento característico em sistemas não-lineares. Pequenas flutuações na base tecem uma malha e constituem uma estrutura que conduz a impactos significativos no topo.

O impacto pode ser significativo a nível de resistência final



Pequenas flutuações conduzem a grandes perturbações

Fig. 17.2.: Infra-estrutura

Os mercados financeiros mesmo que analisados de um modo superficial não apresentam modos de comportamento de ordem. Os mercados de capital e monetário são produtos de criação humana, característica que marca funcionamentos de ordem e de contra-ordem. De modo a compreender o funcionamento dos mercados gestores, os analistas financeiros, desenvolvem modelos estocásticos e determinísticos, os quais se baseiam em hipóteses simplificadas da realidade e que deste modo se tornam bastante limitativos, quer no respeita à compreensão de determinados

acontecimentos quer quanto à própria análise desses mesmos acontecimentos.

No período que decorreu entre 1920 e 1940 a análise de mercado foi dominada pela corrente fundamentalista, formados por seguidores de Graham e Dodd, e pela corrente tecnicista, ou analistas técnicos, seguidores de Magee. Durante a década de 50, surge uma terceira corrente denominada por corrente quantitativista, ou analistas quantitativos, os quais seguiam a doutrina desenvolvida por Bachelier. Naturalmente, os quantitativistas tinham maior simpatia por parte dos fundamentalistas que os tecnicistas, uma vez que os primeiros assumiam o comportamento racional dos investidores, enquanto os tecnicistas afirmavam que o mercado era conduzido por emoção ou *espírito animal* (PETERS, 1991).

As linhas de análise técnica são apresentadas no artigo de Roberts (1964) na antologia de Cootner. Roberts apela à dispersão da análise estatística, *as alterações verificadas nos preços comportam-se como os números que saem de uma roleta, cada saída é estatisticamente independente do passado histórico e as frequências relativas apresentam-se relativamente estáveis ao longo do tempo* (PETERS, 1991). Ainda segundo Roberts o *modelo de mudança baseia-se na independência* e as probabilidades *deverem ser estáveis ao longo do tempo*. A racionalidade na aceitação do modelo de mudança é a de que, se o mercado se comportasse como uma roleta imperfeita, os investidores notariam as imperfeições e actuariam directamente nele removendo essas imperfeições. O artigo apresentado por Roberts alargou o campo de investigação nestas áreas (PETERS, 1991).

Na mesma época em que surge o artigo de Roberts, um outro teórico, Osborne (1964), faz a divulgação de um artigo em que fundamenta

que os preços dos títulos seguem um *passeio aleatório* através de um movimento *browniano*. Segundo Osborne, o processo de alteração do preço dos títulos nos mercados de capitais pode ser comparado ao movimento de uma partícula num fluído, comumente denominado movimento *browniano*. Para demonstrar a situação exposta, coloca um conjunto de hipóteses e retira uma série de conclusões a partir dos resultados alcançados.

As primeiras duas hipóteses do modelo desenvolvido por Osborne, relacionam-se com o movimento dos preços mínimos e com o facto de que o número de transações diárias é finito, donde não significativo. Osborne, afastou-se no entanto destas duas hipóteses e concentrou-se num conjunto de hipóteses que se relacionam directamente com a percepção que o investidor tem quanto ao valor. Assim, a terceira hipótese do modelo assume que *preço e valor estão directamente relacionados* e, desse modo, determinam o rendimento do mercado. A hipótese quatro fixa que perante dois títulos com diferentes rendimentos esperados o investidor opta pelo título com maior rendimento esperado.

A quinta hipótese do modelo evidencia o princípio que compradores e vendedores assumem diferentes posições a negociar a menos que a possibilidade de lucro seja idêntica para ambos. Esta hipótese é a consequência lógica da conjugação das hipóteses três e quatro. Deste modo, um preço de equilíbrio geral ocorre porque quem investe está disposto a pagar o preço do exacto valor (hipótese três) e, dadas duas variáveis com diferentes valores esperados, os investidores seleccionam a que apresentar maior valor esperado (hipótese quatro). Como resultado, comprador e vendedor encontram o preço mutuamente vantajoso. Dito de outro modo, como quem investe tem capacidade para, de um modo racional, igualar preço e valor, o preço de equilíbrio é negociado com base na in-

formação disponível num determinado período de tempo. Desta forma, a sequência de alterações de preço é independente porque em cada momento o preço reflecte já toda a informação disponível.

Como conclusão, Osborne coloca a hipótese sete, a qual fixa que as alterações de preço seguem um *random-walk* (passeio aleatório), são independentes e, portanto, é de esperar que apresentem uma distribuição normal com média estável e variância finita, resultado do Teorema do Límite Central do Cálculo de Probabilidades, ou da Lei dos Grandes Números.

A teoria da eficiência do mercado foi desenvolvida a partir de vários testes demonstrativos de que a recolha e a análise da informação utilizada no estudo de rendibilidade dos activos nem sempre conduzia a ganhos adicionais no mercado de capitais (ELTON e MARTIN, 1984). Fama demonstra que num mercado eficiente, o preço dos títulos segue um passeio aleatório, o que delimita as oportunidades dos investidores traçarem uma estratégia de compra e venda, inviabilizando a possibilidade de realizar sistematicamente ganhos adicionais no mercados de capitais. Num mercado eficiente, toda a informação disponível é incorporada no preço dos títulos e nenhum investidor pode esperar ganhos monopolísticos ou adicionais no mercado de capitais resultantes da pesquisa ou negociação da informação (CAMPBELL, 1982).

Guerard e Vaught analisam a hipótese de mercado eficiente com base na teoria dos jogos de soma nula ou da rendibilidade esperada. O modelo de programação matemática do jogo de soma nula pode ser expresso em termos de preço de mercado, conjunto de informação e ganhos adicionais:

$$X_{j,t+1} = P_{j,t+1} - E(\tilde{P}_{j,t+1} | \phi_t) \quad (41)$$

em que:

$X_{j,t+1}$ = ganho adicional do título j no período $j+1$,

$P_{j,t+1}$ = preço do título j no período $t+1$,

$\tilde{P}_{j,t+1}$ = preço previsional do título j no período $t+1$,

ϕ_t = conjunto de informação no período t.

Em mercado eficiente os títulos podem sempre ser transaccionados a um preço justo, pelo que o valor actual da transacção efectuada é nulo, porque o dinheiro aumenta exactamente o valor actual da disponibilidade gerada (MYERS e MAJLUF, 1984). Desta forma, na presença de um mercado eficiente, o ganho adicional esperado resultante da aquisição de um título j no período $t+1$ será:

$$E(\tilde{X}_{j,t+1}) = 0 \quad (42)$$

Sendo $R_{j,t+1}$ o nível de rendibilidade do título j no período $t+1$, o acréscimo de rendibilidade $Z_{j,t+1}$ é dado por:

$$Z_{j,t+1} = R_{j,t+1} - E(\tilde{R}_{j,t+1} | \phi_t) \quad (43)$$

o que inviabiliza a possibilidade de obtenção (em média) de rendimentos acima do valor esperado de equilíbrio porque:

$$E(\tilde{Z}_{j,t+1} | \phi_t) = 0 \quad (44)$$

O processo de formação do preço num mercado eficiente reflecte que toda a informação disponível no momento t é utilizada correctamente na distribuição conjunta dos preços futuros (FAMA, 1976). Mas a eficiência de mercado por si não é testável, como Fama refere no seu artigo *Efficient Capital Markets: II.*, (FAMA, 1991). A eficiência de mercado apenas

pode ser testável conjuntamente com um modelo de equilíbrio e esta análise apenas permite identificar se a informação está correctamente reflectida no preço. Evidências anómalas no comportamento dos títulos denotam ineficiências de mercado ou um desajustamento do modelo de equilíbrio de mercado seleccionado. Segundo Fama, os testes de eficiência de mercado podem dividir-se em três categorias:

1. Testes de forma fraca (de que forma os rendimentos passados prevêem rendimentos futuros?);
2. Testes de forma semi-forte (com que rapidez os títulos reflectem a informação publicada?); e,
3. Testes de forma forte (existe alguma informação privada na posse dos investidores que não seja completamente reflectida nos preços de mercado?).

Nos testes de eficiência de forma fraca, o preço ou taxa de rendibilidade dos títulos em $t+1$ reflecte toda a informação contida na sucessão cronológica das taxas de rendibilidade passadas. Estes testes têm por base modelos de passeio aleatório de distribuições de probabilidades e de independência. Esta forma de eficiência de mercado levanta algumas dúvidas quanto à eficácia das técnicas de análise, uma vez que assume como factor determinante unicamente o comportamento histórico do preço. A verificar-se este pressuposto, então a melhor previsão do preço futuro de um título será o próprio o preço do título (FAMA, 1976). Informação adicional pode contribuir para melhorar previsões. No entanto, aquele tipo de informações não está incluído no conjunto de informação relevante para o teste de eficiência de forma fraca.

Os testes de eficiência de forma semi-forte sustentam que toda a informação pública disponível está incorporada no preço dos títulos. Nesta forma de eficiência, o preço dos títulos reflecte todos os acontecimentos como distribuição de dividendos, lucros, fusões e aquisições, alterações contabilísticas, entre outros. O objectivo deste tipo de testes centra-se na análise do modo como os preços incorporam, para além da informação histórica, a informação que é tornada pública. Tratam-se de testes que tentam avaliar as taxas de variação de rendimento em torno de um determinado acontecimento. O principal obstáculo encontrado na realização destes testes é a selecção que deve ser utilizada. No campo das fusões e aquisições os testes de forma semi-forte revelaram-se importantes e conduziram a resultados bastante concludentes para os potenciais investidores (GUE-RARD e VAUGHT, 1989).

Por último, a nível de testes de eficiência de mercado existem os testes de forma forte. A questão que se coloca neste tipo de testes é o da existência de participantes no mercado de capitais que partilhem a selecção de investimentos de modo que as suas decisões proporcionem melhores níveis de rendibilidade que as decisões de outros investidores. Se o mercado é eficiente, os preços dos títulos reflectem toda a informação e esta situação é excluída. Se se verificam diferenças nos níveis de rendibilidade então existem participantes no mercado que têm acesso a informação que não é utilizada (informação privada), ou estes indivíduos elaboram melhores avaliações da informação disponível. Neste caso, a informação é incorrectamente utilizada na avaliação da distribuição conjunta dos preços futuros, o que denota uma não eficiência de mercado. Estas situações podem conduzir à obtenção de mais-valias durante períodos mais ou menos longos, consoante o tempo que o mercado leva a corrigir estas distorções e consequentemente a incorporar a informação.

17.3. Teoria das Carteiras

Em simultâneo com o desenvolvimento da Teoria das Carteiras, Markowitz (1952) aplicou a distribuição dos rendimentos possíveis, como uma medida da variância, ou seja, como uma medida de risco da carteira. Formalmente, a variância da população é medida pela seguinte fórmula

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^{\infty} (r_i - r_\mu)^2 \quad (45)$$

onde σ^2 = variância

r_μ = rendimento médio

r_i = rendimento do título i

No limite poder-se-ia então, afirmar que a variância mediria a dispersão dos valores em torno do rendimento médio e a raiz quadrada da variância, desvio padrão, a probabilidade dos desvios dos rendimentos em relação à média. Quanto maior a dispersão em torno da média, mais elevado será, portanto, o desvio padrão e consequentemente o risco associado ao título em análise. A existência de variância implica rendimentos normalmente distribuídos. No entanto, se os rendimentos dos títulos seguem um passeio aleatório e as variáveis aleatórias são independentes e identicamente distribuídas (IID), então o Teorema do Limite Central de Cálculo ou (a Lei dos Grandes Números) dispõe a existência de uma distribuição normal e uma variância finita.

Os investidores escolherão então a carteira com maior rendimento esperado para um dado nível de risco. Espera-se que os investidores tenham um comportamento racional, isto é, espera-se que os investidores sejam avessos ao risco. Esta aproximação tornou-se conhecida como “eficiência média/variância”. A parte superior da curva denomina-se como “fronteira de eficiência” porque contém todas as carteiras com maior rendimento esperado

para um dado nível de risco, ou desvio padrão: os investidores seleccionarão estas carteiras óptimas, baseados no modelo de racionalidade do investidor.

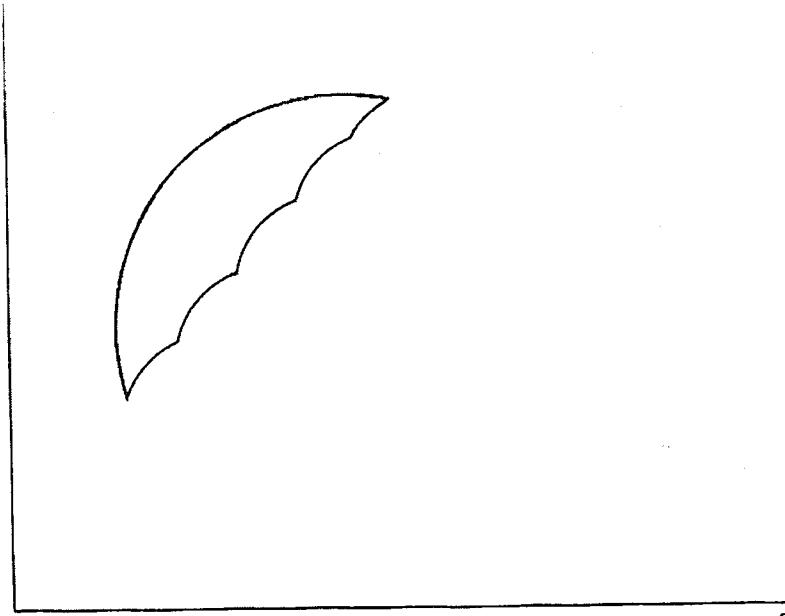


Fig. 17.3.: A fronteira de eficiência

Sharpe (1964), Lintner (1965) e Mossin (1966) baseados nestes conceitos desenvolveram o que viria a tornar-se conhecido como o CAPM (Capital Asset Pricing Model), nome dado por Sharpe. O CAPM combina a Hipótese de Eficiência de Mercados e o modelo matemático da Teoria das Carteiras desenvolvido por Markowitz, do qual resulta um modelo de comportamento do investidor baseado nas expectativas racionais num quadro de equilíbrio geral. Em síntese, as-

sume que os investidores têm expectativas acerca dos níveis de rendibilidade homogéneas, isto é, interpretam de igual modo a informação incorporada nos preços dos títulos. Enquanto modelo, assenta num conjunto de hipóteses simplificadoras de modo a dissociar o comportamento do investidor das restrições impostas pela sociedade. Situação aliás análoga ao que acontece com frequência, na Física, ao assumir a não existência de atrito no estudo de determinados fenómenos. Por outro lado, o CAPM admite que qualquer indivíduo pode contrair empréstimos a uma dada taxa de juro sem risco, normalmente a taxa dos títulos de tesouro a 90 dias. Finalmente, assume que todos os investidores desejam atingir a eficiência média/variância de Markowitz: procuram a carteira com o mais elevado nível de rendibilidade esperada para um dado nível de aversão ao risco e todos os investidores são avessos ao risco. O risco é de novo definido como o desvio padrão dos rendimentos e os investidores considerados racionais no sentido de Osborne e de Markowitz.

Baseado neste conjunto de hipóteses, o CAPM delineia um conjunto de conclusões sobre o comportamento do investidor. Primeiro, a carteira óptima para qualquer investidor resulta de combinações entre a carteira de mercado (capitalização ponderada de todos os activos com risco) e os activos sem risco. Este tipo de carteira é identificada na fig. 17.4.: a linha é tangente à fronteira de eficiência na carteira de mercado (M) com o intercepto (Y), taxa de juro r para activos sem risco. Os níveis de risco podem ser ajustados quer pela adição de activos sem risco para reduzir o desvio padrão da carteira, quer através de pedido de empréstimo para atingir a taxa do nível de rendibilidade da carteira de mercado.

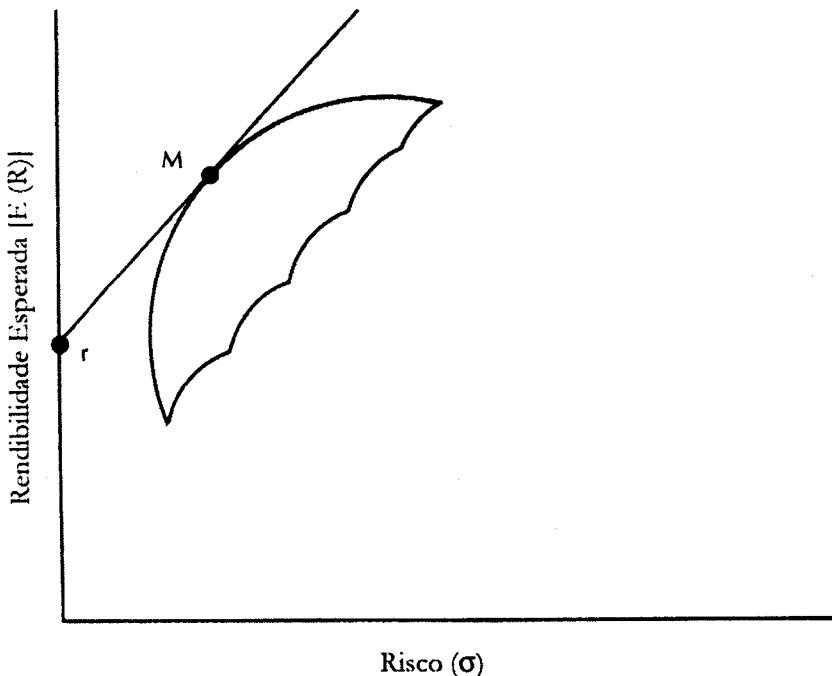


Fig. 17.4.: Linha de Mercado Capital

As carteiras que se ligam ao longo da linha formam a linha de mercado de capitais (Capital Market Line) e dominam as carteiras na fronteira de eficiência, os investidores preferem estas carteiras a todas as outras. Os investidores não têm qualquer recompensa quando não assumem algum risco de mercado, porque qualquer carteira óptima, dependendo esta do grau de aversão ao risco, situa-se ao longo da linha de mercado de capitais. O modelo fixa ainda, que quanto maior é o risco dos activos mais elevado deverá ser o nível de rendibilidade. Porque o risco é agora relativo à carteira de mercado, uma medida linear de sensibilidade do risco de um título em relação à carteira de mercado. Esta medida linear é denominada *coeficiente beta*. Se todos os

activos com risco forem representados num gráfico de coordenadas tendo como abcissa o coeficiente beta, como ordenada a rendibilidade esperada com um intercepto correspondente à taxa de juro de títulos sem risco no mercado de capitais, obtém-se a linha de mercado dos títulos, tal como se representa na Fig. 17.5..

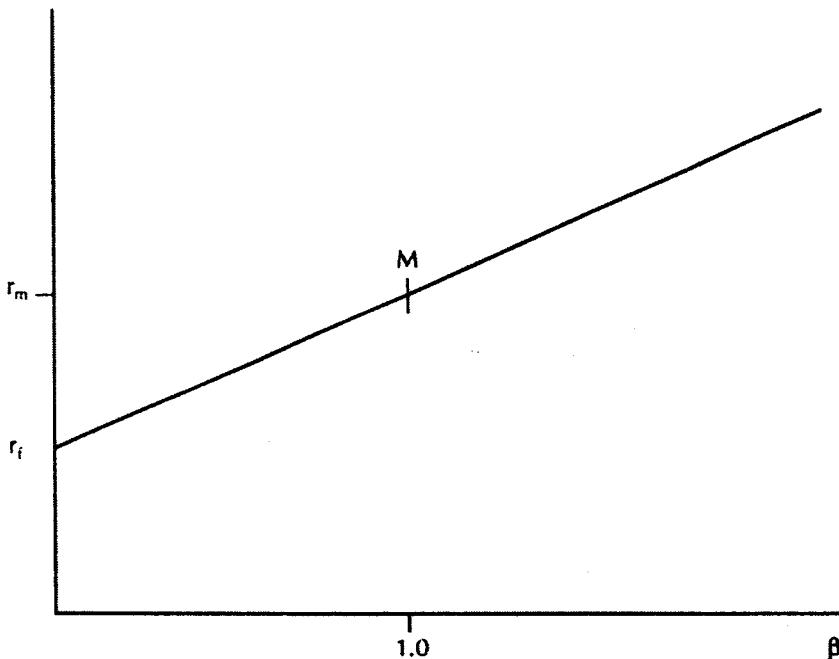


Fig. 17.5.: Mercado de Títulos com Rendimento Certo

Esta abordagem sobre o CAPM, necessariamente incompleta face aos extensos e múltiplos estudos efectuados sobre esta problemática, tem como objectivo central evidenciar a dependência do desvio padrão como medida de risco. Deste modo, o CAPM necessita de mercados eficientes e rendimentos apresentem uma distribuição normal, ou log-normal, porque se assume a existência de variâncias finitas.

