

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA

MARIA DA CONCEIÇÃO RODRIGUES DOS SANTOS

**ILYA PRIGOGINE:  
ESTABILIDADE AFASTADA DO EQUILÍBRIO E  
IRREVERSIBILIDADE TEMPORAL**

GOIÂNIA-GO  
2010

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**     **Dissertação**         **Tese**

**2. Identificação da Tese ou Dissertação**

Autor (a):					
E-mail:					
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página? <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não					
Vínculo empregatício do autor					
Agência de fomento:				Sigla:	
País:		UF:		CNPJ:	
Título:					
Palavras-chave:					
Título em outra língua:					
Palavras-chave em outra língua:					
Área de concentração:					
Data defesa: (dd/mm/aaaa)					
Programa de Pós-Graduação:					
Orientador (a):					
E-mail:					
Co-orientador (a):*					
E-mail:					

\*Necessita do CPF quando não constar no SisPG

**3. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento  SIM         NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do (a) autor (a)

Data: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

MARIA DA CONCEIÇÃO RODRIGUES DOS SANTOS

**ILYA PRIGOGINE:  
ESTABILIDADE AFASTADA DO EQUILÍBRIO E  
IRREVERSIBILIDADE TEMPORAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Faculdade de Filosofia, Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Filosofia.

Área de Concentração: Metafísica e Ontologia.

Orientador: Professor Doutor José Ternes.

Goiânia-GO  
2010

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
GPT/BC/UFG**

S237i Santos, Maria da Conceição Rodrigues dos.  
Ilya Prigogine [manuscrito] : estabilidade afastada do equilíbrio e irreversibilidade temporal / Maria da Conceição Rodrigues dos Santos. – 2010.  
79 f. : il., figs.

Orientador: Prof. Dr. José Ternes.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Faculdade de Filosofia, 2010.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras.

1. Complexidade (Filosofia). 2. Caos determinístico. 3. Equilíbrio – Ciência. I. Título.

CDU: 124.1:536

MARIA DA CONCEIÇÃO RODRIGUES DOS SANTOS

**ILYA PRIGOGINE:  
ESTABILIDADE AFASTADA DO EQUILÍBRIO E  
IRREVERSIBILIDADE TEMPORAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Filosofia da Faculdade de Filosofia da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Filosofia, em \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_, aprovada pela banca examinadora composta pelos seguintes professores:

---

Prof. Dr. José Ternes - Orientador

---

Prof. Dra. Vera Portocarrero

---

Prof. Dr. Fábio Ferreira

Para meus netos,  
Letícia, Guido, Lara e Elisa,  
minha mais radical mudança de  
paradigma.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, professor José Ternes, porque em se tratando do saber epistêmico, será sempre minha mais próxima e cara referência.

Ao meu genro, professor Pedro Adalberto Gomes de Oliveira Neto, que me incentivou a enfrentar os desafios da filosofia, apesar de distanciada da minha formação de origem, e me conduziu nos primeiros passos, como a uma criança, e também nestes derradeiros.

À minha família, que me inspira e apoia incondicionalmente.

À minha instituição profissional, o Ministério Público do Estado de Goiás, que me permitiu, ao longo dos anos, transitar por outras searas, sem prejuízo de minhas prerrogativas funcionais.

À Vida, que não se cansa de me surpreender e encantar com suas flutuações.

O mundo surge como uma notável combinação de “ordem” e “desordem”. Isso é característico da termodinâmica e é a expressão da instabilidade, do caos inerente às leis básicas da natureza. Sem instabilidade, teríamos um mundo uniforme, careceríamos do encantador espetáculo que nos oferece a extraordinária variedade da natureza.

Ilya Prigogine

## RESUMO

É referência para este estudo a obra do físico-químico Ilya Prigogine, nucleada pelas idéias de complexidade e caos, que apontam para uma profunda transformação da ciência, originariamente desencadeada pela termodinâmica, seguida de perto pela teoria da relatividade e pela física quântica. O trabalho tem por meta examinar o alcance da obra prigogineana na conformação da nova *episteme* que subjaz a tais mudanças, em face da ruptura paradigmática que instaura o pensamento contemporâneo. De resto, importará ao estudo entrever o novo corpo de saber que as mudanças investigadas estão a modelar, em concurso com questões prementes do mundo contemporâneo, como as que dizem respeito à crise na ciência e na filosofia, aos limites do crescimento, ao desenvolvimento sustentável e à emergência de um novo modelo de racionalidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** complexidade, caos, equilíbrio, irreversibilidade, sustentabilidade, racionalidade.