O CAPM, permanece o padrão para qualquer modelo de comportamento do investidor. A Teoria das Carteiras de Markowitz explicou porque a diversificação reduz o risco e qual seria o comportamento dos investidores se estes mantiverem um comportamento racional. Os liberais necessitavam de ser convencidos de que segundo as hipóteses do CAPM, que eram hipóteses simplificadoras, não seria diminuída a utilidade do modelo. A hipótese de eficiência de mercado tornou-se largamente utilizada como uma hipótese racional da hipótese de Gaussian da distribuição de rendimentos log-normal. A fusão da Hipótese de Eficiência dos Mercados (EMH) com o CAPM e as modificações daí resultantes, tornaram-se conhecidas como a Moderna Teoria das Carteiras (MPT).

A Hipótese de Eficiência dos Mercados reforçou o MPT e a comunidade aceitou a variância e o desvio padrão como medidas de risco. Samuelson, Sharpe e Fama, entre outros, publicaram novos trabalhos alterando a Moderna Teoria das Carteiras para distribuições não normais. A evidência empírica continuou ao longo dos anos 60, a favor da Hipótese de Estabilidade de Pareto, de Mandelbrot, a qual diz que como os rendimentos não seguem uma distribuição normal, era necessário uma revisão da EMH e da MPT.

17.4. Novos Modelos Adaptados às Novas Situações de Desequilíbrio

Os modelos tradicionais de avaliação de activos financeiros simplificam a realidade assumindo um comportamento aleatório e ignorando a influência do tempo nos processos de tomada de decisão. O assumir desta

característica comportamental simplifica o problema e os modelos podem ser optimizados e encontrada uma única solução. A utilização do movimento aleatório, permite determinar “carteiras compostas de títulos ideais”, “valores intrínsecos” e “preços justos”.

17.4.1. A Análise R/S nos Mercados de Capitais

Esta análise é simples e directa, mas exige uma quantidade elevada de dados. Para proceder a análise utilizam-se logaritmos de rendibilidade:

$$S_t = \log (P_t / P_{(t-1)}) \quad (46)$$

onde S_t = logaritmo de rendibilidade

P_t = preço no período t

O primeiro passo consiste em converter as várias séries de preços, ou rendimentos, em logaritmos de rendibilidade. O segundo passo consiste em aplicar as equações (31) e (32) a vários intervalos de tempo, N. A série será então dividida em intervalos de tempo independentes, isto é, não sobrepostos, podendo deste modo ser considerados como observações independentes. Peters (1991) exemplifica esta situação considerando uma série de dados mensais de 40 anos, os quais são convertidos em 480 logaritmos de rendibilidade. Inicia a análise com intervalos de tempo de 6 meses, pelo que divide a série em 80 intervalos independentes de 6 meses. Pela aplicação de (31) e (32) determina a variação de cada um dos períodos. Cada intervalo apresenta uma nova escala pelo desvio padrão das observações em cada

período de 6 meses, obtendo-se 80 variações de R/S separadas. Pelo cálculo da média dessas 80 variações, obtém-se o valor R/S para a série com N=6 meses. A estabilidade do cálculo depende do número de observações: aumentos sucessivos de N podem comprometer o cálculo da média.

A existência da estatística de Hurst para os dados económicos deverá ser um factor especialmente perturbador para os economistas que confiam nos modelos económétricos. Os efeitos de longa memória restringem seriamente a variedade dos modelos económétricos, o que explica o pouco sucesso que os economistas têm tido ao fazerem previsões. Uma arte "subjectiva" demais ainda subsiste numa que se esforça por ser analítica" (PETERS, 1991).

Como já se analisou, os preços dos activos sofrem alterações com base na percepção que os investidores têm sobre o "valor justo". Os investidores valorizam os activos dentro de um intervalo de preço. Este intervalo é determinado, por um lado por informações fundamentais como os lucros, a gestão, os novos produtos e a própria conjuntura económica: esta informação permite determinar um único preço justo, utilizando uma análise fundamental. Por outro lado, o intervalo de preços é fixado pelo que os investidores pensam que outros investidores estarão dispostos a pagar. Este segundo factor é normalmente utilizado com recurso a uma análise técnica que determina um intervalo em redor do "valor justo". A tendência na avaliação de um activo resulta então da combinação entre informação e perspectivas dos investidores: condicionantes favoráveis conduzirão o preço até ao valor justo.

À medida que outros investidores vêem a tendência a confirmar a sua previsão positiva sobre o activo também vão querer adquirir. A actividade de ontem influenciou a de hoje, o mercado retém uma memória sobre a tendência recente. A tendência mudará quando o preço do activo atingir o intervalo superior do seu valor justo. Nesta altura a tendência muda. Com este modelo, o intervalo parece permanecer constante. Mas na verdade isto não se verifica. Novas informações sobre o activo em análise ou sobre o mercado em geral, podem alterar o intervalo e provocar inversões drásticas, tanto no mercado como no próprio activo.

Os altos e baixos do mercado estão relacionados com tendências com origem em factores económicos. Os índices bolsistas e a rendibilidade dos títulos do Tesouro apresentam ciclos semelhantes ao ciclo económico. O expoente de Hurst mede o impacto que a informação tem sobre a série. Um valor de $H=0,5$ implica a existência de um movimento aleatório, confirmando a Hipótese de Mercado Eficiente. Os acontecimentos de ontem não influenciaram os de hoje e os de hoje não irão influenciar os de amanhã. Os acontecimentos não estão correlacionados entre si: informações passadas já tiveram o seu efeito no mercado. Pelo contrário, H superior a 0,5 indica que acontecimentos actuais terão repercussões no dia de amanhã: a informação recebida hoje continua a ter efeito no mercado mesmo depois de ter sido recebida. Esta situação reflecte não uma correlação da série, em que o impacto da informação depressa enfraquece, mas uma função de memória mais longa: a informação pode ter impacto no futuro por períodos muito longos e atravessar diferentes escalas de tempo. O período actual influencia os períodos seguintes, o impacto enfraquece com

o tempo mas a uma velocidade inferior à da dependência de curto prazo.

A extensão do ciclo mede então a diminuição da influência de um único período ao ponto em que se torna impossível quantificá-la. Em termos estatísticos, é o horizonte temporal na série em que não se verifica correlação. As características de sistemas dinâmicos não-lineares dos mercados de capitais, que lhe conferem uma estrutura fractal, vai contra a Hipótese de um Mercado Eficiente e todos os modelos qualitativos derivados daquela hipótese. Estes modelos incluem o *Capital Asset Pricing Model* (CAPM), o *Arbitrage Pricing Theory* (APT) e o modelo de avaliação de *Black-Scholes*, tal como muitos outros modelos que dependem de uma distribuição normal e/ou de uma variância finita.

A estrutura fractal nos mercados de capitais permite a identificação de ciclos, tendências e muitos “valores justos” possíveis. Devolve aos mercados de capitais as qualidades que os tornam interessantes através dos aspectos qualitativos que advêm dos processos de tomada de decisão e concede-lhes atributos quantitativos passíveis de ser mediados.

17.4.2. Distribuições (Fractais) de Pareto

Diz-se que uma afectação é superior de Pareto ou preferida de Pareto em relação a outra, se pelo menos uma das partes a prefere e a outra gosta dela, pelo menos, da mesma maneira. Uma afectação óptima de Pareto é então aquela a partir da qual não existe nenhuma rea-

fecção possível que seja preferida por uma das partes e que seja, pelo menos indiferente para a outra parte. Este conceito foi introduzido pelo economista italiano Vilfredo Pareto, no século XIX. As afectações óptimas de Pareto são essencialmente aquelas a partir das quais deslocações mutuamente benéficas são impossíveis (FRANK, 1998).

As distribuições fractais denominadas vulgarmente por distribuições de Pareto-Levy ou distribuições estáveis de Pareto, são conhecidas desde 1925, como resultado de um estudo efectuado por Levy e baseado na distribuição de rendimento de Pareto (1897). Pareto verificou que uma distribuição log-normal se aproximava muito da distribuição de rendimento, excepto para, aproximadamente, 3% dos indivíduos com elevados rendimentos. Neste segmento, a distribuição de rendimento registava uma lei de tendência inversa, o que resultava graficamente numa base mais alargada. Levy pegou nas distribuições de base alargada e submeteu a uma só regra todas as distribuições de probabilidades, de modo a poder explicá-las.

Antes de entrar nas distribuições fractais, revêem-se algumas das características das distribuições normais. A curva de Gauss tem uma fórmula sendo o logaritmo da função característica da distribuição normal de uma variável aleatória t representado por:

$$\log f(t) = i^* \mu^* t - (\sigma^2/2)^* t^2 \quad (47)$$

onde μ = média

σ^2 = variância

Numa distribuição normal padrão, a média é zero e desvio padrão igual a 1. Porque a distribuição é aplicada quando t é uma variável

aleatória, independente e igualmente distribuída ou seja, percorre um movimento browniano e aleatório.

Bachelier defendeu a hipótese de que os mercados especulativos seguem um movimento aleatório e podem ser modelados como jogos de azar. A Hipótese Gaussiana de Bachelier continua a ser adoptada, apesar da demonstração empírica evidenciar anomalias diferentes do movimento aleatório. Em particular, as frequências de distribuições de rendimentos encontraram, de forma consistente, um número superior ao que seria expectável, assim como um número superior de observações em torno da média (Fig. 17.6). A distribuição tem uma base mais alargada e um pico superior ao da distribuição normal. Apesar destas características a distribuição é frequentemente descrita como aproximadamente normal. Esta distribuição é a forma característica de uma distribuição de Pareto.

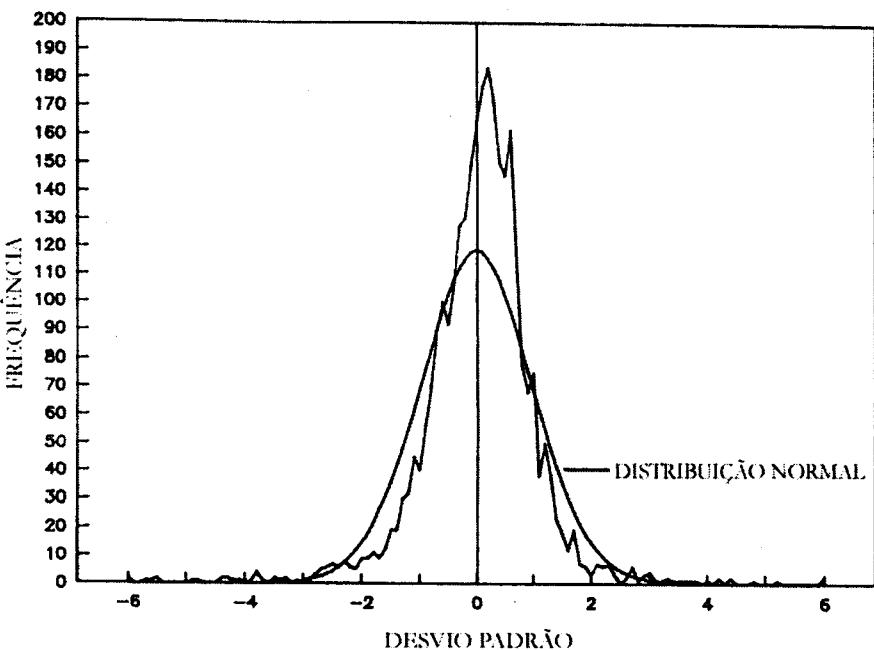


Fig. 17.7.: Distribuição de Frequências: Normal e Não Normal

Levy resumiu a função característica das distribuições de probabilidades à seguinte fórmula:

$$\log f(t) = i^* \delta * t - \gamma |t|^{**} (1 * i^* \beta * (t / |t|)^*) \tan(\alpha * \pi / 2) \quad (48)$$

Esta fórmula tem quatro parâmetros característicos: (i) δ parâmetro de localização da média; (ii) γ parâmetro de escala, permite ajustar a diferença entre dados diários e semanais, por exemplo; (iii) β medida de desvio, o seu valor encontra-se compreendido entre -1 e +1, quando $\beta=0$ a distribuição é simétrica, a distribuição apresenta um grau de desvio para a direita tanto maior quanto β se encontra mais próximo de +1, a transposição verifica-se para $\beta < 0$ (iv) α mede

o pico da distribuição e o alongamento da base, α pode assumir valores entre 0 e 2 inclusive, quando $\alpha=2$ a distribuição torna-se equivalente à distribuição normal.

Segundo a Hipótese de Eficiência de Mercado, α terá de ser sempre igual a 2. A Hipótese de Mercado Fractal, pelo contrário, estabelece que α está compreendido entre 1 e 2. Esta é a diferença fundamental entre as duas hipóteses de mercado. Contudo, ao alterar o valor de α , vão ser alteradas as características da série temporal. As distribuições de Pareto são consideradas séries fractais porque são estatisticamente semelhantes entre si no que respeita ao tempo. Se uma distribuição de preços diários apresenta uma média (m) e $\alpha=a$, a distribuição de rendimentos referente a cinco dias terá média 5^*m e α manter-se-á igual a a . Após o ajustamento feito à escala de tempo, a distribuição de probabilidade mantém a mesma forma. Diz-se, então, que a escala é invariante e o mesmo se aplica quando $\alpha=2$, porque a distribuição normal é um caso particular das distribuições fractais. Contudo, quando α é diferente de 2 as características da distribuição mudam.

Quando $1 \leq \alpha < 2$, a variância torna-se indefinida, ou infinita. A variância é finita e estável apenas para $\alpha=2$. Deste modo, a variância da amostra é uma informação importante apenas se o sistema registar um movimento aleatório. Caso este não se verifique, as variâncias infinitas são possíveis. Donde, se α for diferente de dois, as variâncias das amostras não têm significado como medidas de dispersão do risco. Se $0 < \alpha \leq 1$, não existe média estável, os α 's são raros neste intervalo. Contudo, se $1 < \alpha \leq 2$, encontra-se uma média

estável, os α 's fraccionários neste intervalo, correspondem a um movimento fraccionário, caracterizados por correlações de longo prazo e uma semelhança estatística entre si: são fractais, sendo α a dimensão fractal da série temporal - $\alpha = 1/H$, onde H é o expoente de Hurst.

As distribuições fractais têm outras duas características interessantes. Mandelbrot classificou a variação em dois tipos de efeitos, comuns à economia, a que chamou “efeito de Noé” e “efeito de José”.

O “efeito de Noé” significa descontinuidade. Quando uma quantidade varia, pode mudar com rapidez quase arbitrária. Os economistas consideram, tradicionalmente, que os preços variam continuamente – rápida ou lentamente, conforme os casos, mas continuamente no sentido em que passam por todos os valores intermédios na sua deslocação de um ponto para outro. No entanto, os preços podem variar por saltos instantâneos, tão rapidamente como uma informação que surge num teletipo e vai influenciar decisivamente a posição de um milhar de corretores. O “efeito de José” significa persistência. “Vieram sete anos de grande abundância para as terras do Egípto. E vieram depois sete anos de fome”. A lenda bíblica, de um modo simplista, simboliza a periodicidade da persistência das enchentes e secas. Não obstante o acaso subjacente, por muito que um lugar tenha sofrido uma escassez, o que é provável é que venha a sofrer mais. A análise matemática das cheias do Nilo mostra que a persistência se verifica ao longo de séculos como de décadas. Os “efeitos de Noé e de José” puxam em direcções diferentes, mas concor-

rem conjuntamente para: as tendências são reais na Natureza, mas podem desaparecer tão depressa como surgem (GLEICK, 1994).

As grandes mudanças que ocorrem nas distribuições normais são devidas ao elevado número de pequenas mudanças. Considera-se que a avaliação é contínua. Esta ideia de avaliação contínua fez com que o seguro de carteira se tornasse numa opção estratégica de gestão de capital. A ideia foi, ao utilizar de forma continuada o modelo de avaliação de Black-Scholes (ou alguma variante), que o investidor pudesse rapidamente, repetir uma escolha, como sendo uma opção de venda, através da permanente reavaliação de benefícios entre a aquisição de activos com risco e dinheiro vivo.

Este método seria aceitável enquanto a avaliação se mantivesse contínua ou, pelo menos, quase. Contudo, numa distribuição fractal, as grandes mudanças têm lugar através de um pequeno número de grandes mudanças. As grandes alterações de preço podem ser descontínuas e abruptas. Uma distribuição fractal do mercado de títulos explicaria porque os acontecimentos de Outubro de 1987, ou de 1978, ou de 1929 puderam ocorrer. Nesses mercados, a falta de liquidez deu origem a avaliações rápidas e descontínuas, tal como previsto pelos modelos fractais.

17.5. Mandelbrot e os Mercados Especulativos

Mandelbrot presumiu que os mercados especulativos eram fractais, mesmo antes de ter desenvolvido a sua geometria fractal. Para Mandelbrot, as distribuições de Pareto eram exemplos de escalas, mais na economia do que na natureza. No princípio do anos 60, ele defendeu a ideia

da variância infinita das distribuições, mas foi derrotado a favor da Hipótese de Eficiência de Mercado, o alicerce da Teoria do Mercado de Capitais.

As distribuições de Pareto foram praticamente esquecidas na economia financeira. Aceitar estas distribuições significava renunciar a uma grande área de trabalho baseada em relações lineares e variâncias finitas, para além de que as variâncias infinitas apresentavam implicações de extrema complexidade do ponto de vista matemático. Para os analistas financeiros, defensores da Hipótese de Eficiência de Mercado, não tinham sido detectadas anomalias que justificassem o abandono do modelo. Contudo, estas anomalias cedo surgiram e de entre elas, a mais evidente era a de que a distribuição de rendimentos no mercado de acções não seguia uma distribuição normal. De uma forma consistente, apresentava um pico mais elevado na média e uma base mais alargada do que a distribuição normal, assemelhando-se a uma distribuição clássica de Pareto. Além desta, outras anomalias foram detectadas na Hipótese de Eficiência de Mercado concretamente o *January effect*, o efeito *small stock* e o efeito de baixo P/E. Diversas estratégias foram ensaiadas no intuito de provocar rendimentos extra sem que contudo provocassem um aumento na volatilidade a um nível significativo. Finalmente, o aparecimento de computadores pessoais com grandes capacidades de armazenamento e processamento de dados vieram permitir a análise R/S do mercado de capitais.

A análise R/S aplicada ao mercado de capitais exige a disponibilidade de um longo período de dados económicos com o mais elevado pormenor possível. O primeiro passo consiste numa análise de Hurst a todo o período de tempo que contém os referidos dados. A análise R/S é então aplicada a iguais incrementos de tempo, contíguos e independentes,

de modo a testar a estabilidade de H em diferentes períodos de tempo e em diferentes condições económicas. A estabilidade revelada pelo expoente de Hurst é, nitidamente, uma das mais estáveis estatísticas que podem ser calculadas para o mercado de acções, em particular quando comparado com o desvio padrão.

Outra propriedade das distribuições estáveis é a de que, depois do seu ajuste à escala, mantêm as propriedades estatísticas depois de somadas. Por exemplo, se as séries de alterações de preços diárias, para um período de dez dias, fossem normalmente distribuídas, com uma média (m) e uma variância (σ^2), então as alterações de preços deveriam ser normalmente distribuídas com uma média ($10 \times m$) e uma variância ($10 \times \sigma^2$).

Se a distribuição diária fosse distribuída de forma fractal, então as alterações referentes a 10 dias teriam uma média ($10 \times m$) mas a variância seria instável. O valor de H para rendimentos referentes a 10 dias seria o mesmo que para rendimentos diários. Nesta análise, a importância reside não tanto na quantidade de dados disponíveis, mas sim na quantidade de ciclos que os dados encerram. Esta situação é bastante diferente de uma análise estatística padrão, na qual o número de conjuntos de dados é mais importante do que a extensão de tempo que está a ser analisada. Naturalmente tem que se ser bastante cauteloso quanto aos padrões escolhidos para serem aplicados à análise não-linear. O método padrão para encontrar muitos conjuntos de dados só é útil para o processo de análise quando as observações são independentes e identicamente distribuídas (IID).

Os sistemas não lineares têm uma linha de tempo. O tempo não pode ser revertido e a extensão do tempo é mais importante do que a estabilidade dos dados. O aumento da estabilidade torna a análise frequen-

temente mais difícil, sem que, contudo, seja melhorada a validade dos resultados. A maioria dos mercados de capitais tem de facto um comportamento fractal. As séries temporais fractais são caracterizadas como processos de longa memória, encerram ciclos e tendências e são o resultado de um sistema dinâmico não linear, ou caos determinístico. A informação não se reflecte imediatamente nos preços, tal como determina a Hipótese de Mercado Eficiente, manifestando-se, em vez disso, como uma influência nos rendimentos. Esta influência avança indefinidamente apesar de o sistema poder perder a memória das condições iniciais. Um sistema dinâmico evidencia uma dependência sensível às condições, as quais se tornaram na particular característica destes sistemas.

Estes sistemas são inherentemente imprevisíveis a longo prazo. A imprevisibilidade acontece porque os sistemas dinâmicos são sistemas de retroacção. O que sai, volta a entrar, é transformado e sai e assim sucessiva e infinitamente. Os sistemas de retroacção assemelham-se ao sistema de juro composto, excepto pelo facto de que a transformação é exponencial.

Mandelbrot verificou que a variância, na análise de séries temporais económicas, não aumenta como deveria, o que significa que a própria volatilidade é instável. De acordo com a Fractal Market Hypothesis a variância ou a sua raiz quadrada (desvio padrão) é indefinida e por isso não tem uma média ou dispersão estável própria. A volatilidade deveria ser anti-estável. A aplicação da anti-estabilidade, obtém-se aplicando a análise R/S à volatilidade

17.6. Caos e Turbulência nos Mercados de Capitais

A teoria do caos e as implicações nas previsões financeiras têm sido profundamente debatidas nos mercados financeiros. As séries financeiras, potencialmente extensas e claras, permitem facilmente a realização de estimativas e testes. Também, o ganho potencial de previsão do preço dos títulos e das séries de taxas de câmbio de moeda estrangeira têm desenhado um quadro de interesse. Na questão do caos os resultados frequentemente encontram uma forte evidência de dependência não linear, mas não são convincentes da evidência de uma dinâmica caótica (LE BARON, 1997).

A questão de se saber se as séries financeiras são de facto caóticas pode não ser de grande importância para um analista financeiro que apenas está interessado no ajustamento de estratégias dinâmicas de negócio de acordo com a aparente previsibilidade das séries temporais. O facto de que os diagnósticos previamente mencionados identificam todos algum tipo de estrutura não linear deve ser um indicador perturbador para os analistas financeiros (LE BARON, 1997).

Com efeito, a metodologia de aplicação da Teoria do Caos aos mercados de capitais ainda se encontra a dar os primeiros passos. De qualquer forma, já permitiu novas percepções sobre o funcionamento dos mercados, embora ainda seja cedo para se fazerem previsões. É expectável que à medida que a natureza dinâmica dos mercados de capitais seja mais bem compreendida, que surjam novos desenvolvimentos teóricos acerca dos mercados.

Ao longo deste ponto serão analisados diversos aspectos que evidenciam que os mercados são sistemas dinâmicos não lineares. Em conjunto com a análise R/S, esta evidência dá uma imagem convincente dos mercados de capitais como sendo sistemas dinâmicos não lineares. Para encontrar os factos que conduzem à verdadeira natureza dos mercados de capitais e identificar o que determina as variações de preços, recorre-se, normalmente à Teoria do Caos.

Embora date dos finais do século XIX, a Economia e a análise de investimentos, só muito recentemente começaram a ter em atenção a Teoria do Caos. As implicações da Teoria do Caos fazem com que as técnicas se tornem controversas. Em síntese, um sistema caótico pode dar origem a resultados aparentemente aleatórios, mas que não o são verdadeiramente. As previsões a longo prazo tornam-se impossíveis. Segundo a Teoria do Caos, os mercados não são eficientes, mas também não são previsíveis.

17.6.1. Dados sem inflação

Na análise efectuada por Peters (1991), foram sempre utilizados os rendimentos, isto é a variação percentual dos preços, em vez dos preços em si. Os preços não são adequados à regressão linear uma vez que estão correlacionados em série. Cada preço está relacionado com o preço anterior, violando assim os princípios necessários para que a análise de Gauss funcione. Peters (1991) tenta fazer a previsão do comportamento dos preços, utilizando os rendimentos, o que permite que os dados se tornem adequados para a aplicação da análise linear e para os requisitos de independência que a acompanham.

A variação percentual dos preços poderá não ser a série de tempo adequada para a análise de sistemas dinâmicos não-lineares. Reabilita os dados mas elimina a dependência em relação à série, que pode ser uma evidência através da oscilação de uma estrutura dependente não linear. Quando os cientistas estudam a turbulência nos sistemas naturais, o espaço de fase consiste em dados observados, não das taxas de alteração das variáveis. As finanças e a economia têm já uma longa tradição na utilização dos rendimentos. Ao estudar os mercados como sistemas dinâmicos não-lineares, têm de estabelecer novos padrões. Os rendimentos não são uma transformação apropriada dos preços no estudo dos sistemas dinâmicos não-lineares (PETERS, 1991).

A utilização dos preços envolve um problema diferente. Os valores dos bens aumentam com a economia e com a inflação. Os preços continuarão a subir unicamente por causa da inflação, mesmo na ausência de reais perspectivas de crescimento. Os preços podem e sobem sem limitações. Um espaço de fase de preços nominais iria simplesmente formar uma espiral ascendente. Esta análise não passa de um exercício inútil, porque o importante é anular a inflação dos preços com vista ao crescimento, uma vez que o que interessa é a movimentação dos preços e não o crescimento inflacionário.

As reconstruções dos espaços de fase não são gráficos “técnicos” relacionados com análises técnicas. Pelo contrário, eles são os dados base que permitem descobrir as características necessárias para definir os mercados como sistemas dinâmicos não lineares. Com os dados sem inflação é então possível a sua utilização na reconstrução de

espaço de fases, tendo em vista o cálculo de dimensões fractais e exponents de Lyapunov.

17.7. Síntese do Capítulo

17	EQUILÍBRIO, EFICIÊNCIA E CAOS NOS MERCADOS DE CAPITAIS
17.1.	Dinâmica não Linear e Complexidade
17.2.	A Hipótese de Eficiência de Mercado
17.3.	Teoria das Carteiras
17.4.	Novos Modelos Adaptados às Novas Situações de Desequilíbrio
17.4.1.	A Análise R/S nos Mercados de Capitais
17.4.2.	Distribuições (Fractais) de Pareto
17.5.	Mandelbrot e os Mercados Especulativos
17.6.	Caos e Turbulência nos Mercados de Capitais
17.6.1.	Dados sem inflação

As aproximações lineares de curto prazo que empregam atractores caóticos tornam possível a previsão de crises incipientes. Estas crises são detectadas pela análise dinâmica das séries temporais nas proximidades do início das bifurcações caóticas. É nesta situação que surge a Teoria do Caos como instrumento poderoso de suporte aos processos de tomada de decisão, o que possibilita que sistemas aparentemente aleatórios possam, de facto, ser descritos por regras simples e ser então, previsíveis.

O objectivo principal centra-se então no desenvolvimento de modelos que gerem previsões mais exactas, apesar da turbulência prevalecente. Isto é factível contanto que se tenham modelos não lineares delineados directamente a partir de séries de dados. A intenção é aplicar previsões mais adequadas aos mercados e instrumentos financeiros, que apontem para um grau de significância mais elevado em termos de previsibilidade: A tentativa de integração da Teo-

ria da Complexidade e o progresso tecnológico nos sistemas de negócio não é nova. O que é novo é a introdução de novos instrumentos que começam agora a ser utilizados e que tornam a complexidade admissível.

A implementação da Teoria do Caos nas transacções financeiras segue, essencialmente, as dinâmicas não lineares da solução de espaços, as quais não são contudo verdadeiramente aleatória, estando cada pilar de valores, limitado dentro de uma determinada região. Esta situação aparenta um comportamento estocástico, ao mesmo tempo que inviabiliza as previsões de longo prazo. As dinâmicas não lineares não descrevem só como os sistemas complexos mudam. Sugerem também que uma mudança numa entrada tem, possivelmente, um efeito maior do que a proporção do todo. O caos afecta qualquer sistema com algum tipo de dependência sensitiva às condições iniciais, seja ele um mercado financeiro ou uma previsão meteorológica. Qualquer pequena mudança ou incerteza nas condições de um ponto de partida tornarão as previsões sobre o comportamento extremamente difíceis, senão mesmo impossíveis. A razão pela qual muitos analistas financeiros falham, situa-se no modo de análise de mudanças descontínuas, as quais exigem um tipo de pensamento descontínuo. Este tipo de pensamento nunca se tornou popular nem entre os matemáticos nem nas teorias clássicas.

A recente apreciação de que os sistemas natural e humano são caracterizados por muitas descontinuidades, não muda teoricamente nada, excepto a maneira de pensar. Mas do ponto de vista prático,

este modo de pensar afecta tudo, inclusive o próprio desenvolvimento económico. O pensamento descontínuo pode ser encarado como um convite a considerar o desconhecido e até mesmo o absurdo. Nesta forma de abordagem dos problemas, nada deve ser omitido no período de transição da estabilidade para o caos - e vive versa - quando as discontinuidades, não o equilíbrio, são a regra.

O conceito básico sublinhado é de que o mundo não é ordenado, o que é verdade tanto para os sistemas financeiros como para todos os outros sistemas desenvolvidos pelo homem e para os próprios sistemas naturais. Os mercados financeiros não são ordenados mesmo que superficialmente, dentro de um período limitado aparentem um comportamento ordenado. Os mercados monetários e de capitais são criações humanas, daí resulta a dificuldade de compreensão do seu modo de funcionamento. Precisamente, numa tentativa de compreensão, os agentes e analistas financeiros procedem a simplificações da realidade.

Modelos determinísticos e estocásticos têm vindo a ser utilizados e melhorados no desempenho de conjecturas, mas os pressupostos que os fundamentam constituem, grande parte das vezes, simplificações da realidade, o que provoca desajustamentos face a essa mesma realidade.

Trabalhando apenas através de conjecturas ou de modelos simples, os economistas têm sido levados a cometer sérios erros de previsão, os quais contêm em si um efeito de repercussão.

Os economistas e analistas financeiros, porque compreendem que as simplificações conduzem a negligenciar o problema da informação, tendem a comportar-se como um grupo em torno de pontos referenciais. Isto não é uma forma de tomar em consideração as descontinuidades e bifurcações embutidas nas situações da vida real, ainda porque: (i) as previsões mesmo quando correctas, são relevantes num curto espaço de tempo; e (ii) uma pequena alteração numa única variável tende a ter um muito maior impacto do que sugere a teoria clássica

A análise econométrica clássica assume que se não há influências exógenas, logo, o sistema está parado. Os factores internos ou endógenos estão em não equilíbrio. Pela hipótese que a oferta iguala a procura, um mercado eficiente toma lugar. Nada podia estar mais longe da verdade.

Ambos os factores endógenos e exógenos podem afastar um sistema financeiro para longe do equilíbrio. Como o mercado reage, move-se para longe das condições estáveis associadas com a ordem emeticulidade. O desequilíbrio em vez do equilíbrio são as propriedades características das organizações complexas e, tanto os mercados como os sistemas vivos, se comportam desse modo.

Os mercados financeiros são estruturas dinâmicas, evolutivas que não respondem para procurar controlar a economia e conservá-la em equilíbrio. Pelo contrário, o objectivo consiste em planejar por me-

norizadamente o que há tornando as previsões de curto prazo possíveis

Uma vez que o comportamento dinâmico é uma característica dos mercados de capital e monetário, verifica-se a necessidade de modelos capazes de representar - sem simplificações indevidas - sistemas desordenados que se movem por encaixes ou começos, sublinhando que turbulência é fluxo, o qual envolve forma e mudança, movimento e estrutura.

Os sistemas complexos não são inherentemente eficientes. Pelo contrário, eles podem simultaneamente dar origem a turbulência e coerência.

A turbulência nos fluidos pode ter alguma coisa a ver com o infinitamente complicado espaço de solução, a que David Ruelle chamou atrator estranho.

Um atrator estranho é um retrato matemático da ordem dentro de um ambiente caótico. É um espaço de solução que traça o comportamento de um sistema complexo ao longo do tempo, revelando como é atraído para um estado ideal - essencialmente giratório em torno de ele. O mesmo ponto de vista pode ser aplicado à tecnologia de informação. Como um sistema se torna caótico, gera uma série estável de informação. Em virtude da sua imprevisibilidade, cada nova observação é uma nova entrada. O canal transmitindo informação para cima é um atrator estranho. No domínio dos atractores estra-

nhos, pequenas incertezas iniciais são ampliadas em grandes modelos. As condições iniciais podem ser devidas à aleatoriedade.

Fazer previsões sob estas condições é tentar conjecturar a evolução da forma no espaço e no tempo. Este conceito tem um significado prático importante porque se pode pensar em fluxos de diversas formas, inclusive fluxos na economia e em finanças: Em primeiro lugar, tais fluxos podem ser lineares; Em segundo lugar podem bifurcar para um estado complexo, donde podem oscilar; e, finalmente, podem ser caóticos.

Os fluxos dinâmicos são caracterizados por uma universalidade de formas com similaridades e não similaridades entre as escalas. Fluxos dentro dos fluxos são parte e parcela dos sistemas dinâmicos nos mercados dinâmicos, entre outros domínios. Os analistas financeiros que compreendem a teoria do caos, olham os atractores estranhos como máquinas de informação. O seu domínio é caracterizado por ordem e desordem. A percepção humana da natureza desafia a medir a entropia do sistema.

A ordem de facto chega fora dos processos comportamentais complexos, através de sucessivas transições. A Teoria do Caos e outras técnicas de modelização pretendem representar as transições: Para sistemas dinâmicos com atractores simples, o espaço de solução pode conter no seu modo de funcionamento informação que torne o caos previsível; e, é sempre importante saber em avanço quando as

catástrofes podem ocorrer, de modo a preparar as possíveis consequências.

18. CONCLUSÃO DA TERCEIRA PARTE

EQUILÍBRIO OU TURBULÊNCIA

Os conceitos newtonianos, determinísticos, ofereciam uma visão mecanicista do mundo, em que o tempo era reversível e tudo funcionava com o mesmo grau de certeza a que a mecânica de um relógio nos habituou a confiar. O pensamento, em geral, e o económico em particular, foram influenciados durante séculos pelas concepções devidas a Newton e seus seguidores.

Adaptada à realidade conhecida no século XVIII, a perspectiva newtoniana foi adoptada pelos pioneiros da Economia científica, como Adam Smith e Stuart Mill. A adopção do modelo newtoniano legou à Economia uma série de instrumentos analíticos que se tornaram toda-via, desadequados face às realidades resultantes da complexificação da evolução económica e, mais recentemente da globalização.

Com efeito, a formulação da Lei de Evolução das Espécies, por Darwin, fez ruir o conceito de tempo reversível e, indirectamente alastrou, a outros campos da ciência, o conceito de evolução. Na Economia os “novos” ventos do pensamento dinâmico, contaram com economistas

seguidores de Marshall que lançaram as bases dos conceitos evolucionistas.

Todavia, só com o desenvolvimento das Tecnologias de Comunicação e a difusão de informação que elas potenciam, os mercados regionalistas estabeleceram os canais de comunicação entre si, canais que evoluíram progressivamente para “auto-estradas” e conduziram à globalização dos mercados que actualmente se conhecem. Como se viu, a globalização oferece condições propícias aos desenvolvimentos dos fenómenos de turbulência, nos quais a incerteza afecta os processos de tomada de decisão. Concomitantemente ao progresso das tecnologias de comunicação e de informação assistiu-se ao desenvolvimento das tecnologias de cálculo informático, as quais suportam o tratamento dos dados numéricos com as exigências impostas pela Teoria do Caos e pela Geometria Fractal.

Em suma, pode-se encarar esta evolução como um salto entre duas situações extremas. Uma, a que caracterizava o século XVIII, onde os fenómenos obedeciam a leis determinísticas e em que, conhecidas as condições de partida se tinha a certeza do comportamento dos fenómenos e dos resultados a obter. O tempo era reversível o que conferia ao mundo a mesma perspectiva de estabilidade que os astrónomos observavam nas órbitas dos planetas. A Geometria euclidiana e o cálculo diferencial ofereciam os instrumentos suficientes para a análise dos fenómenos e a previsão dos resultados.

Na outra situação extrema pode-se situar o mundo de hoje. A potência dos sistemas de informação e comunicação aproximaram culturalmente os povos, esvaneceram fronteiras, incrementaram as permutas de toda a ordem e conduzem à tão falada globalização. Estas novas condições são indutoras de turbulência, regime em que o processo de tomada de decisão está longe das situações de certeza, cómoda, de há três séculos atrás. Sabe-se que nestas condições a matemática da Teoria do Caos e a Geometria Fractal constituem recursos de que os decisores têm de fazer uso nos seus processos de delineamento estratégico e de tomada de decisão.

Entre estas duas situações extremas evidencia-se a invenção de tecnologias de comunicação e o extraordinário desenvolvimento não só destas mas também das tecnologias de informação, bem como das tecnologias de computação científica. Denota-se assim uma harmonia entre os conceitos sobre a realidade as exigências de cálculo, bem como as ferramentas de matemática e de geometria em ambas as situações extremas.

Assim, e sendo certo que a evolução não pára, no futuro mais ainda do que no presente é expectável que a Teoria do Caos e a Geometria Fractal venham a oferecer poderosas ferramentas ao serviço dos analistas financeiros e dos decisores económicos.

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas

- BLAUG, M.** *A Metodologia da Economia*. Trad. (I./P.) de V. Calvete. Lisboa, Gradiva, 1994. (Colecção "Trajectos").
- CAMPBELL, T. S.** *Financial Institutions, Markets and Economic Activity*. New York, McGraw-Hill, 1982. ("Series in Finance").
- CARMOY, H.** *Estratégia Bancária: a recusa da descoordenação*. Trad. (I./P.) de E. Cruz, O. Ferreira, D. Sousa. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1992. (Colecção "Biblioteca de Economia").
- CÉSAR DAS NEVES, J. L.** *Uma Galeria de Arte: visita guiada aos grandes marcos da história da economia*. Lisboa/S. Paulo, Verbo, 1995.
- CHORAFAS, D.N.** *Chaos Theory in the Financial Markets*. Chicago, Probus Publishing Co., 1994.
- COSTA PINTO, J.** *O sistema financeiro português*. Lisboa, O Economista, pp. 73-75, 1994.
- DELFAUD, P.** *Keynes e o keynesianismo*. Trad. (Fr./P.) de E. C. Lima. Lisboa, Publicações Europa- América, 1988. (Colecção "Saber").
- ELTON, E. J. e GRUBER, M. J.** *Modern Portfolio Theory and Investment Analysis*. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1984.
- FAMA, E. F.** *Foundations of Finance, Portfolio Decisions and Security Prices*. New York, Inc. Publishers, 1976. (Série "Basic Books").

- FORTI, A. et. al. *La Mort de Newton*. Paris, Maisonneuve & Larose, 1996. (Colecção "Prometheus").
- FRANK, R. H. *Microeconomia e Comportamento*. Trad. (I./P.) de Alexandra Cunha-Vaz e Vera M. da Costa Empis. 3.ed. Lisboa, McGraw Hill de Portugal, 1998.
- GART, A. *Regulation, Deregulation, Reregulation : the Future of the Banking, Insurance, and Securities Industries*. New York, John Wiley & Sons, 1994.
- GLEICK, J. *Chaos: making a new science*. 3.ed. London, Abacus, 1993.
- GOODHARD, C. *Money Information and Uncertainty*. Mcmillan, 2.ed., London, 1989.
- GUERARD, J. e VAUGHT, H. T. *The Handbook of Financial Modelling*. Chicago, Probus Publishing Co., 1989.
- GUERRIEN, B. *La société, objet complexe et changeant*. Paris, Pour La Science, Dossier « Les Mathématiques Sociales », pp. 20-21, Juillet 1999.
- JOHNSON, H. J. *Financial Institutions and Markets: a global perspective*. New York, McGraw-Hill, 1993. (Colecção "Economics Series").
- KAHNEMAN, D. e TVERSKY, A. *La peur et le goût du risque*. Paris, Pour La Science: Dossier «Les Mathématiques Sociales», pp. 74-80, juillet 1999.
- KEYNES, J. M. *The General Theory of Employment, Interest, and Money*. Prometheus Books, 1997
- LOUÇÃ, F. *Turbulência na Economia*. Porto, Edições Afrontamento, 1997. (Colecção "Biblioteca das Ciências do Homem").
- MARSHALL, A. *Principles of Economics*. Prometheus Books, 1997.

- MISHKIN, F. S.** *Financial Markets, Institutions, and Money*. New York, Harper Collins College Publishers, 1995.
- MYERS, S. e MAJLUF, N. S.** *Corporate Financing and Investment Decisions When Firms Have Information That Investors Do Not Have*. Journal of Financial Economics, n.º 13, North-Holland Publishing, 1984.
- PETERS, E. E.** *Chaos and order in the capital markets: a new view of cycles, prices, and market volatility*. New York , John Wiley & Sons, 1991.
- SCHUMPETER, J. A.** *Capitalism, Socialism & Democracy*. Londres, Routledge, 1996.
- SCHUMPETER, J. A.** *Ensaios: Empresários, inovação, ciclos de negócio e evolução do capitalismo*. Trad. (I./P.) de Maria I. Mansinho e E. de Almeida Pinho. Oeiras (Portugal), Celta Editora, 1996. (Colecção “Economia e Sociedade”).
- SCHUMPETER, J. A. e SCHUMPETER E. B.** *History of Economic Analysis*. Oxford Univ. Press, 1996.
- SCHUMPETER, J. A.** *Business Cycles: A Theoretical Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. Porcupine Press. 1989.
- SCHUMPETER, J. A.** *Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Credit, Interest and the Business Cycle*. Transaction Pub. 1983.
- SHAPIRO, C. e VARIAN, H.R.** *Economia da Informação: como os princípios económicos se aplicam à era da internet*. Trad. (I./P.) de Ricardo Inojosa. Rio de Janeiro, Editora Campus, 1999.
- SHARPE, S. A.** *Asymmetric Information, Bank Lending, and Implicit Contracts: A Stylized Model of Customer Relationships*. Journal of Finances, Vol. XLV, n.º 4, pp. 1069-1087, 1990.