## **ABSTRAT**

It is reference to this study the work of the physical chemist Ilya Prigogine based on ideas of complexity and chaos responsible for a deep change in science, originally triggered by thermodynamics followed by the theory of relativity and quantic physics. The study aims to examine the influence of the prigogineane work on the formation of the new *episteme* behind all these changes, in the face of the paradigmatic rupture of the contemporary thought. The study will also understand the new knowledge body which these investigated changes are about to model along with the issues of contemporary world, like those regarding the science and philosophy, the boundaries of growth, sustainable development and the emergency of a new model of rationality.

**KEY WORDS:** complexity, chaos, balance, irreversibility, sustainability, rationality.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	09
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>CAPÍTULO 1 – A MÁQUINA DO MUNDO NEWTONIANA</b> .....	14
1.1 O MODELO MECANICISTA: UMA IMAGEM DE MUNDO .....	16
1.2 A DERROCADA DO MODELO NEWTONIANO-CARTESIANO .....	19
<b>CAPÍTULO 2 – UMA INCURSÃO À TERMODINÂMICA</b> .....	24
2.1 A TERMODINÂMICA DO EQUILÍBRIO .....	25
2.1.1 O princípio da conservação de energia .....	27
2.1.2 Das máquinas térmicas às leis da termodinâmica .....	28
2.1.3 O princípio de ordem de Boltzmann .....	35
2.1.4 A termodinâmica linear .....	33
2.2 A TERMODINÂMICA DO NÃO-EQUILÍBRIO .....	34
2.2.1 Auto-organização e estruturas dissipativas .....	35
2.2.2 A matemática da complexidade .....	43
2.3 A NOVIDADE EPISTÊMICA DA TERMODINÂMICA .....	52
<b>CAPÍTULO 3 – ILYA PRIGOGINE E A CONTEMPORANEIDADE</b> .....	53
3.1 ESTABILIDADE AFASTADA DO EQUILÍBRIO: EMERGÊNCIA DE NOVOS ESTADOS EM SISTEMAS CAÓTICOS .....	54
3.2 O TEMPO IRREVERSÍVEL COMO CATEGORIA CONSTITUTIVA DOS EVENTOS .....	54
3.3 O REENCANTAMENTO DA NATUREZA .....	57
3.4 HISTORICIDADE E VIZINHANÇA EM SISTEMAS COMPLEXOS .....	59
3.5 ILYA PRIGOGINE E A CONTEMPORANEIDADE .....	62
<b>CONCLUSÃO</b> .....	66
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	73

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Componentes de uma máquina de Carnot .....	29
Figura 02 – O Ciclo de Carnot .....	30
Figura 03 – Instabilidade de Bénard: multiplicidade de soluções .....	37
Figura 04 – “Brusselator” .....	37
Figura 05 – Ponto de Bifurcação .....	38
Figura 06 – Bifurcação Incompleta .....	38
Figura 07 – Quebra de Simetria na atividade ótica dos cristais de clorato de sódio .....	39
Figura 08 – Estruturas de Turing .....	40
Figura 09 – Caos: trajetórias que divergem exponencialmente .....	40
Figura 10 – Distribuição aleatória das trajetórias em um sistema caótico .....	41
Figura 11 – Sinais elétricos temporais do cérebro .....	42
Figura 12 – Bifurcação nas sociedades de formigas .....	42
Figura 13 – O espaço de fase bidimensional de um pêndulo .....	44
Figura 14 – Trajetória de um pêndulo no espaço de fase .....	45
Figura 15 – Trajetória de um pêndulo com atrito no espaço de fase .....	45
Figura 16 – O atrator de Ueda .....	46
Figura 17a – O atrator de Lorentz .....	46
Figura 17b – O atrator de Lorentz .....	47
Figura 18a – Tipos diversos de “conjuntos de Júlia” .....	48
Figura 18b – Conjunto de Júlia .....	49
Figura 18b' – Conjunto de Júlia (recorte ampliado) .....	49
Figura 18c – Conjunto de Júlia .....	50
Figura 18d – Conjunto de Mandelbrot I .....	51
Figura 18e – Conjunto de Mandelbrot II .....	51