- SMITH, A.** *A Riqueza das Nações*. Vol. I. Trad. (I/P) de T. Cardoso e L. Cristóvão de Aguiar. Ed. 4^a. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1999
- SMITH, A.** *A Riqueza das Nações*. Vol. II. Trad. (I/P) de L. Cristóvão de Aguiar. Ed. 3^a Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- THUAN, T. X.** *Le Chaos et l'Harmonie: la fabrication du réel*. Paris, Fayard, 1998
- TVEDE, L.** *Business Cycles: from John law to chaos theory*. Amsterdam, Hardwood Academic Publishers, 1997.
- TVERSKY, A.; KAHNEMAN, D.** *The framing of Decisions and the Psicology of Choice, in Science*, Vol. 211 n°4481, pp 453-458, Janvier 1981.
- VARIAN, H. R.** *Intermediate microeconomics: a modern approach*. New York, 2.ed., W.W. Norton & Company, 1987.

QUARTA PARTE
TURBULÊNCIA, INFORMAÇÃO E DECISÃO

A ciênciā poderá transmitir as verdadeiras relações entre as coisas? O que ela aproxima deverá ser separado, o que ela separa deverá ser aproximado? ... Estas relações têm um valor objectivo? Ou seja estas relações têm o mesmo valor para todos. Serão elas ainda as mesmas para os que vêm depois de nós?

Henri Poincaré

19. O NOVO PARADIGMA

Num processo de tomada de decisão, a chave do sucesso reside na capacidade de antecipação de acontecimentos futuros. Quem decide depara-se diariamente com o desafio de responder à mudança, num mundo em que as teias de interligações se sucedem, estabelecendo-se e desfazendo-se, a um ritmo sem precedentes.

As Teoria da Complexidade e do Caos vieram proporcionar uma nova perspectiva do mundo real, o mundo no qual se tomam decisões e, mais do que isso, assumiram-se como instrumentos poderosos quer na capacidade de antecipar o futuro e responder à mudança, quer na capacidade de influenciar a mudança emergente.

Os actuais modelos de decisão referem-se, por consequência, a um novo paradigma caracterizado no essencial, por globalização e turbulência: globalização das dependências, mas também do conhecimento; turbulência dos ambientes exógenos, mas ainda das relações endógenas aos próprios sistemas complexos. Este é sem dúvida, o contexto em que gravitam as organizações das simples às mais complexas, sejam elas constituídas por um só indivíduo, inseguro quanto à irregularidade de funcionamento dos seus múltiplos processos de controlo homeostático, quer de uma sociedade, permanentemente sacudida pelas tensões geradas entre grupos sociais, ou ainda de uma

empresa, sujeita às flutuações aleatórias, embora só na aparência, dos parâmetros de referência.

Este contexto contrasta em absoluto com aquele outro que até à relativamente pouco tempo, constituía o referencial de tomada de decisão, herdeiro, longínquo é certo, mas fiel ao paradigma newtoniano de estabilidade e de certeza que infundia confiança ao decisor.

O novo paradigma encontra suporte teórico nas Teorias da Complexidade e do Caos e a sua abordagem pressupõe uma *démarche* interdisciplinar, pois, nesta perspectiva *tudo tem a ver com tudo*, como Michell Fólon genialmente representa na aguarela que ilustra a capa do presente volume.

Retomando a afirmação inicial deste capítulo, dir-se-á agora que a chave de sucesso de uma organização reside, quanto mais complexa ela for, na capacidade de “navegar” na tubulência, assumindo de vez que esse regime não será mais uma exceção gerada por qualquer crise localmente focalizada, mas uma regra universal que talvez Newton tivesse antevisto ao fracassar, há três séculos atrás, o cálculo da órbita da Lua.

I

EVOLUÇÃO DO PENSAMENTO CIENTÍFICO

O desenvolvimento científico resulta de um processo fragmentário, através do qual os elementos são ajustados e refundidos e cujo pano de fundo se traduz num crescimento contínuo que consubstancia o património científico e tecnológico da Humanidade. A história da ciência oferece a perspectiva de como o conhecimento se estruturou em teorias e doutrinas e como estas se

sucederam por substituição ou reagrupamento e superaram por aproximações sucessivas os obstáculos que se lhes opunham. Perante o desenvolvimento científico, o historiador visa dois alvos principais: por um lado, determinar que homem e em que momento cada facto, lei ou teoria científica foi descoberta ou inventada; por outro lado, descrever e explicar os conjuntos de erros, mitos e superstições que travaram os elementos constituintes da doutrina científica moderna.

A história da ciência, da Antiguidade Clássica até à Idade Média, pode ser sintetizada como uma investigação incessante de “factos irredutíveis e inflexíveis”. É Galileu o primeiro a introduzir a crise neste sistema, Newton prosseguiu-a. Quando Galileu declarou que os cientistas deviam prestar atenção às propriedades vitais dos corpos materiais, que podem ser expressos por formas, números e movimentos, preparava o futuro da idade das abstracções. E com a afirmação da mecânica newtoniana, os conceitos da Biologia e da evolução, por se tratarem de conceitos demasiado dinâmicos para estarem contidos nos métodos quantitativos limitados da época, foram relegados para a periferia da corrente científica dominante.

O século XVII marca o ponto de viragem entre a Idade Média e a ciência moderna. Nesta viragem, dois nomes são fundamentais na concepção e no desenvolvimento científico: Descartes, que nos lega a disciplina do pensamento científico e a partir do qual viria ser formulado mais tarde o Modelo Hipotético Dedutivo; e, Newton pela concepção do Método Axiomático.

Newton concebeu o Universo como um mecanismo de relógio, para representar o auge em fiabilidade e perfeição mecânica. As suas metáforas marcaram profundamente o pensamento científico, durante três séculos, e tornaram-se em corpo doutrinal para a esmagadora maioria dos ramos científicos.

ficos. Newton legou uma mensagem completamente interiorizada, a de que a natureza tem leis e estas podem ser compreendidas.

No entanto, o grande contributo de Newton consistiu na demonstração de que simples enunciados matemáticos podem conduzir a avaliações muito precisas e de que os corpos materiais não se deslocam por acaso, mas segundo regras matemáticas. Newton introduziu na ciência, o conceito de determinismo: de acordo com determinadas leis e tendo em conta as condições iniciais de um sistema, será possível prever o seu estado futuro. Esta visão determinística é levada ao extremo por Laplace, para quem tudo o que acontece no Universo, tudo o que aconteceu ou está para acontecer está já fixado e inalterado.

Newton desenvolveu extensivamente o primeiro dogma do positivismo sob a sua forma mecanicista e atomista: os elementos básicos do seu sistema conceptual são átomos, as suas propriedades básicas são a sua massa, extensão e forma e as relações básicas são movimento e interacção (incluindo o impacto e a gravidade). O positivismo clássico desenvolveu esta abordagem geral: a indução era definida como o único critério para a cognição, na medida em que estabelecia um princípio geral de demarcação contra todos os tipos de pseudo-conhecimento metafísico. Os procedimentos concretos derivados destas hipóteses metodológicas eram, em consequência: i) a definição de testes como a forma válida de conferir leis derivadas da observação; ii) a existência de um *experimentum crucis* baconiano, uma experiência decisiva permitindo a validação final das leis induzidas das observações; e, iii) o princípio da verificação estabelecendo a possibilidade e necessidade de testar a lei no conjunto do domínio da sua função.

Estes princípios tiveram um impacto considerável e durável: dado que todas as essências podem ser reduzidas a grandezas, a formulação matemática poderia representar qualquer fenómeno natural ou social e criar uma linguagem comum para as ciências. Assim, o século XVII foi a idade de ouro das abstracções. Elas são efectivamente um instrumento de análise poderosíssimo: abordam os elementos essenciais, melhoram a compreensão dos processos sociais e físicos, ajudam a libertar de sofismas e de concepções falsas. Mas pelo contrário, não prestam grande atenção ao contexto em que se inserem. Na medida em que os aspectos excluídos são importantes, as abstracções obrigam a omitir aspectos significativos que podem conduzir a visões estritas ou distorcidas da realidade.

Esta foi a erradicação intelectual do século XVII, que iria influenciar os economistas como Adam Smith, a partir do século XVIII. Enquanto os economistas, se fixam nas abstracções e os matemáticos investigam de modo a tornar a Economia uma ciência exacta. Este processo culmina com a publicação, em 1874, dos “Elementos de Economia Política Pura” de Walras, obra que consolida a Economia em bases mecanicistas. Para Walras, “a teoria pura da Economia ou a teoria de troca e valor da troca” era simplesmente “uma ciência física ou matemática, como a mecânica ou a hidrodinâmica”. Pode escrever-se a história do pensamento económico clássico após Walras como uma longa anotação com base na obra de Newton; com as suas equações e os seus instrumentos analíticos.

No século XVIII, os trabalhos desenvolvidos por Lagrange e Laplace consagraram a lei de atracção universal, mostrando uma perfeita correspondência entre os cálculos e as observações da época. A partir de então, começam a desenvolver-se estudos com recurso à utilização de equações diferenciais com derivadas parciais, que envolviam taxas de variação com mais do que

uma quantidade desconhecida. O período que decorre entre o século XVIII e o início do século XIX, caracteriza-se pelo desenvolvimento das grandes teorias da Física matemática clássica. Deste período emergiu um paradigma esmagador: a maneira de modelar a Natureza é conseguida pelo recurso à utilização das equações diferenciais.

A Física abriu a via à Economia e o positivismo clássico inspirado pelo paradigma newtoniano influenciou toda a concepção da ciência económica. O conceito de equilíbrio, as leis do movimento, a objectividade científica, são todos termos importados directamente da Física. A adopção do modelo newtoniano legou à Economia uma série de instrumentos analíticos, inadequados todavia, às realidades complexas da evolução económica. Contudo, enquanto a maior parte dos economistas se mantiveram fiéis aos velhos modelos de pensamento, a Física inicia uma mudança de rumo a partir do século XIX.

O século XIX marca um período de viragem, caracterizado por um lado, pela ruptura com as leis newtonianas correspondentes a um universo estático e por outro, pela concepção de um mundo evolutivo associado à irreversibilidade do tempo. O tempo que se vive seria ilusório ou, pelo contrário, uma propriedade fundamental do Universo? A tomada de consciência deste paradoxo resulta decorre da formulação da teoria darwiniana, a primeira a abordar o conceito de evolução e da irreversibilidade do tempo. A vida, as diferentes espécies, a existência dos homens e das suas sociedades foram concebidos como produtos da sua evolução. Seis anos após o aparecimento da teoria da evolução de Darwin, Clausius reformula o Segundo Princípio da Termodinâmica, que trata da irreversibilidade dos fluxos energéticos, introduzindo-lhe uma nova função, a entropia. A importância deste conceito deriva do facto que a entropia do Universo aumenta com o decorrer do tempo. Tra-

ta-se da inserção de uma ideia de história do Universo, no contexto da ciência moderna. Nesta nova concepção, o aleatório passa a desempenhar um papel crescente. Nesta sequência, Boltzmann introduz a visão probabilista como tentativa de explicação microscópica da entropia.

Nos finais do século XIX, Jules Poincaré revelou que o caos, ou o potencial de caos, é a essência de um sistema não linear, e mesmo um sistema completamente determinado como a órbita de um planeta, pode ter resultados indeterminados. Ele verificou que pequenos efeitos podem ser amplificados pela retroacção e percebeu que um sistema simples pode conter uma complexidade extrema.

A aproximação imediata da descoberta de Poincaré desafiou o paradigma de Newton que satisfez a ciência durante os dois séculos anteriores. Alguns anos mais tarde, Max Planck descobriu que a energia vem em pequenas porções ou quanta, negando a ideia de substância contínua. Cinco anos após Albert Einstein publicou o seu primeiro artigo sobre a relatividade. O paradigma newtoniano ruía assim em várias frentes. As gerações seguintes de físicos consagraram-se a estudar as diferenças entre a visão newtoniana clássica, da natureza, da relatividade e da teoria quântica.

É no século XX que se assiste às grandes revoluções científicas. A teoria dos *quanta* de Planck e a teoria da relatividade de Einstein constituem as novas bases de compreensão do Universo, lançadas na primeira metade do século. A perspectiva evolucionista conquistou um espaço que, como Prigogine afirma “no final do século XX nada parece possível fugir a esse modo de inteligibilidade, nem a matéria nem mesmo o espaço-tempo. Não só as estrelas nascem, vivem e morrem, como também o próprio Universo possui uma história da qual as partículas elementares são a imagem, nunca parando de se

criar, de desaparecer e de se transformar. Esta descoberta da evolução em todas as condições que pareciam atemporais torna ainda mais paradoxal a noção clássica de inteligibilidade que ainda hoje domina a concepção das leis da natureza”.

Na era actual o homem sabe que não está só na imensidão indiferente do Universo. A ciência contemporânea devolveu-lhe a sua potência inovadora e através de um diálogo frutuoso, reintegrou o homem no Universo que ele observa. Esta é a nova visão do mundo, defendida por Ilya Prigogine autor da Teoria das Estruturas Dissipativas, ou seja, a criação da ordem pela desordem. Prigogine inventou o conceito de ordem por flutuações que prova que o caos entrópico, através de flutuações /bifurcações ínfimas, é origem de evolução, fonte de novas organizações. Esta teoria pode ser extrapolada para os mais diversos campos. O objecto geral da Física dos processos dissipativos é, então, o comportamento de populações correlacionadas, susceptíveis de gerarem comportamentos colectivos coerentes, de conhecerem transformações qualitativas que conferem sentido às noções de probabilidade, de instabilidade e de acontecimento.

Esta nova corrente de pensamento apela, também, a uma nova forma de visualizar o mundo, a qual foi conseguida através da Geometria Fractal, ou seja, uma geometria da dinâmica e dos atractores estranhos, sob duas formas: estatística e determinista. A Geometria Fractal e o estudo do caos estiveram na origem de movimentos independentes, ainda que ambos sejam resultado da herança intelectual de Poincaré. O estudo do caos determinista deu origem a inúmeras formas geométricas muito complicadas, as quais eram impossíveis de tratar com base na geometria euclidiana, enquanto a geometria fractal se revelou um instrumento perfeitamente adequado ao seu estudo.

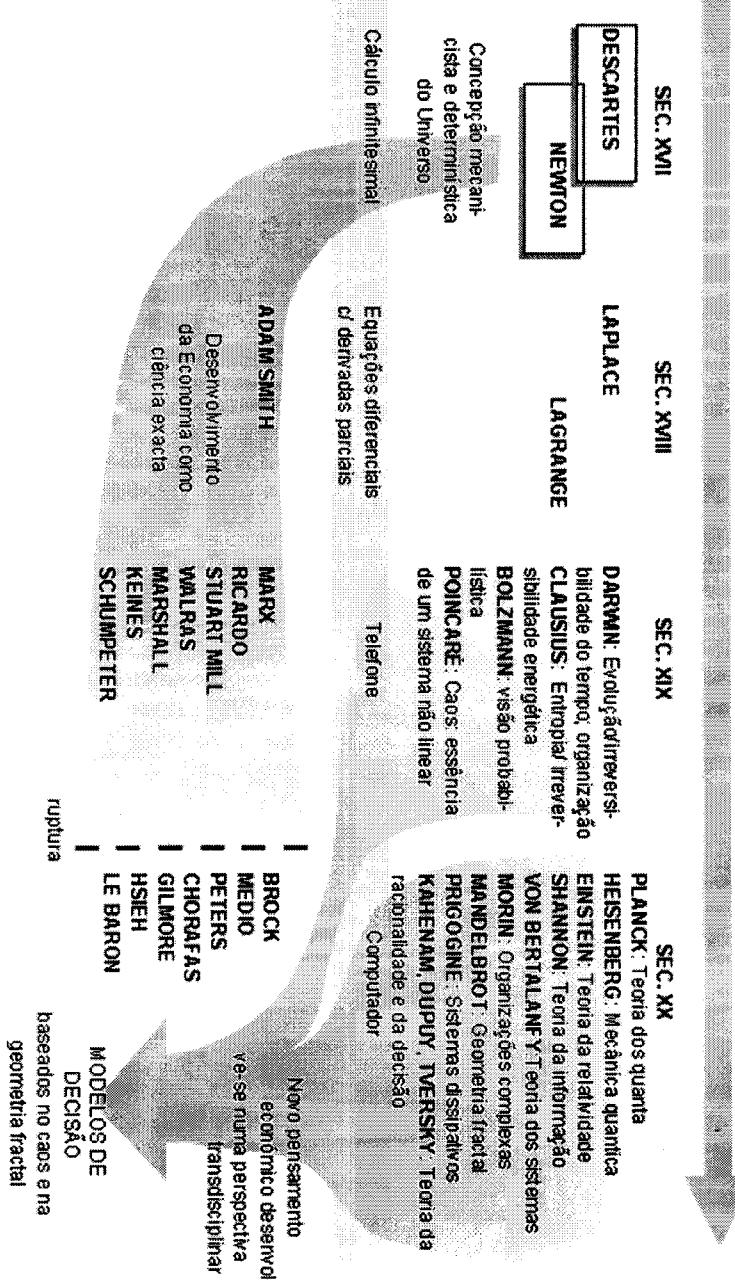
Durante muito tempo foi o ideal de objectividade vindo da Física que dominou e dividiu as ciências. Uma ciência devia definir o seu objecto, determinar as variáveis em função das quais se poderiam explicar e prever os comportamentos observados. Hoje existe uma nova concepção de objectividade científica, que esclarece o carácter complementar das ciências experimentais, que criam e multiplicam os seus objectos, e das ciências narrativas, que têm como problema, as histórias que constróem o seu próprio sentido. Esta nova perspectiva de abordagem científica caracteriza-se pela transferência de conhecimentos entre ciências. A questão já não é a de opor determinismo e imprevisibilidade, mas tentar compreender porque é que uma evolução é imprevisível.

Deste modo, deve a Economia absorver esta perspectiva transdisciplinar a qual deverá resultar num novo pensamento económico. Um pensamento económico que contemple os novos desenvolvimentos da Física, a Teoria do Caos e a Geometria Fractal, mas também, que incorpore as novas tecnologias de informação e comunicação, o ambiente de turbulência em que as empresas operam, a complexidade das organizações numa perspectiva sistémica e as ciências comportamentais, que em última instância influenciam e determinam qualquer processo de tomada de decisão.

Desse pensamento emerge um tronco comum entre cultura, sociedade e conhecimento. Porque, como diz Morin, "uma cultura abre e fecha as potencialidades bio-antropológicas de conhecimento. Abre-as e actualiza-as fornecendo aos indivíduos o seu saber acumulado, a sua linguagem, os seus paradigmas, a sua lógica, os seus esquemas, os seus métodos de aprendizagem, de investigação, de verificação, etc., mas ao mesmo tempo, fecha-os e inibe-os com as suas normas, regras, proibições, tabus, com o seu etnocentrismo, a sua

auto-sacralização, com a ignorância da sua ignorância. Também aqui, o que abre o conhecimento é o que fecha o conhecimento”.

EVOLUÇÃO DO PENSAMENTO CIENTÍFICO



II

ORGANIZAÇÕES COMPLEXAS

As relações entre o simples e o complexo, assim como as semelhanças e as diferenças entre vários sistemas complexos adaptativos, são relevantes em processos tão diversos como a origem da vida, a evolução biológica, o comportamento dos organismos em ecossistemas, o funcionamento do sistema imunitário dos mamíferos, a aprendizagem e o pensamento dos animais, a evolução das sociedades humanas, o comportamento dos investidores em mercados financeiros ou ainda o funcionamento do software e/ou do hardware de computadores concebidos para elaborarem estratégias ou efectuarem previsões baseadas em observações anteriores.

A característica comum de todos estes processos é que cada um deles envolve um sistema que adquire informação sobre o ambiente que o circunda e sobre as interacções com esse ambiente, identifica regularidades na informação recebida, condensa essas regularidades num modelo e, finalmente, actua de alguma forma sobre o mundo real com base nesse modelo. Em cada um dos casos existem vários modelos em competição e os resultados da acção sobre o mundo real tornam a alimentar o sistema por retroacção, influenciando a competição.

Cada ser humano actua, num certo sentido, como um sistema complexo adaptativo, entendendo-se este como um sistema composto por um grande número de agentes que interagem entre si e que, em resultado dessa interacção, podem mudar o curso das acções subsequentes.

Os sistemas complexos adaptativos apresentam uma tendência geral para gerarem outros sistemas complexos adaptativos. Por exemplo, a evolução biológica pode conduzir a uma solução “instintiva” para um problema que o organismo enfrenta, mas o mesmo processo evolutivo pode desenvolver também uma tal inteligência no organismo, que ele seja capaz de resolver um problema semelhante, na sequência do processo de aprendizagem.

Não só a aprendizagem, no sentido habitual, fornece exemplos do modo como operam os sistemas complexos adaptativos, mas também a evolução biológica fornece muitos outros. Enquanto os seres humanos adquirem conhecimento sobretudo através do uso individual ou colectivo dos seus cérebros, os outros animais adquiriram uma fracção muito maior da sua informação vital por herança genética directa; essa informação, evolucionada ao longo de milhares de anos, está subjacente àquilo que, por vezes, se denomina, de um modo vago, por instinto. Numa perspectiva antropocêntrica, a aprendizagem refere-se ao contexto cultural do empreendimento humano, enquanto que numa perspectiva biológica, mais lata, a aprendizagem refere-se ao produto da evolução biológica sob a forma de informação armazenada nos genes, à qual se sobrepõe a experiência individual adquirida.

No contexto actual, as organizações (empresas, mercados, ...) actuam em ambiente caótico ou de turbulência. As explicações actuais do mundo de negócios que mais influenciam os gestores, falham no modo de lidar com a natureza da incerteza externa e na resposta adequada para essa situação. A ineficácia das explicações referidas resulta do facto de aquelas se centrarem na busca de ordem, disciplina e regularidade na condução dos negócios, que permitam criar uma certa harmonia interna, negligenciando o impacto da desordem externa. Como resultado, a tomada de decisões centra-se num conjunto de modelos baseados em pressupostos sequenciais e determinísticos,

que condicionam ou delimitam actuações estratégicas na presença de alterações rápidas e com elevados níveis de incerteza.

A dificuldade para explicar e controlar comportamentos de fenómenos turbulentos tem ocupado investigadores e teóricos dos diferentes domínios científicos, durante longos anos. Os estudos desenvolvidos conduziram ao aprofundamento e consolidaram um elevado volume de conhecimento científico que tenta explicar a ordem inerente na desordem aparente que envolve diferentes acontecimentos caóticos ou com características de turbulência.

Durante a década de 80, uma nova maneira de encarar o mundo começou a ganhar terreno no campo científico, o que veio a constituir uma verdadeira revolução intelectual, com potenciais implicações a longo prazo no modo de tomada de decisão em todas as áreas do saber.

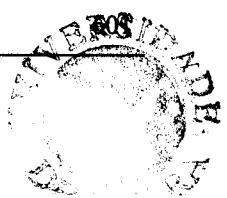
Edward Lorenz, no seu trabalho *The Essence of Chaos*, dá uma perspectiva da evolução científica da análise de como comportamentos aparentemente aleatórios e imprevisíveis interactuam de acordo com regras precisas e, de um modo geral, facilmente definíveis. Os estudos desenvolvidos sobre esta matéria constituem o suporte teórico da denominada *Téoria do Caos*, a qual se preocupa com comportamentos determinísticos ou quase determinísticos, que ocorrem num sistema tangível com pouca aleatoriedade, mas que não aparecem ser determinísticos.

As organizações naturais resultam do estabelecimento de interligações entre diversas entidades. O seu nível de complexidade será tanto maior quanto maior for a multiplicidade e a diversidade, dessas entidades, componentes do sistema. Daí resultam uma estrutura e uma nova unicidade, caracterizadas por novas propriedades inexistentes nos elementos constituintes. As organizações

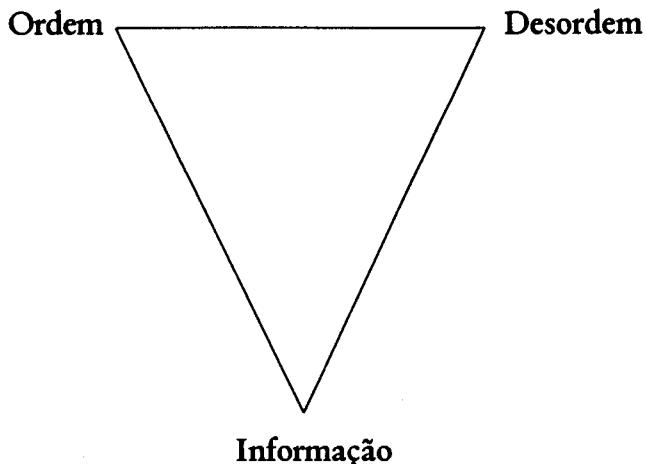
são sistemas abertos, ou dissipativos como Prigogine as designa, que mantêm formas de ligação com o meio em que estão inseridas, através da permuta de informação. Como sistemas dissipativos, comportam-se como sistemas afastados do equilíbrio, conforme demonstra a teoria termodinâmica do não-equilíbrio, particularmente sensíveis às condições exteriores. Assim, as organizações podem ser consideradas como um ilhéu de neguentropia constantemente alimentado por organização generativa ou regenerado por organização activa. Em termos dinâmicos, uma organização é neguentrópica se imprimir ao sistema uma dinâmica que se concretiza na produção de organização ou na capacidade de auto-organização.



As organizações “artificiais”, concebidas pelo homem, comportam-se de forma tanto mais próxima das organizações naturais, quanto maior for o seu grau de complexidade (diversidade e multiplicidade), sendo entendidas numa perspectiva sistémica, como toda a estrutura que possui capacidade de transformar, produzir, ligar e manter. Por outro lado, independentemente da forma que assumem, naturais ou artificiais, qualquer organização é caracterizada pelas noções particulares de globalidade, de crescimento, de diferenciação, de hierarquia, de ordem, de dominância, de controlo e de competição.

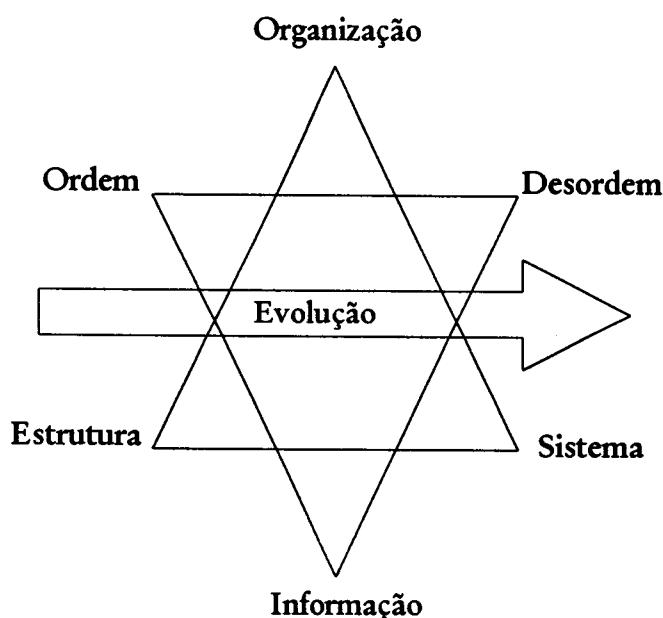


À semelhança das organizações naturais, as organizações artificiais estão sujeitas à dialéctica do binómio ordem/desordem. Todavia, nestas últimas não será a energia o factor determinante do balanço ordem/desordem, mas a informação.



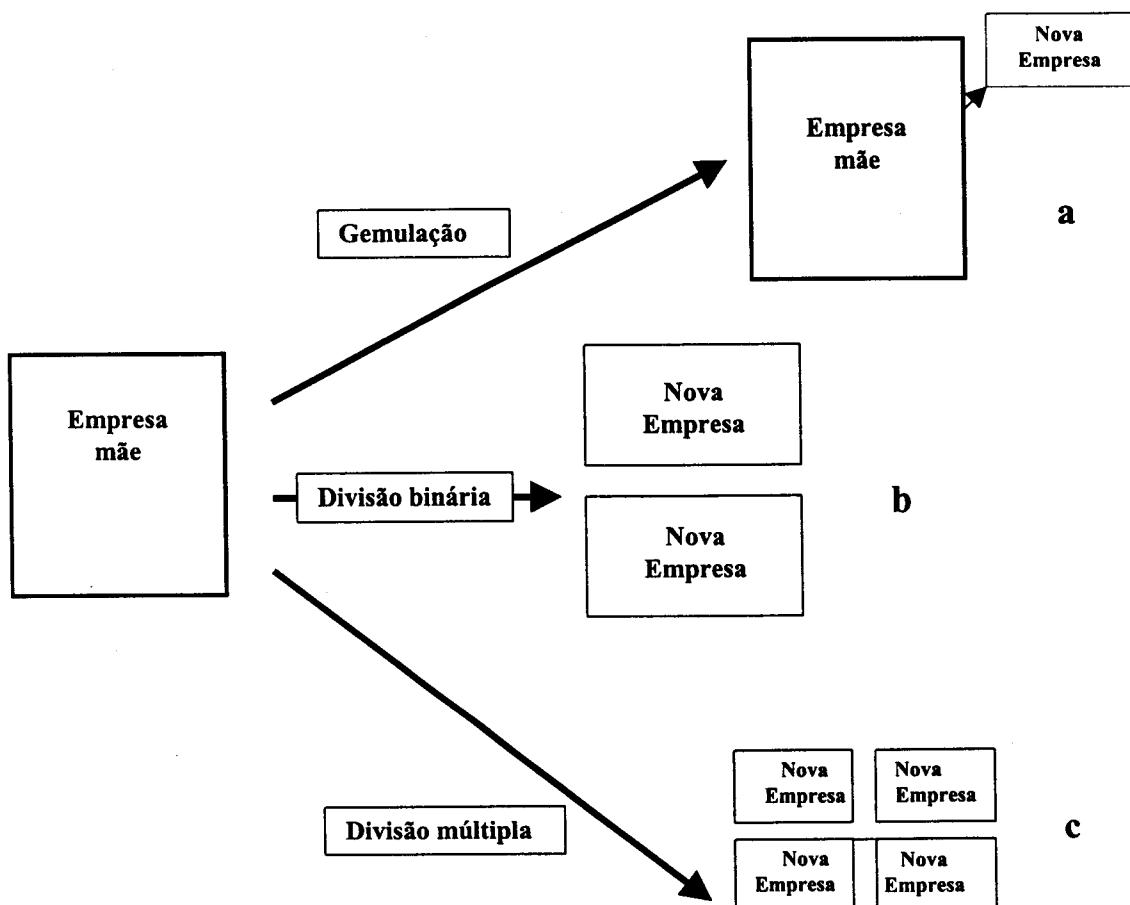
Com o aparecimento da noção de estrutura, a ideia de ordem apela para a definição do conceito de organização. Com efeito, a ordem singular de um sistema pode ser concebida como a estrutura que o organiza, sendo o sistema, a outra face da ideia de organização. Deste modo, a organização constitui um “todo” não redutível às partes, porque dispõe de qualidades emergentes e de coacções próprias e comporta retroacção das qualidades emergentes do “todo” sobre as partes. Por isso, as organizações estabelecem as suas próprias constâncias, que geram regularidades e produzem estabilidades. A complexificação enriquece o conceito de ordem, mas ao mesmo tempo relativiza-o, porque complexificação e relativização percorrem o seu caminho lado a lado.

Neste processo de complexificação surge a desordem. A desordem é indissociável da evolução de qualquer organização, omnipresente e apesar de oposta, mantém com a ordem uma cooperação que gera organização. No entanto, apesar de cooperar na geração de ordem organizacional, ameaça-a incessantemente com a desintegração.



Consequentemente, e uma vez, mais à semelhança das organizações naturais, também as organizações artificiais são susceptíveis de evolução. Isto é, adaptação, crescimento, reprodução ou extinção, ou seja, comportam-se como sistemas complexos adaptativos. Qualquer uma destas etapas está dependente dos processos de tomada de decisão, os quais são tomados em ambiente de turbulência e utilizam como suporte os modelos assentes na Teoria do Caos e na Geometria Fractal.

Estas organizações, fruto de decisões estratégicas, podem sofrer processos de segmentação ou de criação de novas unidades independentes da empresa-mãe. Estes processos encontram paralelismo nas organizações biológicas, as quais são susceptíveis de sofrer processos semelhantes de reprodução: gemulação [a], divisão binária (cissiparidade) [b] ou divisão múltipla (esquizogonia) [c].



III

MODELO DE DECISÃO

A compreensão do mundo real e a actuação sobre o mesmo, implicou desde sempre a concepção de modelos. Estes modelos foram sempre tributários do conhecimento científico. Daí a importância de que se revestiram as metáforas newtoniana, absorvidas pela ciência Económica na concepção dos seus próprios modelos. A concepção determinista e mecanicista, legada por Newton, espelha-se assim no século XIX e ainda no século XX.

Pelas razões sobejamente expostas, das quais se enfatiza a globalização e turbulência, que caracterizam o paradigma de referência, bem como o império da informação servido por tecnologias em acelerado desenvolvimento, os modelos deterministas revelam-se desadequados. Assim, emerge a necessidade de encontrar novos modelos de decisão concebidos em harmonia com o conhecimento científico actual e utilizadores das modernas ferramentas da matemática e da geometria, concretamente, as derivadas da Teoria do Caos e subordinadas à Geometria Fractal. Contrariamente ao que se verificou nos séculos passados, os diversos ramos científicos interagem, cooperam, sobrepõem-se e oferecem um visão holística da realidade. Sabe-se hoje assim, que tudo actua sobre tudo, ainda que indirectamente, não sendo no entanto possível tomar decisões pontuais sem dispor de uma visão global e de mecanismos de integração e de selecção de informação.

A ruptura com a visão mecanicista, projecta para um novo modelo no qual o homem ocupa uma posição central. Consequentemente, na concepção

de novos modelos de decisão é imperativo que intervenha a cultura *sensus lato*, o conhecimento *sensus stricto* e a sua própria idiossincrasia. Sendo certo que destes dois aspectos, aquele que é susceptível de sofrer alterações é a cultura e no seu seio, o conhecimento, o processo de formação assente no binómio ensino/aprendizagem reveste-se de carácter estratégico.

Consequentemente, a proposta de modelo que a seguir se apresenta decorre da referida perspectiva holística, transdisciplinar e é tributária de vectores estratégicos como: (1) a informação e as tecnologias da informação e da comunicação; (2) o conhecimento e a formação; (3) os modelos instrumentais; (4) a estrutura das organizações complexas; e, (5) a selecção da informação.

(1) Informação e Tecnologias de Informação e de Comunicação [TIC]

Como foi referido, a informação constitui um factor determinante, em particular nas organizações complexas artificiais, como factor na contenção da tendência de crescimento entrópico. Por outro lado, quando suportada em adequadas tecnologias de informação, constitui-se como instrumento estratégico de segmentação de mercado, de concepção de produtos e serviços adequados às expectativas dos clientes, às estratégias de negócio e delineamento de políticas de investimento.

A realidade actual evidencia que a posse, a utilização e a velocidade de circulação da informação, podem provocar distúrbios e desequilíbrios nos mercados, o que coloca de novo o problema do risco e do comportamento do investidor nos processos de tomada de decisão e reforça a necessidade de considerar a informação

como factor decisivo no funcionamento dos mercados e nos modelos de decisão de investimento.

Os desenvolvimentos teóricos efectuados sobre a eficiência dos mercados vêm contrariar os pressupostos de transparência, abundância e gratuitidade da informação e demonstrar que esta é um bem escasso e de difícil avaliação. No entanto, o volume cada vez maior, de informação associada a uma crescente velocidade de circulação têm proporcionado o desenvolvimento de uma verdadeira indústria de informação, a qual tem contribuído para uma redução do nível de custos, mais rápida incorporação e maior transparência dos mercados.

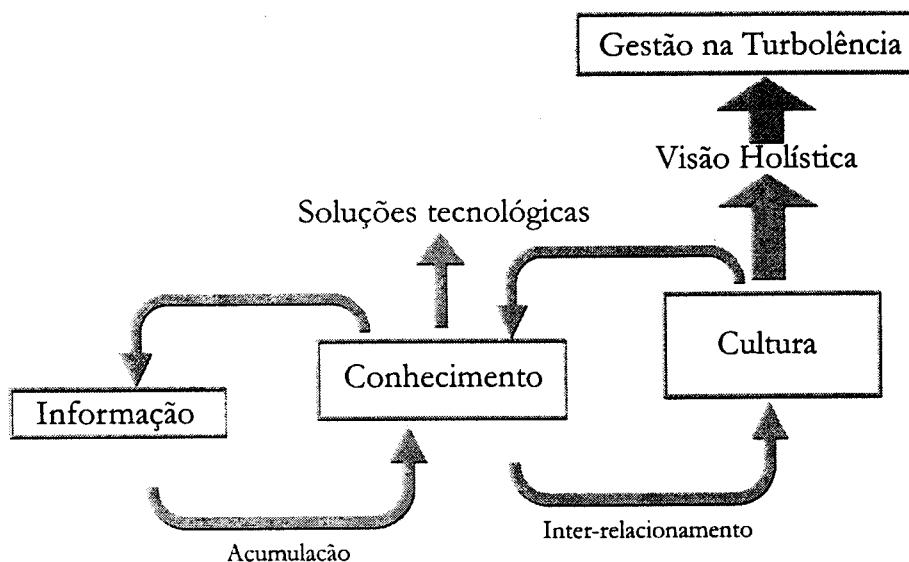
O desenvolvimento das tecnologias de informação e comunicação aponta para a correcção de assimetrias de informação evitando a obtenção prolongada de mais-valias no mercado.

(2) Conhecimento e Formação

Peter Drucker, o grande mestre da arte da gestão, diz que o conhecimento é hoje o verdadeiro capital, o custo e o recurso fundamental da nossa economia. A aquisição de conhecimento é objecto do processo de formação, o qual, assentando no binómio ensino/aprendizagem, resulta da acumulação de informação, estruturada em sistemas mentais pre-existentes. Consequentemente, a formação dos recursos humanos das organizações, adequada à execução das tarefas inerentes aos diversos níveis de funcionalidade e aos diferentes níveis de decisão, constitui uma componente de decisão

estratégica. O conhecimento é por seu turno o substrato criativo para novas soluções designadamente no campo tecnológico.

A um nível superior de inter-relacionamento, a acumulação de conhecimento gera cultura a qual por sua vez não só alimenta a capacidade criativa mas potencia a visão holística indispensável à gestão em ambiente de turbulência.



Entre o conhecimento indispensável, ocupa uma posição de destaque aquele que se relaciona com o domínio e a utilização das tecnologias de informação e comunicação.

Dado o carácter transitório do conhecimento, a formação assume imperativamente um carácter contínuo. Através da programação adequada da formação contínua dos recursos humanos de uma organização complexa poderá garantir-se a sua própria adaptabilidade às condições mutáveis do ambiente de turbulência, em que gravita.

(3) Modelos Instrumentais [MI]

O problema económico não pode expressar-se senão através de uma idealização que compreenda necessariamente simplificações e omissões. Por outras palavras, é necessário construir um modelo matemático que constitui uma simplificação da realidade, por vezes radical, o que provoca desajustamentos face à realidade. Os erros de previsão detectados sucessivamente nos modelos tradicionais conduziram os economistas a um repensar da formulação dos referidos modelos. Isto é, modelos que embora contemplem simplificações da realidade não negligenciem o problema da informação, as descontinuidades e as bifurcações. Por outro lado, não pode ser descurado o facto de que um modelo poderá não ser adequado senão para um determinado horizonte temporal e que, uma pequena alteração numa variável poderá conduzir a variações abruptas, como o denominado “efeito borboleta”.

É dentro desta filosofia de que os mercados são estruturas dinâmicas e evolutivas, longe das condições estáveis associadas à ordem e à meticulosidade, que devem ser perspectivados os novos modelos instrumentais, ou seja, modelos sustentados pela Teoria do Caos e representados à luz da Geometria Fractal.

(4) Estrutura das Organizações Complexas [OC]

A tomada de decisão estratégica ocorre no seio das organizações complexas, designadas como tal pela diversidade e multiplicidade dos elementos constituintes, e pela existência de uma estrutura interna. Esta estrutura define níveis hierárquicos de execução e de decisão de tal modo que, de forma esquemática, se podem comparar às famosas “bonecas russas”. Entre os diversos níveis estruturais fluí informação e retroacção. A homeostase do sistema depende naturalmente da integração harmoniosa dos diversos níveis funcionais, a qual depende como foi dito, das correctas opções estratégicas em matéria de formação e da judiciosa utilização das tecnologias da informação e comunicação.

(5) Selecção de Informação

A informação disponível através das tecnologias de informação e comunicação é excedentária. Como foi dito anteriormente, não só lhe está subjacente um custo, como recebida em excesso e sem critério é prejudicial. Consequentemente, terá de existir um filtro [F] de selecção de informação pertinente e necessária à homeostase da organização complexa e ao processo de tomada de decisão.

A selecção referida é um processo dependente da cultura/conhecimento das entidades que ocupam posição no núcleo decisório da organização. Por conseguinte, a selecção da informação detém um carácter eminentemente estratégico.