## INTRODUÇÃO

A proposta deste trabalho é uma investigação na interface da ciência com a filosofia, particularmente a ciência física, por um dos seus segmentos, a termodinâmica. Por um lado, faz-se um recorte sobre o plano mais amplo da termodinâmica, elegendo-se um tema que abarca necessariamente dois tópicos, pois são a tal ponto intercambiantes que se faz inviável o estudo de cada um em separado: *a estabilidade afastada do equilíbrio* e a *irreversibilidade temporal*. Trata-se de duas instâncias teóricas fundamentais na obra que o físico-químico Ilya Prigogine desenvolveu em parceria com a filósofa da ciência belga Isabelle Stengers. Por outro lado, são examinadas as *idéias de natureza* associadas ao modelo científico vigente e a noção de *episteme*, esta última chamada a dar suporte ao discurso praticado na interface.

*Estabilidade afastada do equilíbrio* refere-se a novos *estados* da matéria, passíveis de emergirem em situações distanciadas do equilíbrio, fenômeno associado às *estruturas dissipativas* descobertas por Ilya Prigogine e que lhe valeram o Prêmio Nobel de Química em 1977. A *irreversibilidade temporal*, por sua vez, corresponde à *flecha* ou *seta do tempo* introduzida por Prigogine na ciência, atribuindo ao tempo um papel construtor na dinâmica dos eventos; e ao sistemas, em geral, um sentido, uma teleologia.

Como referência teórica, *idéia de natureza* e *episteme* são conceitos que merecem prévia atenção, cabendo desde logo esclarecer do que se estará tratando quando da invocação dos mesmos. Por *idéia de natureza* entende-se o conjunto das referências formadoras de um saber, os elementos de cognição que em cada época permitiram ao homem em contato com o mundo natural, dele abstrair um conceito para natureza, incorporando-o ao saber vigente ou até mesmo dele o banindo. Isto significa que a natureza não foi sempre a mesma, nem una, podendo, como um objeto de saber, em algum momento até mesmo desaparecer. São concepções que guardam matizes de seu lugar e de sua época, tais como a visão sacralizada da natureza, do homem primitivo, para quem conhecer a natureza não era o mesmo que compreendê-la, mas reverenciá-la; ou a concepção mecanicista que, em oposição, tendo por pressuposto a conduta de manipular para conhecer e modificar, dessacraliza-a radicalmente.

A *episteme* é um conceito particularmente importante para este trabalho e se refere a “um certo saber que serve de solo sobre o(ou no) qual se movem manifestações culturais várias” (TERNES, 1998, p. 38). Na trilha de Michel Foucault, José Ternes esclarece que a *episteme* constitui uma ordem, não um jogo de dados. Nesta ordem incluem-se todas as

condições de possibilidade de todos os saberes de uma época. *Episteme*, portanto, não é sinônimo de um saber, mas o conjunto das condições necessárias ao seu estabelecimento.

O que se examina, em primeiro plano, é o papel da termodinâmica na ruptura epistemológica do modelo galileano-newtoniano, no qual todos os fenômenos físicos reduzem-se ao movimento de partículas materiais, um universo de corpúsculos ou massas em movimento, imersos no espaço e no tempo absolutos. Busca-se, então, compreender a novidade epistêmica subjacente a esta cisão, investigando o novo saber que ela instaura e o modo como tal saber se articula no seio da crise de sustentabilidade do mundo contemporâneo, apontando para um novo status relacional do binômio homem-natureza

Em largas linhas, é este o panorama do trabalho, cujo corpo dissertativo se apresenta em quatro capítulos, seguidos de uma reflexão final. *As idéias de natureza* associadas à ciência clássica constituem o tema do Capítulo 1, sob o título *a máquina do mundo newtoniana*, em que se parte da imagem de mundo anterior à revolução galileana, quando o mundo era aceito do modo como se nos apresentava aos sentidos, não se estabelecendo diferenças entre o mundo percebido, o mundo entendido como real e o mundo pensado.

A imagem do cosmos como uma máquina perfeita governada por leis matemáticas exatas teve sua origem nos trabalhos de Galileu e se completou em Newton, cuja síntese das mecânicas terrestre e celeste foi a realização que coroou a ciência do século XVII. Na mecânica newtoniana, todos os fenômenos físicos estão reduzidos ao movimento de partículas materiais, integrantes de *uma só* natureza, que é, em última instância, uniforme e redutível à matéria e ao movimento. No início do século XVIII, a mecânica newtoniana, a óptica geométrica, a astronomia e o cálculo diferencial e integral haviam já consolidado esta *idéia de natureza*: um universo de corpúsculos ou massas em movimento, imersos no espaço e no tempo absolutos, sujeito a leis deterministas e relações causais previsíveis. Esta percepção de mundo veio a sofrer a sua primeira grande desestabilização com o surgimento da máquina a vapor.

O Capítulo 2 cuida do estudo da termodinâmica, com enfoque nas transformações por ela introduzidas no corpo do saber newtoniano, estruturado em conformidade com os pressupostos do determinismo clássico. A termodinâmica será abordada em três níveis: o do equilíbrio, o do quase-equilíbrio ou da linearidade e, por fim, o da não-linearidade ou complexidade, que é o aspecto que efetivamente importa ao estudo, por ser o contexto científico em que Ilya Prigogine desenvolve sua teoria das estruturas dissipativas e apresenta sua questão central, que é a introdução da flecha ou *seta do tempo*, ou o tempo orientado dos

sistemas entrópicos, os quais correspondem a sistemas de entropia crescente, entendidos pelo viés clássico como expostos à degradação, enquanto para Prigogine são sistemas que, por serem abertos, estão sujeitos a flutuações, bifurcações e à emergência de novos estados.

A primeira lei da termodinâmica, que corresponde ao *princípio de conservação de energia*, foi um grande marco do século XIX, desde logo entendido como um possível universal, unificador dos diferentes campos experimentais e, de fato, por volta de 1860 este princípio, já era enunciado como um princípio fundamental, aplicável a todos os fenômenos conhecidos. Mas, com o desenvolvimento da máquina a vapor, foi preciso ir além do simples princípio de conservação de energia e encontrar uma maneira de exprimir a distinção entre fluxos úteis e fluxos dissipados, perdidos, entre as mudanças de estado de um sistema. É este o papel desempenhado pela entropia, que é uma função de estado, do ponto de vista estritamente clássico, associada às perdas e à degradação final de um sistema.

Para Prigogine, a produção de entropia traduz uma evolução irreversível e o seu crescimento caracteriza uma evolução espontânea e não o fim dos sistemas. A entropia torna-se, desta forma, um indicador de evolução, não mais de degradação, incorporando à física a “flecha” ou a “seta do tempo”, que é um dos elementos da ciência da complexidade, responsável pela introdução de novas teorias e modelos de auto-organização.

Para a abordagem desses sistemas complexos, com os quais a ciência não havia antes se ocupado, surgiu um conjunto de conceitos e técnicas, no corpo de uma nova teoria matemática, designada como *teoria dos sistemas dinâmicos*, de que são ramos a teoria do caos e a teoria dos fractais, que correspondem menos a uma matemática de operações do que a uma inovadora ferramenta articuladora de relações e padrões. Esta “matemática de padrões”, juntamente com as demais inovações descritivas e conceituais dos sistemas complexos, apontam para novas leituras e novos pressupostos epistemológicos aos discursos produzidos pelas ciências na contemporaneidade.

O recorte da obra de Prigogine, *estabilidade afastada do equilíbrio e irreversibilidade temporal*, que dá título a este trabalho dissertativo, é estudado de modo específico no Capítulo 3, onde se examinam estes dois temas correlatos, centrais na obra do autor, ambos associados ao advento da complexidade na ciência contemporânea e sugestivos de um novo olhar sobre a natureza. Uma primeira questão suscitada, a partir do estudo das estruturas dissipativas, às quais a estabilidade distanciada do equilíbrio se associa, é a relação diferente que se estabelece entre a ordem e a desordem, levando ao reconhecimento crescente do papel construtivo da desordem, a partir do estudo de sistemas não-lineares e de fenômenos de auto-

organização. Ordem e desordem, tradicionalmente vistas como condições antagônicas e radicalmente opostas dentro de um sistema, sabe-se hoje que na realidade elas se coproduzem, podendo-se afirmar que ser esta, de fato, a novidade mais significativa que se encontra no cerne da ciência da complexidade e da ideia de caos.