MODELO DE TOMADA DE DECISÃO

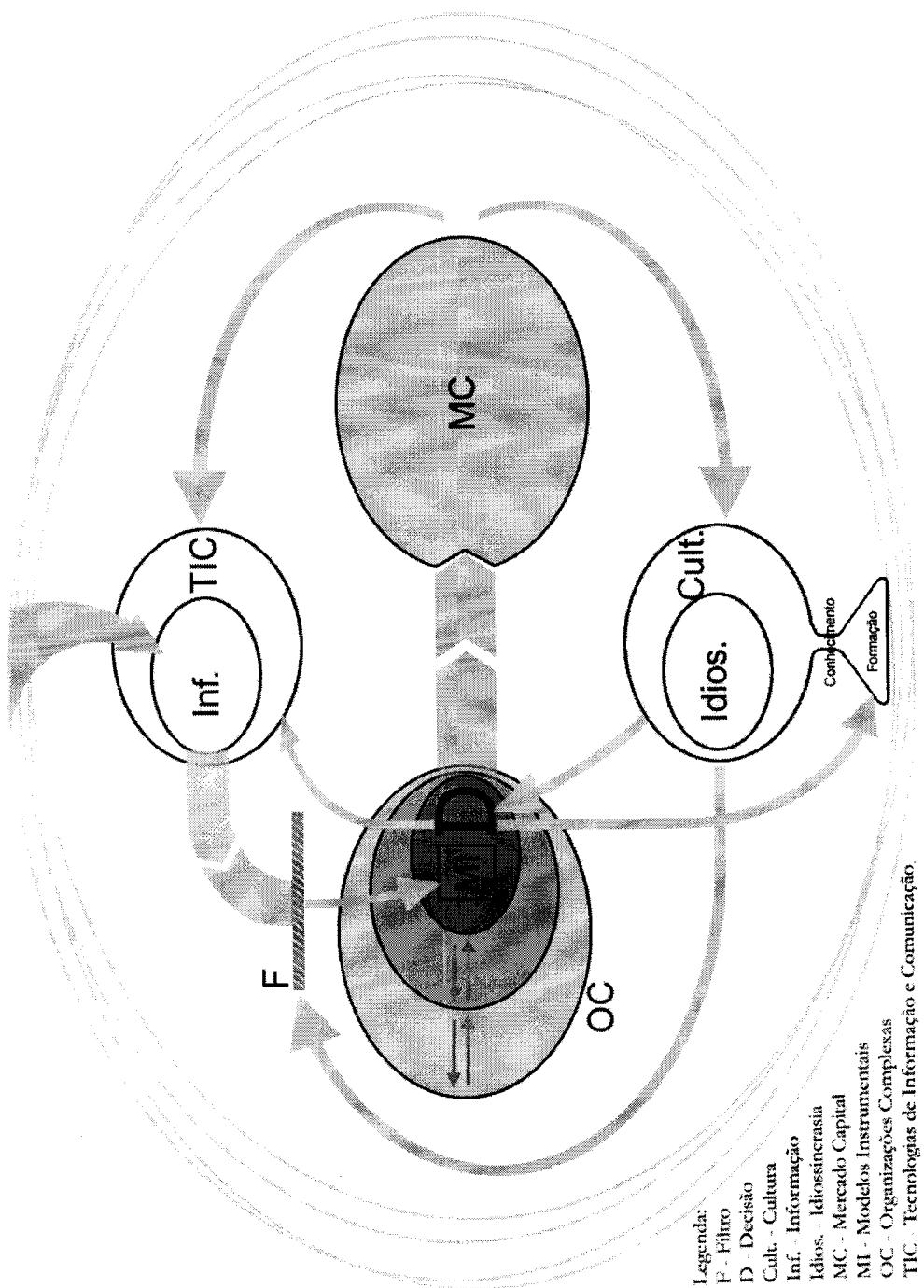
A proposta de modelo decorrente da reflexão anterior integra por consequência, conforme diagrama seguinte, os vectores estratégicos referidos designadamente: informação / TIC; formação / conhecimento / cultura; selecção de informação; e, modelos instrumentais.

Acrescem aos elementos referidos os mecanismos de retrocontrolo. Com efeito, na sua aplicação prática, o modelo integra duas vias distintas de retroacção: informação concreta e estruturada proveniente do mercado de capitais, alimenta o processo de tomada de decisão através dos mecanismos de selecção e dos modelos instrumentais; de forma difusa, informação, também, proveniente dos mercados de capitais integra o património de cultura do decisor e influencia, por conseguinte, de forma indirecta, o processo de decisão.

A tomada de decisão nas organizações complexas, relativamente ao mercado de capitais, designadamente no que concerne à compra e venda de activos financeiros será determinada em última instância pelos dados fornecidos pelos modelos instrumentais [MI] laborando no contexto de organização complexa [OC] e com base na informação seleccionada, por um lado, e por outro, pela cultura e idiossincrasia da entidade decisora [D]. Este último aspecto, normalmente negligenciado, assume uma importância determinante quando as decisões implicam risco e incerteza, o que constitui situação habitual no contexto dos mercados de capitais, em ambiente de turbulência.

Complementarmente, o modelo inclui dois níveis de situações estratégicas, atrás referidas, designadamente no que concerne à selecção e programação do processo de formação contínua, e ainda, a decisão quanto às tecnologias de informação e comunicação utilizadas.

Finalmente, no modelo dá-se conta das interacções que ocorrem nos níveis estruturantes da organização complexa.



CONCLUSÕES E SUGESTÕES

I

No presente trabalho evidenciou-se em primeiro lugar que todas as organizações das simples às mais complexas das galáxias aos átomos, obedecem a leis gerais que decorrem em última análise do Segundo Princípio da Termodinâmica. Nesta perspectiva energia e informação constituem os dois factores determinantes da manutenção das organizações em equilíbrio dinâmico, ou dito de outro modo, da sua funcionalidade.

Sendo o objectivo do presente trabalho tratar de organizações artificiais no sentido que são criadas pelo homem e não geradas pela natureza, excluiu-se à partida a problemática inerente ao factor energia. A atenção foi exclusivamente focada sobre a informação. Todavia, ainda que artificiais, o paralelismo com as organizações naturais é em muitos aspectos evidente e passível de comparação, nomeadamente ao nível dos mecanismos íntimos que regem o binómio ordem / desordem, ou dito de outro modo, do “diálogo” entropia / neguentropia. Do equilíbrio dinâmico resultante deste “diálogo” depende o sucesso e a sobrevivência das organizações criadas pelo homem, as quais como se sabe se defrontam

num conflito permanente, não só pela sobrevivência mas também pela primazia nos meios onde naturalmente actuam. Do que foi dito, conclui-se, no abstracto, a importância da informação.

Transpondo agora estes princípios gerais que se compreendem à luz da Termodinâmica, para a vida real das organizações muito particulares que são as empresas, a questão referida da informação assume uma dimensão tangível e cuja importância não escapa aos decisores, quer eles intervenham a nível estratégico, a nível táctico ou a nível operacional.

Gerir é processar informação. É com base, pois, em informação que, nas empresas se desenvolve o processo de tomada de decisão, isto é, a conversão de informação em acção. Compreensivelmente, a probabilidade de sucesso aumenta naturalmente quando o processo de decisão é fundamentado em informação de qualidade (fidedigna). A disponibilidade de informação de qualidade é, porém, fruto, ela própria, da capacidade de decisão em sede de delineamento da estratégia informacional bem como das opções tecnológicas.

Consequentemente, as empresas, para tirarem proveito da informação, deverão formatar-se estruturalmente de maneira a melhor captarem o fluxo informativo através do estabelecimento de interfaces adequadas. Dito de outro modo, deverão constituir-se como sistemas de informação, capacitados para a pesquisa, recepção e tratamento da informação, em condições tecnológicas de máxima eficiência.

Nos tempos actuais, em que a “queda dos muros” propicia o avanço do processo de globalização cultural, científica, tecnológica e económica, a turbulência surge como um corolário natural, um fenómeno que há muito a Física e a Matemática sabem explicar e tratar numericamente. Todavia, este não é o ambiente com que até há poucos anos as organizações em geral e as empresas em particular contavam como “background” para delineamento das suas estratégias e para a tomada das suas decisões.

As empresas (e as organizações fundadas pelo homem, em geral) actuam assim, constantemente, em ambiente de turbulência, isto é, em situação onde os parâmetros de referência variam aparentemente de forma aleatória. Nestas condições, a incerteza implica, no acto de tomada de decisão uma ponderação equilibrada entre risco e oportunidade, qualquer que seja, aliás, o nível de decisão: estratégico, táctico ou operacional.

Na perspectiva do delineamento estratégico e da tomada de decisão em ambiente de turbulência, a proficiência da gestão dependerá, por maioria de razão, das características técnicas do sistema de informação, que propicia a qualidade e a velocidade de acesso à informação. Mas fundamentalmente também das capacidades intrínsecas dos decisores de seleccionar a informação e de discernir sinais informativos pertinentes, mesmo quando provenientes de sectores marginais, aparentemente irrelevantes. Tal capacidade deriva, em última análise das características

mentais, da bagagem cultural e da propensão para inserir as problemáticas específicas numa visão holística.

A Teoria Geral dos Sistemas, de von Bertalanfy, integra estes conceitos e propicia a visão holística dos sistemas, bem como dos fenómenos a eles associados. Todavia, novas teorias e novas ferramentas de Matemática e de Geometria vêm dar corpo à construção de visões sucessivamente mais abrangentes e unificadoras dos fenómenos conhecidos. Com efeito, neste novo contexto, uma atenção particular é dada à Teoria do Caos e à Geometria fractal, pois elas proporcionam um ambiente excepcionalmente favorável para explorar e modelizar sistemas complexos adaptativos, que constituem, de facto, o objecto sobre o qual incide o presente trabalho. Com efeito, a Teoria do Caos e a Geometria fractal, com a sua linguagem formada por algoritmos que podem ser transformados em formas e estruturas apenas com a ajuda do computador, permite munir o decisior com um poderoso instrumento descriptivo. Esta nova linguagem pode descrever tanto a forma de uma nuvem como os mercados de capitais. Na essência, a Teoria do Caos e a Geometria Fractal questionam radicalmente a compreensão de equilíbrio, da harmonia e da ordem - na natureza como nos domínios científicos, desde a Física à Biologia, da sociedade aos mercados, por exemplo.

A informação constitui, como se viu, o factor determinante, quer na manutenção dos equilíbrios dinâmicos em sistemas abertos, quer, se em excesso, na sua desregulação. É natural pois que tenha surgido a preocupação de quantificar a informação e de a tratar, desse ponto de vista, com a mesma agilidade com que se trata a energia.

A medida da informação constitui pois, a partir do início do século XX, uma preocupação maior, em particular por parte das entidades que tinham, por missão, assegurar o seu transporte. Coube a Shannon formular a Teoria da Informação. Na sua expressão mais esquemática, a Teoria da Informação esquematiza o processo de comunicação considerando uma entidade emissora, um canal de transmissão e uma entidade receptora. A mensagem emitida deverá dar entrada no canal, codificada de acordo com um alfabeto de sinais e símbolos e, posteriormente, deverá sofrer um processo de descodificação à saída do canal. A inovação devida a Shannon foi a de estabelecer uma fórmula de cálculo da quantidade de informação que circula no canal, relativa a uma determinada mensagem, em que faz intervir não só a probabilidade de ocorrência de cada um dos símbolos, mas também o número de símbolos intervenientes.

Na perspectiva de Shannon a informação é uma quantidade abstracta, mensurável, cujo valor não depende do conteúdo que carreia, mas da probabilidade associada à ocorrência de um acontecimento.

Esta definição de informação revelou-se extremamente útil e prática no contexto das telecomunicações. Contudo, ela encerra uma limitação, no que respeita à medida da quantidade de informação em organizações complexas. Com efeito, a informação, como grandeza absoluta, possui o mesmo valor numérico para qualquer observador. Pelo contrário, o seu valor humano é uma grandeza relativa que terá valores diferentes segundo o observador que a analisar e utilizar posteriormente.

A capacidade do receptor para usar correctamente a informação depende da sua cultura do receptor/decisor, entendida aquela como conhecimento acumulado, inter-relacionado e estruturado ao nível da mente. Um excesso de informação pode, por conseguinte, transbordar as capacidades de assimilação e provocar um estrangulamento da organização.

Consequentemente, decidir sobre a informação, ou dito de outro modo, implementar práticas sistémicas de gestão da informação, constitui um imperativo estratégico, no contexto do exercício do poder e no quadro da competição em que as organizações gravitam.

As tecnologias de informação e comunicação (TIC) revolucionaram as noções de tempo e de espaço e vieram alterar radicalmente os hábitos sociais e as opções intelectuais.

A nível empresarial, as TIC's induziram a globalização da economia, ainda que não constituam o único factor responsável por este fenómeno e, nesse novo contexto, alteraram profundamente a maneira de negociar.

Outra das conclusões que se extrai do impacte das TIC's, é a de que o dinheiro perdeu o seu tradicional carácter tangível para se tornar virtual. A par da instantaneidade e do encurtamento de distâncias, a transformação do dinheiro numa realidade virtual em suporte electrónico, constitui uma das consequências mais revolu-

onária proporcionada pelas TIC's e com maiores repercussões na economia, particularmente na economia financeira.

Uma postura empresarial que leve em conta estes objectivos de organização, posiciona-se favoravelmente para actuar em ambiente de turbulência, que constitui a regra, actualmente. Com efeito, com o esbatimento de fronteiras e o alastramento do processo de globalização com particular incidência na economia, assiste-se não só à densificação das interligações e dependências, como ao global acesso à informação. Nestas condições, a ocorrência de uma qualquer pequena alteração dos parâmetros socio-económicos ou tecnológicos, num ponto, pode ter um impacto significativo sobre organizações empresariais geograficamente distantes e, deste modo, desempenhar o papel de atrator (ou indutor de perturbação). A simultaneidade e sequencialidade de ocorrência destas perturbações gera o estado de turbulência, atrás referido, no qual, necessariamente, se têm que tomar decisões.

O sucesso empresarial, neste novo contexto, dependerá da organização interna, como se referiu, e da capacidade de aprender a identificar as situações emergentes que podem derivar de um atrator estranho. As novas correntes da ciência, nomeadamente as Teorias da Complexidade e do Caos, ajudam a compreender o ambiente empresarial e a delinear uma nova metodologia de pensamento estratégico, holístico e transdisciplinar.

II

*Seria ilusório tentar entender o mundo que nos rodeia, e nele, em particular, o comportamento das organizações complexas adaptativas, sem que se procure inserir o presente, no processo evolutivo do pensamento do homem e das teorias que, desde a mais longínqua antiguidade, prosseguem exactamente o objectivo de compreender a realidade universal, ou melhor, de identificar os princípios unificadores, que com Deus ou à sua margem, possam explicar todos os fenómenos desde a géne-
se da vida, ao movimento dos astros ou ao comportamento das socie-
dades ou dos mercados. Isto é, aquela que foi a preocupação maior, que corta transversalmente a história da humanidade, que mobilizou os es-
píritos mais notáveis, não pode deixar de estar presente também, na
análise que hoje se quiser fazer da teias de linhas de força que envolvem
as organizações e condicionam as estratégias e as tomadas de decisão.*

Foi nessa perspectiva que se perscrutou o passado, se procurou acompanhar a evolução do pensamento científico e compreender as influências que os conhecimentos e as teorias sucessivamente mais abrangentes e unificadoras, exerceiram sobre a ciência económica e sobre o conceito de organização

*O universo, com os seus corpos celestes mudando de posição relati-
vamente à Terra, de forma perpétua, cíclica e regular, estimula a con-
templação e constituiu, naturalmente, uma primeira fonte de inspiração
à reflexão e à teorização. Daí resultaram leis universais determinísticas,
que condicionaram o pensamento e se repercutiram sobre a visão do*

mundo, não só do universo, mas de todas as coisas e fenómenos, simples e complexos, com que o homem se confronta.

Após um longo período onde o pensamento do homem repousava sobre um conjunto de certezas, concebendo o funcionamento do mundo com a regularidade de um relógio e o futuro rigorosamente determinado pelo passado, a ciência, emancipada da religião e da Igreja, não só descobre a incerteza, como lhe atribui a causa pela estabilidade das organizações e pela evolução.

Com Descartes e Newton inicia-se o período de revolução científica que cava a fronteira entre a Idade Média e a Ciência Moderna. Na Idade Média perdurou, entre religião e ciência, desde São Tomás de Aquino até Galileu, uma relação simbiótica. Durante seis séculos, a religião cristã beneficiou da ciência que fornecia as explicações plausíveis para os dogmas, enquanto que as ciências recebiam em troca, a credibilidade. Esta relação dual chega a termo com Galileu.

Newton concebeu o Universo como um mecanismo de relógio, para representar o auge em fiabilidade e perfeição mecânica. As suas metáforas marcaram profundamente o pensamento científico, durante três séculos, e tornaram-se em corpo doutrinal para a esmagadora maioria dos ramos científicos. No entanto, o grande contributo de Newton consistiu na demonstração de que simples enunciados matemáticos podem conduzir a avaliações muito precisas e de que os corpos materiais não se deslocam por acaso, mas segundo regras matemáticas. Newton introduziu na ciência, o conceito de determinismo: de acordo com de-

terminadas leis e tendo em conta as condições iniciais de um sistema, será possível prever o seu estado futuro. Esta visão determinística é levada ao extremo por Laplace, para quem tudo o que acontece no Universo, tudo o que aconteceu ou está para acontecer está já fixado e inalterado.

Esta foi a irradiação intelectual do século XVII, que iria influenciar os economistas como Adam Smith, a partir do século XVIII. Enquanto os economistas, se fixam nas abstracções e os matemáticos investigam de modo a tornar a Economia uma ciência exacta. Este processo culmina com a publicação, em 1874, dos “Elementos de Economia Política Pura” de Walras, obra que consolida a Economia em bases mecanicistas. Para Walras, “a teoria pura da Economia ou a teoria de troca e valor da troca” era simplesmente “uma ciência física ou matemática, como a mecânica ou a hidrodinâmica”. Pode escrever-se a história do pensamento económico clássico após Walras como uma longa anotação com base na obra de Newton; com as suas equações e os seus instrumentos analíticos.

O paradigma de Newton viria a ser questionado no final do século XIX por Poincaré, que demonstrou que se forem considerados sistemas, não de dois corpos, mas de três ou mais, deixam de se verificar as certezas de Newton pois bastará uma pequena alteração num dos corpos para que possa ocorrer uma grande perturbação (caótica) em outros componentes do sistema.

O problema dos três corpos viria a ser retomado, ainda no sec. XIX, entre outros, por Poincaré, levando-o a fazer emergir o conceito de caos. Poincaré entreviu que ocorriam situações em que uma pequeníssima alteração das condições iniciais, tal como na posição ou na velocidade de um dos três corpos, podia provocar a mudança de uma situação de estabilidade, para uma nova situação de caos. Assim, Poincaré descobriu que um sistema de três corpos aparentemente simples, como a Terra, a Lua e o Sol, regido por uma lei tão precisa e impositiva como a da gravitação universal, podia dar origem ao imprevisível e indefinido. Com a introdução da incerteza, ruía por terra o determinismo newtoniano.

Ao fracassar a aplicação dos seus instrumentos matemáticos ao problema dos três corpos, que eram a Terra, a Lua e o Sol, Newton cria o gérmen que faria ruir a sua teoria, dois séculos mais tarde. Mas não teria seguramente consciência da importância transcendental do problema, que viria a desembocar, sobre um novo paradigma do mundo, caracterizado pela globalização e pela turbulência. Este é sem dúvida, o contexto em que gravitam as organizações das simples às mais complexas, sejam elas constituídas por um só indivíduo, inseguro quanto à irregularidade de funcionamento dos seus múltiplos processos de controlo homeostático, quer de uma sociedade, permanentemente sacudida pelas tensões geradas entre grupos sociais, ou ainda de uma empresa, sujeita às flutuações aleatórias, embora só na aparência, dos parâmetros de referência.

Num processo de tomada de decisão, a chave do sucesso reside na capacidade de antecipação de acontecimentos futuros. Quem decide depara-se diariamente com o desafio de responder à mudança, num mundo em que as teias de interligações se sucedem, estabelecendo-se e desfazendo-se, a um ritmo sem precedentes.

As Teoria da Complexidade e do Caos vieram proporcionar uma nova perspectiva do mundo real, o mundo no qual se tomam decisões e, mais do que isso, assumiram-se como instrumentos poderosos quer na capacidade de antecipar o futuro e responder à mudança, quer na capacidade de influenciar a mudança emergente.

Os actuais modelos de decisão referem-se, por consequência ao novo paradigma, que contrasta em absoluto com aquele outro que até há relativamente pouco tempo, constituía o referencial de tomada de decisão, herdeiro, longínquo é certo, mas fiel ao paradigma newtoniano de estabilidade e de certeza que infundia confiança ao decisor.