No modelo newtoniano, o futuro de qualquer parte de um sistema, bem como o seu passado, poderiam ser descritos com absoluta certeza se o seu estado, em qualquer instante determinado, fosse conhecido em todos os detalhes, não havendo, pois, diferença entre passado e futuro. Disto se depreende que, na formulação newtoniana, os fenômenos são completamente independentes da sua história. Amplamente capaz de modificar a formulação que fazemos das leis da natureza, que constituem o arcabouço da ciência moderna, cuja característica mais intrínseca é o determinismo, o caos desbanca os pressupostos clássicos segundo os quais, uma vez conhecidas as condições iniciais, pode-se localizar, com certeza infalível, uma partícula em sua trajetória, qualquer que seja o tempo, passado ou futuro. Esta profunda mudança conceitual, defendida por Prigogine, corresponde precisamente à transição de processos reversíveis e determinísticos para processos indeterminados e irreversíveis e reconhece o papel criativo da entropia em sistemas abertos.

Enfim, fazendo uma leitura dos grandes marcos da obra de Prigogine, à luz da contemporaneidade, pretende-se entrever qual *idéia de natureza* ou imagem de mundo resulta da ruptura do modelo newtoniano e da instauração de um novo paradigma científico, a partir sobretudo das novidades introduzidas pela física moderna que conferem à ciência novos fundamentos baseados em uma concepção sistêmica. Na análise final, de cunho reflexivo, as abordagens científica e filosófica darão lugar a um enfoque aberto das grandes questões trazidas à contemporaneidade pelos descompassos epistemológicos da ciência moderna, tornando-se objeto de especulação mesmo junto ao senso comum, tais como aquelas questões que dizem respeito aos limites do crescimento e ao desenvolvimento sustentável, as quais sugerem a emergência de um exercício ou modelo de racionalidade diferente do praticado na modernidade.

## CAPÍTULO 1

### A MÁQUINA DO MUNDO NEWTONIANA

Do ponto de vista epistemológico, não há uma natureza *em si*. Existe apenas uma “natureza pensada”, uma “idéia de natureza” que assume sentidos radicalmente diferentes conforme os homens se relacionam uns com os outros e com o mundo ao seu redor, em diferentes épocas. No caso do modelo de conhecimento vigente, em dado momento uma pergunta foi feita à natureza, em uma nova linguagem, e como a natureza respondera de forma magistral a tal pergunta, esta linguagem em breve viria a ser considerada como a única que a natureza seria capaz praticar: a matemática! Teria sido Galileu o primeiro homem a acreditar de fato que as formas matemáticas tivessem um lugar efetivo no mundo. E foi por esta via que ele compreendeu o papel decisivo da experiência na ciência. A respeito deste momento de definitiva cisão na história do conhecimento ocidental, pronuncia-se o historiador da ciência Alexandre Koyré (2006, p. 41):

Assim, fazendo do que é matemático o fundo da realidade física, Galileu é necessariamente levado a abandonar o mundo qualitativo e a relegar a uma esfera subjetiva, ou relativa ao ser vivo, todas as qualidades sensíveis de que é feito o mundo aristotélico. A cisão é, portanto, extremamente profunda.

Antes de Galileu, aceitávamos o mundo do modo como ele se apresentava aos nossos sentidos e desta forma o tomávamos como real. Com o advento da ciência galileana, deu-se uma ruptura drástica entre o mundo percebido pelos sentidos e o mundo conhecido, instâncias que no sistema aristotélico se confundiam. Agora, real é o mundo pensado da ciência: um mundo onde a matemática e a geometria se realizam e dão suporte a uma nova concepção de cosmos.

A ciência, tal como a conhecemos, alicerça-se na física galileana e se estrutura a partir da interpretação cartesiana; mas é na grande e vasta síntese do século XVII, empreendida por Newton, que o modelo mecanicista encontra sua imensa força impositiva. Muito se fala sobre a imagem da natureza como uma máquina de funcionamento e desempenho perfeitos, imagem que substituiu, a partir da revolução científica do século XVII, a velha ordem medieval em que a natureza se apresentava como um todo orgânico. Mas a ontologia mecanicista remete-

nos, em primeiro lugar, à redução das múltiplas faces da natureza, que fazem parte do universo aristotélico, em favor de uma instância única e derradeira: a matéria em movimento.

Conquanto não releve tais aspectos a um plano declaradamente secundário, Koyré faz uma leitura mais interna da transformação a que nos referimos, privilegiando a zona de contato entre a nova ciência e seu arcabouço filosófico. Para ele, é inadequado e mesmo impossível abordar a revolução científica do século XVII sem que se leve em conta a drástica mudança na concepção de mundo que ela desencadeou: o cosmos de antes, que era finito, fechado e hierarquicamente ordenado, ruiu, acabou-se:

[...] esses aspectos são concomitantes expressões de um processo mais profundo e mais fundamental, em resultado do qual o homem, como às vezes se diz, perdeu seu lugar no mundo, ou, dito talvez mais corretamente, perdeu o próprio mundo em que vivia e sobre o qual pensava, e teve de transformar e substituir não só seus conceitos e atributos fundamentais, mas até mesmo o quadro de referência do seu pensamento. (KOYRÉ, 2006, p. 32)

A infinitização do universo, a partir da síntese newtoniana é central no estudo que Koyré faz da Idade Clássica. Ternes (1998) incorpora este acento *koyréano* à abordagem articulada que faz da obra de Michel Foucault, para o qual a idade clássica é a idade da representação. Para Ternes, em traços mais gerais, a idade clássica poderia ser denominada como idade da representação e do infinito. Koyré, com efeito, apresenta-nos as mudanças advindas da revolução do século XVII a partir de duas grandes novidades: por primeiro, a substituição da concepção do mundo como um todo finito e bem ordenado, pela concepção de um universo infinito e não mais estabelecido segundo a subordinação hierárquica de seus componentes. De outro lado, aponta-nos a substituição do espaço aristotélico, caracterizado como um conjunto diferenciado de lugares intra-mundanos, pelo espaço euclidiano, uma extensão infinita e homogênea, que passaria, desde então, a confundir-se com o espaço real do mundo.

Até o final do século XVI o saber da cultura ocidental fora construído a partir de similitudes. Este saber se articulava, segundo Michel Foucault (1999), em torno de algumas noções essenciais tais como conveniência, emulação, analogia e simpatia. A conveniência avizinharia os semelhantes ao nível do contato, enquanto a emulação, ultrapassando esta conveniência espacial, funcionaria mais como um assemelhamento inspirado na relação entre um objeto e sua imagem refletida num espelho, entre um objeto e seu reflexo. Quanto à analogia, conceito já estabelecido entre os gregos e familiar ao pensamento medieval, é levada neste período a extremos, para a execução das similitudes mais improváveis e sutis, seguida

de perto pelas simpatias, segundo as quais as coisas tornavam-se idênticas umas às outras por meio da superposição de suas qualidades.

Para Koyré, a grande obra da Renascença, apesar de todo o apogeu do seu espírito artístico, foi a destruição da síntese aristotélica, pois sua concepção de universo ainda era anímica até o advento da obra de Kepler. Com este é que surge, pela primeira vez, a idéia radicalmente nova de um universo que, em todas as suas partes, é regido por leis estritamente matemáticas. Mas não foi a Kepler que coube rasgar o véu do novo ordenamento do mundo: não o fez justamente por não ser capaz de admitir a idéia de um universo infinito. Só em Galileu é que essa transição efetivamente acontece e, então, afastamo-nos definitivamente da Renascença, deixando para trás uma época em que não havia cabia, ainda, a distinção entre representante e representado, que viria a caracterizar a idade clássica.

Podemos dizer que, na idade clássica, todo o conhecimento se reduz à esfera das leis naturais, ou, antes, de um ordenamento natural, uma lei central e única, cuja persecução constitui a motivação máxima para parte da comunidade científica, mesmo em nossos dias.