O novo paradigma encontra suporte teórico nas Teorias da Complexidade e do Caos e a sua abordagem pressupõe uma “démarche” interdisciplinar, pois, nesta perspectiva tudo tem a ver com tudo,

Retomando a afirmação, dir-se-á agora que a chave de sucesso de uma organização reside, quanto mais complexa ela for, na capacidade de “navegar” na turbulência, assumindo de vez que esse regime não será mais uma exceção gerada por qualquer crise esporádica, mas uma regra universal

III

Pelas razões expostas ao longo dos diversos capítulos que integram este trabalho, das quais se destaca a globalização e turbulência, características do novo o paradigma de referência, bem como o império da informação servido por tecnologias em acelerado grau de desenvolvimento para insuspeitados horizontes, os modelos deterministas revelam-se desadequados. Assim, emerge a necessidade de encontrar novos modelos de decisão concebidos em harmonia com o conhecimento científico actual e utilizadores das modernas ferramentas da matemática e da geometria, concretamente, as derivadas da Teoria do Caos e subordinadas à Geometria Fractal.

Contrariamente ao que se verificou nos séculos passados, os diversos ramos científicos interagem, cooperam, sobrepõem-se e oferecem-nos uma visão holística da realidade. Sabe-se hoje assim, que tudo actua sobre tudo, ainda que indirectamente e se bem que nem sempre se saiba como. Consequentemente, não será possível doravante tomar decisões pontuais sem dispor de uma visão global e de mecanismos de integração e de selecção de informação.

A ruptura com a visão mecanicista, projecta para um novo modelo no qual o homem ocupa uma posição central. Consequentemente, na concepção de novos modelos de decisão é imperativo que intervenha a cultura “sensus lato”, o conhecimento “sensus stricto” e a sua própria idiosyncrasia. Sendo certo que destes dois aspectos, aquele que é suscetível de sofrer alterações é a cultura e no seu seio, o conhecimento, o pro-

cesso de formação assente no binómio ensino/aprendizagem reveste-se de carácter estratégico.

Consequentemente, a proposta de modelo que se apresentou neste trabalho, decorre da referida perspectiva holística, transdisciplinar e é tributária de vectores estratégicos como: (1) a informação e as tecnologias da informação e da comunicação; (2) o conhecimento e a formação; (3) os modelos instrumentais; (4) a estrutura das organizações complexas; e, (5) a selecção da informação.

Com o modelo apresentado não se procura oferecer uma receita, que seria de todo inadequada pois cada situação é diferente de outra e em cada momento a aleatoridade que decorre da turbulência pode surpreender o decisor. Contudo, crê-se que o modelo proposto encerra princípios metodológicos e de prioridade que poderão auxiliar quer no delineamento de uma estratégia organizacional, quer no processo de tomada de decisão

IV

Um trabalho de investigação compreende uma sucessão de etapas ao longo das quais o investigador, como confessa Morin, sempre que tenta aproximar-se do problema em estudo, sente-se mais afastado dele, pelas limitações dos seus próprios conhecimentos. Neste processo, o investigador opta então, em primeira mão, por desaprender, para, em seguida, reaprender de novo revendo as bases do seu conhecimento, num processo que se não encerra num círculo, mas que se prolonga numa espiral, a que só a inevitabilidade da sua própria entropia, põe termo. O confronto com as suas limitações e o aprofundamento dos seus conhecimentos científicos conduzem-no ao mundo excitante da descoberta de que na ciência não há fronteiras e que os muros se desmoronam à medida que se caminha para a essência dos fenómenos.

A conclusão de um trabalho de investigação coloca, geralmente, mais questões do que aquelas formuladas de início. Assim é de facto, pelo que é possível identificar um conjunto de trabalhos, através dos quais se poderá desenvolver, aprofundar e cimentar, matérias abordadas ao longo da preparação desta tese de doutoramento. De entre vários temas, opta-se por sugerir quatro:

1. *A nível da complexidade e no contexto empresarial “tudo está ainda em aberto”, verificando-se a existência de um vastíssimo campo de investigação que abrange desde as instituições “sensus lato” até às empresas “sensus stricto”;*

2. *A Teoria do Caos e a Geometria Fractal, encontram-se devi-damente testadas e aplicadas a diversos ramos da ciência como a Física, a Matemática, a Medicina, entre outros, mas a nível da Economia e da Gestão de Empresas têm, ainda, um longo trajecto a percorrer, antes de poderem oferecer instru-mentos acessíveis ao delineamento estratégico e à tomada de decisão;*
3. *Os laboratórios experimentais de Gestão de Empresas e de Economia são organizações, compostas por sua vez, por outras organizações, os seres humanos, cada um dos quais com a sua cultura e idiossincrasia, o que condiciona um vasto conjunto de simulações com vista a extrapolar o futuro;*

Finalmente,

4. *A Teoria do Caos e a Geometria Fractal permitem identificar ciclos e tendências e consequentemente evitar crises emergen-tes. Este é um vasto campo de investigação, de carácter trans-disciplinar, que permite congregar investigadores de diferen-tes ramos do saber e constitui por excelência, uma área de in-vestigação de grande aplicabilidade, que exige uma elevada incorpulação de conhecimento científico e se traduz num es-tímulo intelectual.*

Bibliografia Consultada

1. A.B.D.P. *Funcionamento dos Mercados de Futuros e Opções*. 3.ed. Porto, Instituto Mercado de Capitais, 1996.
2. A.B.D.P. *Introdução aos mercados de futuros e opções*. 4.ed. Porto, Instituto Mercado de Capitais, 1996.
3. A.B.D.P/BANDEIRA, L. *Instituições e Produtos Financeiros*. Porto, Instituto Mercado Capitais, 1997.
4. ACHESON, D. *From Calculus to Chaos: an introduction to dynamics*. Oxford , Oxford University Press, 1998.
5. AKELA, S. R. e GREENBAUM, S. I. *Innovations in Interest Rates, Duration Transformations, and Bank Stock Returns*. Journal of Money, Credit and Banking, Vol. 24, n.º 1, pp. 27-42, 1992.
6. ALVAREZ, J. M. da ROCHA, *Jerarquías óptimas en mercados con producción conjunta e información asimétrica*. Universidade de Vigo, 37 pp., 1993.
7. ALVES, C. F. *Taxas de Juro: Estrutura de prazos e modelos dinâmicos*. Porto, Instituto Mercado de Capitais, 1996.
8. ALVES, R. H. *Políticas fiscais nacionais e União Económica e Monetária na Europa*. Porto, Instituto Mercado de Capitais, 1996.
9. ANDERSON, P. W.; ARROW, K. J.; PINES, D. (Editores) *The Economy as an Evolving Complex System*. The Proceedings of the Evolutionary Paths of the Global Economy Workshop, Vol. V. Santa Fé, New Mexico, 1987.

10. ATLAN, H. *A tort et à raison: Intercritique de la Science et du Mythe*. Paris, Éditions du Seuil, 1986.
11. ATLAN, H. *L'organisation biologique et la théorie de l'information*. Paris, Hermann, 1992.
12. AxSys BANKING SYSTEMS. *Retail Banking Strategies in Action: a Worldwide Collection of Surveys & Case Studies*. 1.ed. Dublin, Lafferty Publications Ltd. 1994.
13. BARROW, J. D. *O Mundo dentro do Mundo: viagem à fronteira do espaço e do tempo*. Trad. (I./P.) de F. Fernandes e J. C. Fernandes. Lisboa, Gradiva, 1998. (Série “Ciência Aberta”).
14. BASU, S. N. *Strategic Credit Management*. New York, John Wiley & Sons, 1995.
15. BEATTIE, V. A.; CASSON, P. D.; DALE, R. S. et al. *Banks and Bad Debts: Accounting for Loan Losses in International Banking*. Chichester (England), John Wiley & Sons, 1995.
16. BERGE, A.; HANCOCK, D. e HUMPHREY, D. B. *Bank efficiency derived from the profit function*. Journal of Banking and Finance, n.º 17, pp. 317-347, 1993.
17. BERGÉ, P.; POMEAU, Y.; VIDAL, C. *L'ordre dans le chaos*. Paris, Hermann, 1998. (Coleção “Enseignement des Sciences”).
18. BERTALANFFY, L. VON *General System Theory*. 2.ed. New York, George Braziller, 1998.
19. BIEZUNSKI, M. *Histoire de la Physique Modeme*. 2.ed. Paris, Éditions La Découverte, 1993.
20. BLAUG, M. *A Metodologia da Economia*. Trad. (I./P.) de V. Calvete. Lisboa, Gradiva, 1994. (Coleção “Trajectos”).

21. BLAUG, M. *História do Pensamento Económico*. 1º Vol. Trad. (I./P.) de M. Branco, J. Lobo e A. Neto. Ed. 1ª. Lisboa. Publicações Dom Quixote, 1989.
22. BLAUG, M. *História do Pensamento Económico*. 2º Vol. Trad. (I./P.) de Stella Monteiro. Ed. 1ª. Lisboa. Publicações Dom Quixote, 1990.
23. BOUDON, R. O *Lugar da Desordem*. Trad. (Fr./P.) de J. L. Casanova. Lisboa, Gradiva, 1990. (Série “Ciência Aberta”).
24. BOUTOT, A. *L'invention des formes : chaos, catastrophes, fractales, structures dissipatives, attracteurs étrangers*. Paris, Éditions Odile Jacob, 1993.
25. BRIGGS, J. e PEAT, F. D. *Un miroir turbulent: guide illustré de la théorie du chaos*. Trad. (I/Fr) de D. Stoquart. Paris, InterÉditions, 1991.
26. BROCK, W. A.; HSIEH, D. A.; LEBARON, B. *Nonlinear Dynamics, Chaos, and Instability: Statistical theory and economics evidence*. 3.ed. Massachusetts , MIT Press, 1993.
27. BRUNO, G. *Acerca do Infinito, do Universo e dos Mundos*. Trad. (It./P.) A Montenegro. Ed. 4ª. Lisboa. Fundação Calouste Gulbenkian.
28. BUNDE, A. e HAVLIN, S. (Editores). *Fractals and Disordered Systems*. 2.ed. Berlim, Springer-Verlag, 1996.
29. CALLON, J. D. *Competitive advantage through information technology*. New York, McGraw-Hill, 1996.
30. CAMPBELL, T. S. *Financial Institutions, Markets and Economic Activity*. New York, McGraw-Hill, 1982. (“Series in Finance”).
31. CANALS, J. *Competitive Strategies in European Banking*. Oxford, U.K , Clarendon Press, 1994.

32. CARMOY, H. *Estratégia Bancária: a recusa da discordância.* Trad. (I./P.) de E. Cruz, O. Ferreira, D. Sousa. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1992. (Colecção “Biblioteca de Economia”).
33. CARVALHO FERREIRA, J. M. et. al. *Psicossociologia das organizações.* Lisboa, McGraw-Hill, 1996.
34. CARVALHO RODRIGUES, F. *As novas tecnologias, o futuro dos impérios e os quatro cavaleiros do apocalipse.* Lisboa, Publicações Europa-América, 1994. (Colecção “Forum da Ciência”).
35. CARVALHO RODRIGUES, F.; RAMOS, L. *Ontem um anjo disse-me: diálogos para o século XXI.* Lisboa, Publicações Europa-América, 1995. (Colecção “Forum da Ciência”).
36. CÉSAR DAS NEVES, J. L. *Uma Galeria de Arte: visita guiada aos grandes marcos da história da economia.* Lisboa/S.Paulo, Verbo, 1995.
37. CHAU, F. *A liberalização financeira, o rácio cooke e “risk-taking”.* Lisboa, Revista da Banca, n.º 20, pp. 165-175, 1991.
38. CHAUCHARD, P. *Sociétés Animales, Sociétés Humaines.* 3.ed. Paris, Presses Universitaires de France, 1970. (Colecção “Que Sais-je”).
39. CHAUVET, G. *La Vie dans la Matière.* Paris, Flammarion, 1995. (Colecção “Champs”).
40. CHEN SON-NAN e LEE, CHENG-FEW (Ed.) . *Advances in Investments Analysis and Portfolio Management.* Vol. 1. London, Jai Press Inc., 1991.
41. CHORAFAS, D.N. *Chaos Theory in the Financial Markets.* Chicago, Probus Publishing Co., 1994.

42. COELHO, H. *Tecnologias da informação*. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1986. (Colecção “Universidade Moderna”).
43. COMBEMALE, P. *Introduction à Keynes*. Paris, Éditions La Découverte, 1999.
44. COSTA PINTO, J. *O sistema financeiro português*. Lisboa, O Economista, pp. 73-75.
45. CRICK, F. *Vida: o mistério da sua origem e natureza*. Trad. (I./P.) de M. Magalhães. Lisboa, Gradiva, 1988. (Colecção “Ciência Aberta”).
46. DAFT, R. L. *Organisation Theory and Design*. 6.ed. Cincinnati, Ohio, South-Western College Publishing, 1997.
47. DALMEDICO, A. D. ; CHABERT, J.-L. ; CHEMLA, K. (Direcção). *Chaos et Déterminisme*. Paris, Édition du Seuil, 1992. (Série “Point Sciences”).
48. DANIELS, N. C. *Estratégias Empresariais e Tecnologias da Informação*. Trad. (I./P.) de M. L. Santos. Lisboa, Caminho, 1997. (Colecção “Biblioteca de Economia e Gestão”).
49. DAVIS, P. *About Time: Einstein's unfinished revolution*. London, Penguin Books, 1995.
50. DAVIS, P. J. e HERSH, R. *O Sonho de Descartes*. Trad. (I./P.) de F. Nunes e F. Bensabat. Lisboa, Difusão Cultural, 1997. (Série “Ciência Hoje”).
51. DAWKINS, R. *O Gene Egoísta*. Trad. (I./P.) de A. P. Oliveira. Lisboa, Gradiva, 1989.
52. DECHERT, W. D. (Editor). *Chaos Theory in Economics: Methods, Models and Evidence*. Cheltenham, U.K., Edward Elgar Publishing Ltd. , 1996.

53. DELFAUD, P. *Keynes e o keynesianismo*. Trad. (Fr./P.) de E. C. Lima. Lisboa, Publicações Europa- América, 1988. (Colecção “Saber”).
54. DENIS, H. *História do Pensamento Económico*. Trad. (Fr./P.) de António Borges Coelho. 2 Vol. Lisboa, Círculo de Leitores, 1978.
55. DESCARTES, R. *Discurso do Método*. Trad. (Fr./P.) de Pinharanda Gomes. 2.ed. Lisboa, Guimarães Editores, 1994. (Colecção “Filosofia & Ensaios”).
56. DESCARTES, R. *Os Princípios da Filosofia*. Trad. (Fr./P.) de A. Ferreira. 6.ed. Lisboa, Guimarães Editores, 1998. (Colecção “Filosofia & Ensaios”).
57. DION, E. *Invitation à la Théorie de l'Information*. Paris, Édition du Seuil, 1997. (Série “Point Sciences”).
58. DUPUY, J.-P. *Rationalité et irrationalité des choix individuels*. Paris, Pour La Science: Dossier « Les Mathématiques Sociales », pp. 68-73, juillet 1999.
59. ECCLES, J. C. *Évolution du cerveau et création de la conscience*. Trad. (I/Fr) de J.-M. Luccioni. Paris, Flammarion, 1994. (Colecção “Champs”).
60. EDMINSTER, R. O. *Financial Institutions: Markets and Management*. New York, McGraw-Hill, 1980.
61. EKELAND, I. *A Matemática e o Imprevisto: Símbolos do Tempo de Kepler a Thom*. Trad. (Fr./P.) de M. Vieira. Lisboa, Gradiva, 1993. (Série “Ciência Aberta”).
62. EKELAND, I. *Le Chaos*. Paris, Flammarion, 1995. (Colecção “Dominos”).

63. ELTON, E. J. e GRUBER, M. J. *Modern Portfolio Theory and Investment Analysis*. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1984.
64. FALCONER, K. *Techniques in Fractal Geometry*. Chichester, U.K, John Wiley & Sons, 1997.
65. FAMA, E. F. *Efficient Capital Markets: II*. The Journal of Finance, Vol. XLVI, n.º 5 *and Investment Analysis*. U.S.A., Probus Publishing, Dezembro, 1991.
66. FAMA, E. F. *Foundations of Finance, Portfolio Decisions and Security Prices*. New York, Inc. Publishers, 1976. (Série “Basic Books”).
67. FAUGÈRE, J.-P. e VOISON, C. *O Sistema Financeiro e Monetário Internacional: crises e mudanças*. Trad. (Fr./P.) de C. G. Fonseca. Lisboa, Inst. Piaget, 1997. (Colecção “Economia e Política”).
68. FIOLHAIS, C. *Universo, computadores e tudo o resto*. Lisboa, Gradiva, 1994. (Colecção “Ciência Aberta”).
69. FLAMANT, M. e SINGER-KEREL, J. *As crises económicas*. Trad. (Fr./P.) de Casais Franco. Lisboa, Publicações Europa-América. (Colecção “Saber”).
70. FORTI, A. et. al. *La Mort de Newton*. Paris, Maisonneuve & Larose, 1996. (Colecção “Prometheus”).
71. FRANK, R. H. *Microeconomia e Comportamento*. Trad. (I./P.) de Alexandra Cunha-Vaz e Vera M. da Costa Empis. 3.ed. Lisboa, McGraw Hill de Portugal, 1998.
72. GALBRAITH, J.K. *A Economia Política: uma história crítica*. Trad. (I./P.) M. F. Cordeiro César. Lisboa. Publ. Europa América, 1989.(Colecção “Economia & Gestão”).

73. GALBRAITH, J.K. *Escritos de Economia*. Trad. (I./P.) E. Calheiro. Lisboa. Editorial Notícias, 1985.
74. GALÍ, J. *Keeping Up with the Joneses: Consumption Externalities, Portfolio Choice, and Asset Prices*. Journal of Money, Credit and Banking, Vol. 26, n.º 1, pp. 1-8, 1994.
75. GART, A. *Regulation, Deregulation, Reregulation : the Future of the Banking, Insurance, and Securities Industries*. New York, John Wiley & Sons, 1994.
76. GATES, B. Rumo ao Futuro. Trad. (I./P.) de Acento 22. Lisboa, McGraw Hill de Portugal, 1995.
77. GELL-MANN, M. *O Quark e o Jaguar: aventuras no simples e no complexo*. Trad. (I./P.) de J. L. Malaquias. Lisboa, Gradiva, 1997. (Colecção "Ciência Aberta").
78. GLEICK, J. *Chaos: making a new science*. 3.ed. London, Abacus, 1993.
79. GOLDFINGER, C. *La géofinance: Pour comprendre la mutation financière*. Paris, Éditions du Seuil, 1986.
80. GÓMES, F. e RIVAS, P. *Estruturas Organizativas e Informação na Empresa*. Trad. (E./P.) de A. Tomás e R. Oliveira. Lisboa, Editorial Domingos Barreira, 1989. (Colecção "Biblioteca de Gestão").
81. GOODHARD, C. *Money Information and Uncertainty*. Mcmillan, 2.ed., London, 1989.
82. GOODSTEIN, D.L. e GOODSTEIN, J.R. *A Lição esquecida de Feynman: o movimento dos planetas em torno do Sol*. Trad. (I./P.) de M. A. Gomes da Costa. Lisboa, Gradiva, 1997. (Série "Ciência Aberta").
83. GRAY, J. L. e HARVEY, T. W. *Quality Value Banking*. New York, John Wiley & Sons, 1992.

84. GRIBBIN, J. e GRIBBIN, M. *O Cometa do Caos: a ameaça ao planeta azul.* Lisboa, Publicações Europa-América, 1998.
85. GUERARD, J. e VAUGHT, H. T. *The Handbook of Financial Modelling.* Chicago, Probus Publishing Co., 1989.
86. GUERRIEN, B. *La société, objet complexe et changeant.* Paris, Pour La Science, Dossier « Les Mathématiques Sociales », pp. 20-21, Juillet 1999.
87. GUILLEN, M. *Cinco Equações que mudaram o Mundo: o poder e a poesia da matemática.* Trad. (I./P.) de H. Aranha. Lisboa, Gradiva, 1998. (Série “Ciência Aberta”).
88. HEFFERNAN, S. A. *A Computation of Interest Equivalences for Nonprice Characteristics of Bank Products.* Journal of Money, Credit and Banking, Vol. 24, n.º 2, pp. 163-194, 1992
89. HEMPEL, G. H.; SIMONSON, D. G.; COLEMAN, A. B. *Bank Management: text and cases.* 4.ed. New York, John Wiley & Sons, 1994.
90. HIRSHLEIFER, J.; RILEY, J. G. *The Analytics of Uncertainty and Information.* New York, Cambridge University Press, 1995.
91. HOLLAND, J. H. *A Ordem Oculta: como a adaptação gera a complexidade.* Trad. (I./P.) de J. L. Malaquias. Lisboa, Gradiva, 1997. (Série “Ciência Aberta”).
92. HOWE, L. e WAIN, A. Coordenação) *Prevendo o Futuro.* Trad. (I./P.) de M. da Graça Pinhão. Lisboa, Publicações Europa-América, 1995. (Série “Forum da Ciência”).
93. HOYLE, F. *O Universo Inteligente: uma nova perspectiva da criação e da evolução.* Trad. (I./P.) de C. Jardim e E. Nogueira. 3.ed. Lisboa, Editorial Presença, 1993.

94. JACOB, F. *O Ratinho, a Mosca e o Homem.* Trad. (Fr./P.) de M. Sérvulo Correia. Lisboa, Gradiva, 1997. (Colecção "Ciência Aberta").
95. JACOUD, G. e TOURNIER, E. *Les grands auteurs de l'Économie.* Paris, Haltier, 1998.
96. JOHNSON, H. J. *Financial Institutions and Markets: a global perspective.* New York, McGraw-Hill, 1993. (Colecção "Economics Series").
97. KAHNEMAN, D. e TVERSKY, A. *La peur et le goût du risque.* Paris, Pour La Science: Dossier « Les Mathématiques Sociales », pp. 74-80, juillet 1999.
98. KAST, F. E.; ROSENZWEIG, J. E. *Organisation & Management: a Systems and Contingency Approach.* 4.ed. New York, McGraw-Hill, 1985.
99. KEYNES, J. M. *The General Theory of Employment, Interest, and Money.* Prometheus Books, 1997
100. KLEEN, P. *Moldar o Futuro: desenhar e gerir negócios através da tecnologia de informação.* Trad. (I./P.) de L. A. Fraga. Lisboa, Edições Cetop. 1994.
101. KOONTZ, H., O'DONNELL, C. e WEIHRICH, H. *Administração: Fundamentos da Teoria e da Ciência.* Trad. (I./P.) de A. Z. Sanvicente. 14. ed.,2 Vols. S. Paulo, Livraria Pioneira Editora, 1986.
102. KUHN, T. S. *La Structure des Révolutions Scientifique.* Trad. (I/Fr) de L. Meyer. Paris, Flammarion, 1998. (Colecção "Champs").
103. KUMAR, P.C. e TSETSEKOS, P. *Asymmetric information, investment banking contracts and certification hypothesis.* Journal of Banking and Finance, n.º 17, pp. 117-129, 1993.

104. KURTZMAN, J. *A Morte do Dinheiro: como a economia electrónica desestabilizou os mercados mundiais e criou o caos financeiro.* Trad. (I./P.) de G. G. Goldschmidt. São Paulo, Editora Atlas, 1995.
105. LASZLO, E. *Conexão Cómica: Guia pessoal para a emergente visão da ciência.* Trad. (I./P.) de Franklin R. F. Gonçalves. Petrópolis, Editora Vozes, 1999.
106. LAUDON, K. C. e LAUDON, J. P. *Management Information Systems.* 4.ed. London, Prentice-Hall International, 1996.
107. LE BARON, B., *Chaos and Nonlinear Forecastability in Economics and Finance.* Complexidade na Economia, U.T.L., pp. 15, 1994
108. LE MOIGNE, J.-L. *A Teoria do Sistema Geral.* Trad. (Fr./P.) de J. Pinheiro. Lisboa, Inst. Piaget, 1996. (Colecção "Pensamento e Filosofia").
109. LEAKY, L. e LEWIN, R. *La Sixième Extention.* Trad. (I./Fr) de V. Fleury, Paris, Flammarion, 1995. Colecção "Champs".
110. LeBARON, B. *Chaos and Nonlinear Forecastability in Economics and Finance.* Lisboa, Complexidade na Economia, Universidade Técnica de Lisboa, 1997.
111. LEE, Cheng-Few (Editores). *Advances in Investments Analysis and Portfolio Management*, vol. 1. London, Jai Press ,1991.
112. LEITÃO, J. L.; ALVES MORAIS, J. e RESENDE, M. A. *Produtos Bancários & Financeiros.* Lisboa, Publicações Europa-América, 1996. (Colecção "Economia e Gestão")
113. LORENZ, E. N. *A Essência do Caos.* Trad. (I./P.) de C. B. David. Brasília, Editora Univ. Brasília, 1996.

114. LORENZ, K. *Três ensaios sobre o comportamento animal e humano.* Trad. (A./P.) de N. Seixas, Lisboa, Arcádia, 1975.
115. LOSEE, J. *Introdução Histórica à Filosofia da Ciência.* Trad. (I./P.) de C. Lains. Lisboa, Terramar, 1998.
116. LOUÇÃ, F. *Coisas da Mecânica Misteriosa – A Dinâmica dos Osciladores na Economia* Porto, Edições Afrontamento, 1999. (Colecção “Biblioteca das Ciências do Homem”).
117. LOUÇÃ, F. *How long is the long time? – A Critical Review of Historical Methods in Economic Research.* Working Paper Nr. 1/97, pp.13, Departamento de Economia, U.T.L., 1997.
118. LOUÇÃ, F. *Turbulência na Economia.* Porto, Edições Afrontamento, 1997. (Colecção “Biblioteca das Ciências do Homem”).
119. LOURENÇO, E. *O Esplendor do Caos.* Lisboa, Gradiva, 1998. (Colecção “Ciência Aberta”).
120. LYNCH, D. C. e LUNDQUIST, L. *Dinheiro Digital: o comércio na internet.* Trad. (I./P.) Follow-Up. Rio de Janeiro, Editora Campus, 1996.
121. MALTHUS *Essai sur le Principe de Population (I).* Trad. (I/Fr) de P. e G. Prevost. Paris, Flammarion, 1992. (Colecção “Classiques de l'Economie Politique”).
122. MALTHUS *Essai sur le Principe de Population (II).* Trad. (I/Fr) de P. et G. Prévost. Paris, Flammarion, 1992. (Colecção “Classiques de l'Economie Politique”).
123. MANDELBROT, B. B. *Fractals and Scaling in Finance: discontinuity, concentration, risk.* New York, Springer, 1997.
124. MANDELBROT, B. B. *Les Objets Fractals: forme, hasard et dimension.* 4.ed. Paris, Flammarion, 1995. (Colecção “Champs”).

125. MANDELBROT, B. B. *Fractales, Hasard et Finance*. Paris, Flammarion, 1997. (Colecção "Champs").
126. MARSHALL, A. *Principles of Economics*. Prometheus Books, 1997.
127. MARTINS BARATA, J. Moeda e Mercados Financeiros. Lisboa, Edição de Martins Barata, 1993.
128. MARX, K. *O Capital - Livro 1: O Processo de Produção do Capital*. (tomos I, II e III). Trad. (A./P.) de J. Barata Moura e outros. Lisboa, Ed. Avante, 1997.
129. MAXWELL, C. E. *Financial Markets and Institutions: the global view*. St. Paul, Minneapolis, West Publishing, 1994.
130. MEDIO, A. e GALLO, G. *Chaotic Dynamics: theory and applications to economics*. 2.ed. Cambridge, U.K., Cambridge University Press, 1993.
131. MILL, J. S. *Bentham*. Trad. (I./E.) de C. Mellizo. Madrid. Editorial Tecnos., 1993.
132. MILL, J. S. *Del Gobierno representativo*. Trad. (I./E.) de M. C. C. de Iurbe. Ed. 2^a, Madrid. Editorial Tecnos., 1994.
133. MILL, J. S. *Sobre a Liberdade*. Trad. (I./P.) de I. Sequeira. Lisboa. Editora Europa América, 1997 (Série "Grandes Obras").
134. MISHKIN, F. S. *Financial Markets, Institutions, and Money*. New York, Harper Collins College Publishers, 1995.
135. MONTALENTI, G. *Charles Darwin*. Trad. (It./P.) de J. E. R. Garcia. Lisboa, Edições 70, 1984. (Biblioteca Básica de Ciência).
136. MOORE, R. R. *Asymmetric Information, Repeated Lending and Capital Structure*. Ohio, Journal of Money, Credit, and Banking, Vol. 25, n.º 3, pp. 393-409, 1993.

137. MORIN, E. *O Método: 3. O conhecimento do conhecimento.* Trad. (Fr./P.) de M. G. de Bragança. 2.ed. Lisboa, Publicações Europa-América, 1996. (Colecção “Biblioteca Universitária”).
138. MORIN, E. *O Método: 4. As ideias - a sua natureza, vida, habitat e organização.* Trad. (Fr./P.) de E. Campos Lima. Lisboa, Publicações Europa-América, 1992. (Colecção “Biblioteca Universitária”).
139. MORIN, E. *O Paradigma Perdido: a natureza humana.* Trad. (Fr./P.) Hermano Neves. Lisboa, Publicações Europa-América, 1973 (Colecção “Biblioteca Universitária”).
140. MORIN, E. *Ciência com Consciência.* Trad. (Fr./P.) de M. G. de Bragança e M. G. Pinhão. Lisboa, Publicações Europa-América, 1994. (Colecção “Biblioteca Universitária”).
141. MORIN, E. *O Método: 1. A natureza da natureza.* Trad. (Fr./P.) de M. G. de Bragança. 3.ed. Lisboa, Publicações Europa-América, 1997. (Colecção “Biblioteca Universitária”).
142. MORIN, E. *O Método: 2. A vida da vida.* Trad. (Fr./P.) de M. G. de Bragança. 3.ed. Lisboa, Publicações Europa-América, 1999. (Colecção “Biblioteca Universitária”).
143. MULLINEUX, A. (Editor). *European Banking.* Oxford, U.K , Blackwell, 1992.
144. MYERS, S. e MAJLUF, N. *Corporate Financing and Investment Decisions When Firm Have Information That Investors Do Not Have.* Journal of Financial Economics, 13, North-Holland Publishing Company, 1984.
145. MYERS, S. e MAJLUF, N. S. *Corporate Financing and Investment Decisions When Firms Have Information That Investors Do*

168. POINCARÉ, H. *La Valeur de la Science*. Paris, Flammarion, 1994. (Colecção "Champs").
169. POPPER, K. R. *La Connaissance Objective*. Trad. (I/Fr) de J.-J. Rosat. Paris, Flammarion, 1998. (Colecção "Champs").
170. PORTER, M. E. *Estratégia Competitiva: técnicas para análise de indústrias e da concorrência*. Trad. (I./P.) de E. M. de Pinto Braga. 8^a ed. Rio de Janeiro, Editora Campus, 1991.
171. PORTER, M. E. *Vantagem Competitiva: criando e sustentando um desempenho superior*. Trad. (I./P.) de E. M. de Pinto Braga. 6^a Ed. Rio de Janeiro, Editora Campus, 1992.
172. PRIGOGINE, I. e STENGERS, I. *A Nova Aliança: metamorfose da ciência*. Trad. (Fr./P.) de M. Faria, M. M. Trincheira. 2.ed. Lisboa, Gradiva, 1986. (Série "Ciência Aberta").
173. PRIGOGINE, I. e STENGERS, I. *Entre o Tempo e a Eternidade*. Trad. (Fr./P.) de F. Fernandes e J. C. Fernandes. Lisboa, Gradiva, 1990. (Série "Ciência Aberta").
174. PRIGOGINE, I. *Les Lois du Chaos*. Paris, Flammarion, 1994. (Colecção "Nouvelle Bibliothèque Scientifique").
175. PRIGOGINE, I. *O Fim das Certezas: O Tempo, o Caos e as Leis da Natureza*. Trad. (Fr./P.) de J. Alves. Lisboa, Gradiva, 1996. (Série "Ciência Aberta").
176. QUESNAY, F. *Quadro Económico*. Trad. (Fr./P.) de T. Car doso. Ed. 3^a. Lisboa. Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.
177. QUINTELA VARAJÃO, J. E. *A Arquitectura da Gestão de Sistemas de Informação*. Lisboa, FCA-Edit. de Informática, 1998.
178. RAMSEY, J. B. e ROTHMAN, P. *The Inversibility and Business Cycle Asymmetry*. Journal of Money, Credit and Banking, pp. 1-21, Fev. 1996.

179. RASMUSEN, E. *Games and Information: an introduction to game theory*. 2.ed. Massachusetts, Blackwell, 1994.
180. REEVES, H.; DE ROSNAY, J.; COPPENS, Y.; SIMONNET, D. *La Plus Belle Histoire du Monde: Les secrets de nos origines*. Paris, Éditions du Seuil, 1996.
181. REIS, C. *Planeamento Estratégico de Sistemas de Informação*. Lisboa, Editorial Presença, 1993. (“Biblioteca de Gestão Moderna”).
182. RICARDO, D. *Principles of Political Economy and Taxation*. Prometheus Books, 1996.
183. RIFKIM, J. *Entropia, uma nova visão do Mundo*. Trad. (I./P.) de H. de Barros. Faro, Univ. do Algarve (Série “Temas Universais”).
184. RILEY, J. G. *Noncooperative Equilibrium and Market Signalling*. American Economic Association, Vol. 69, n.º 2, pp. 303-307, 1979.
185. ROSMORDUC, J. *De Tales a Einstein*. Trad. (Fr./P.) de J. C. Fernandes. Lisboa, Editorial CAMINHO, 1983. (Colecção Universitária).
186. RUELLE, D. *O Acaso e o Caos*. Trad. (Fr./P) de M. Alberto. Lisboa, Relógio D'Água Editores, 1994.
187. RUTHERFORD, F. J. e AHLGREN, A. *Ciência para todos*. Trad. (I./P.) de C. Martins, Lisboa, Gradiva, 1995. (Série “Ciência Aberta”).
188. SALAM, A., DIRAC, P. e HEISENBERG, W. *Em busca da unificação*. Trad. (I./P.) de M. Fiolhais e F. Nogueira. Lisboa, Gradiva, 1991. (Colecção “Ciência Aberta”).

189. SAMUELSON, P. A. *Economia* (Vol. I). Trad. (I./P.) de M. Ferreira. 4.ed. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1980.
190. SAMUELSON, P. A. *Economia* (Vol. II). Trad. (I./P.) de M. Ferreira. 4.ed. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1980.
191. SANDERS, T. I. *Strategic Thinking and the New Science: Planning in the midst of chaos, complexity and change*. New York, The Free Press, 1998.
192. SCHUMPETER, J. A. *Business Cycles: A Theoretical Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*. Porcupine Press. 1989.
193. SCHUMPETER, J. A. *Ensaios: Empresários, inovação, ciclos de negócio e evolução do capitalismo*. Trad. (I./P.) de Maria I. Mansinho e E. de Almeida Pinho. Oeiras (Portugal), Celta Editora, 1996. (Colecção “Economia e Sociedade”).
194. SCHUMPETER, J. A. *10 Grandes Economistas: de Marx a Keynes*. Ed. 3^a. Madrid, Alianza Editorial, 1971.
195. SCHUMPETER, J. A. *Capitalism, Socialism & Democracy*. London, Routledge, 1996.
196. SCHUMPETER, J. A. e SCHUMPETER E. B. *History of Economic Analysis*. Oxford Univ. Press, 1996.
197. SCHUMPETER, J. A. *Imperialismo e Classes Sociais*. Rio de Janeiro, Zahar Editores, 1961.
198. SCHUMPETER, J. A. *Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Credit, Interest and the Business Cycle*. Transaction Pub. 1983.
199. SCOTT, A. *A Criação da Vida: do químico ao animal*. Trad. (I./P.) de Teresa Perez. Lisboa, Terramar, 1991.

200. SERRES, M. *A Comunicação*. Trad. (Fr./P.) Fernando Gomes. Porto, Rés Editora.
201. SERRES, M. (Direcção) *Elementos para uma História das Ciências: I. Da Babilónia à Idade Média*. Trad. (Fr./P.) de R. Pacheco et. al. Lisboa, Terramar, 1995.
202. SERRES, M. (Direcção) *Elementos para uma História das Ciências: II. Do fim da Idade Média a Lavoisier*. Trad. (Fr./P.) de R. Pacheco et. al. Lisboa, Terramar, 1996.
203. SERRES, M. (Direcção). *Elementos para uma História das Ciências: III. De Pasteur ao computador*. Trad. (Fr./P.) de R. Pacheco et. al. Lisboa, Terramar, 1996.
204. SERRES, M. *As origens da geometria*. Trad. (Fr./P.) de A. Simões e M. da Graça Pinhão. Lisboa, Terramar, 1997.
205. SHAPIRO, C. e VARIAN, H.R. *Economia da Informação: como os princípios econômicos se aplicam à era da internet*. Trad. (I./P.) de Ricardo Inojosa. Rio de Janeiro, Editora Campus, 1999.
206. SHARPE, S. A. *Asymmetric Information, Bank Lending, and Implicit Contracts: A Stylized Model of Customer Relationships*. Journal of Finances, Vol. XLV, n.º 4, pp. 1069-1087, 1990.
207. SINGH, S. *A Solução do Último Teorema de Fermat*. Trad. (I./P.) de A. M. Baptista. Lisboa, Relógio D'Água Editores, 1998.
208. SINKEY Jr., J. F. *Commercial Bank Financial Management in the Financial Services Industry*. 4.ed. New York, Macmillan Publishing Co., 1992.
209. SMITH, A. *A Riqueza das Nações*. Vol. I. Trad. (I/P) de T. Cardoso e L. Cristóvão de Aguiar. Ed. 4^a. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

210. SMITH, A. *A Riqueza das Nações*. Vol. II. Trad. (I/P) de L. Cristóvão de Aguiar. Ed. 3^a Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
211. SMITH, A. *A Teoria dos sentimentos morais* Trad. (I/P) de Lya Luft. Ed. 1^a São Paulo, 1999.
212. STACEY, R. *A Gestão do Caos: estratégias dinâmicas de negócios num mundo imprevisível*. Trad. (I./P.) de J. Freitas e Silva. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1994. (Colecção “Biblioteca de Economia”).
213. STACEY, R. D. *A Fronteira do Caos*. Trad.(I./P.) de P. Simões et. al. Venda Nova, Bertrand Editora, 1995.
214. STACEY, R. D. *Pensamento Estratégico e Gestão de Mudança: perspectivas internacionais sobre dinâmica organizacional*. Trad. (I./P.) de J. P. Gaspar. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1998.
215. STEIL, B. (Ed.). *International Financial Market Regulation*. Chichester (England), John Wiley & Sons, 1994.
216. STEWART, I. *Deus Joga aos Dados ?*. Trad. (I./P.) de A. Salvador. Lisboa, Gradiva, 1991. (Colecção “Ciência Aberta”).
217. STEWART, I. *Os Problemas da Matemática*. Trad. (I./P.) de M. Urbano. 2.ed. Lisboa, Gradiva, 1996. (Série “Ciência Aberta”).
218. STRUIK, D. J. *História concisa das matemáticas*. Trad. (I./P.) de J. Guerreiro. 3.ed. Lisboa, Gradiva, 1997. (Série “Ciência Aberta”).
219. TAYLOR, A. *As Grandes Doutrinas Económicas*. 10.ed. Lisboa, Publicações Europa-América, 1997. (Colecção “Saber”).

220. THÉODORIDÈS, J. *História da Biologia*. Trad. (Fr./P.) de J. C. da Rocha. Lisboa, Edições 70, 1984. (Biblioteca Básica de Ciência).
221. THUAN, T. X. *Le Chaos et l'Harmonie: la fabrication du réel*. Paris, Fayard, 1998.
222. TVEDE, L. *Business Cycles: from John law to chaos theory*. Amsterdam, Hardwood Academic Publishers, 1997.
223. TVERSKY, A.; KAHNEMAN, D. *The framing of Decisions and the Psychology of Choice, in Science*, Vol. 211 nº4481, pp 453-458, Janvier 1981.
224. VARIAN, H. R. *Intermediate microeconomics: a modern approach*. New York, 2.ed., W.W. Norton & Company, 1987.
225. VEBLEN, T. *The Theory of the Leisure Class*. Dover Publins., 1994.
226. VICKERS, D. *The Theory of the Firm: Production, Capital and Finance*. New York, McGraw-Hill
227. WALLISER, B. *A Inteligência da Economia*. Trad. (Fr./P.) de M. Murteira. Lisboa, Inst. Piaget, 1998. (Colecção "Economia e Política").
228. WALRAS, L. *Elements of Pure Economics or the Theory of Social Wealth*. Porcupine Press., 1984.
229. WALTER, K. *O Tao do Caos*. Trad. (I./P.) de P. Santos e M. Proença. Mem Martins (Portugal), Lyon Edições, 1997.
230. WEINBERG, S. *Sombos de uma Teoria Final*. Trad. (I./P.) de R. Ribeiro. Lisboa, Gradiva, 1996. (Série "Ciência Aberta").
231. WILLIAMS, B. *Trading Chaos: Applying expert techniques to maximize your profits*. New York, John Wiley & Sons, 1995.
232. WILSON, E. O. *Sociobiology*. London, The Belknap Press of Harvard University Press, 1998.

233. WILSON, E. O. *A diversidade da Vida*. Trad. (I./P.)de Isabel Mafra. Lisboa, Gradiva, 1997. (Colecção "Ciência Aberta").
234. WOODROW, A. *Informação, Manipulação*. Trad. (I./P.) de J. M. Barata-Feyo. 2.ed. Lisboa, Publicações Dom Quixote, 1996.
235. ZORRINHO, C. *Gestão da Informação - condição para vencer*. Lisboa, IAPMEI, 1995. (Colecção "Mediateca PME").
236. ZORRINHO, C. *Gestão da Informação*. Lisboa, Editorial Presença, 1991.