Os clássicos dos séculos XVII e XVIII não somente desclassificaram a idéias de múltiplas naturezas, bem como, o que, para nós modernos dos séculos XIX e XX pode parecer estranho, fundiram, numa mesma realidade, os seres naturais e as obras do homem. Todas as coisas do universo obedecem, agora, à mesma norma: a lei natural. (TERNES, 1998, p. 57)

É evidente, alerta-nos Ternes, que o saber clássico não se exaure no mecanicismo: há os naturalistas, os gramáticos, os que fazem a releitura das riquezas; mas, sem dúvida, a grande metáfora das engrenagens constitui um dos seus traços mais marcantes, tal que não só os vivos são máquinas, mas o próprio saber que os constitui se dá mecanicamente. O universo assim descrito, à imagem de uma imensa e infalível máquina, não é mais o universo físico de Aristóteles: é agora um mundo geométrico, matematizado e infinito.

## 1.1 O MODELO MECANICISTA: UMA IMAGEM DE MUNDO

Surgido na Itália, durante o século XIV, o movimento que ficaria conhecido como Renascimento consistiu na retomada dos valores da Antigüidade Clássica, que, sob o culto da razão, daria lugar ao espírito científico da modernidade. Porém, o que se denomina “ciência”

no Renascimento, embora prepare efetivamente os fundamentos para a arrancada científica do século XVII, guarda sinais do pensamento medieval, ao qual se somam elementos do misticismo oriental e judaico. Permanecem emparelhadas e assim caminham, neste período de transição, a astronomia e a astrologia, a química e a alquimia, a investigação da natureza e a magia.

A originalidade do Renascimento está em construir uma nova imagem do mundo a partir da permanência de elementos do passado. É em nome do humanismo que o homem, mesmo temeroso, começa a separar-se da grande ordem do universo, para ser o seu espectador privilegiado. Mais do que isso, ele é o organizador dessa ordem. (SIQUEIRA, 2002, p. 127)

Uma mudança radical na imagem de mundo medieval, em que imperavam a filosofia aristotélica e a teologia cristã, foi realizada pelas novas descobertas em física, astronomia e matemática, que deram origem à revolução científica associada ao nome de Nicolau Copérnico, Galileu, Descartes, Bacon e Newton. Esta nova imagem de mundo e o sistema de valores que lhe subjaz estão na base de toda a cultura ocidental. Entre os anos 1500 e 1700 houve uma mudança radical no modo de se perceber e descrever o mundo, não só na esfera do pensamento erudito, mas também do senso comum. As noções de cosmos daí advindas deram origem ao modelo de saber que dominou nossa cultura nos últimos trezentos anos e está agora em fase de transformação.

A revolução científica começou com Nicolau Copérnico, que se opôs à concepção geocêntrica de Ptolomeu, que havia sido aceita como dogma por mais de mil anos. A Copérnico, seguiu-se Johannes Kepler, cientista e místico, que se empenhava em descobrir a harmonia das esferas e terminou por formular, através de um trabalho laborioso com tabelas astronômicas, suas célebres leis empíricas do movimento planetário, as quais vieram corroborar o sistema de Copérnico. Mas a mudança realmente decisiva é creditada a Galileu Galilei, cujo papel na revolução científica supera suas realizações no campo da astronomia, o qual, por haver sido o primeiro a combinar a experimentação científica com o uso da linguagem matemática na formulação das leis da natureza, é considerado o pai da ciência moderna.

Enquanto Galileu realizava seus experimentos na Itália, Francis Bacon, na Inglaterra, descrevia explicitamente o método empírico da ciência. Foi o primeiro cientista a formular uma teoria clara do procedimento indutivo, que consiste em realizar experimentos e extrair deles conclusões gerais a serem, por sua vez, testadas em novos experimentos. Em seus

escritos, a Terra já não aparece como a mãe nutriente, e este conceito desaparece por completo quando a revolução científica substitui de vez a concepção orgânica de natureza pela metáfora do mundo como máquina. Essa mudança, que viria a ser de suprema importância para o desenvolvimento subsequente da civilização ocidental, articulada por duas figuras gigantes do século XVII, Descartes e Newton, introduz o método analítico, que consiste em quebrar fenômenos complexos em pedaços, para que se compreenda o comportamento do todo a partir das propriedades de suas partes.

O arcabouço conceitual criado por Galileu e Descartes – o mundo como uma máquina perfeita governada por leis matemáticas exatas – foi completado de maneira triunfal por Isaac Newton, cuja grande síntese, em mecânica, foi a realização que coroou a ciência do século XVII. Na mecânica newtoniana, todos os fenômenos físicos estão reduzidos ao movimento de partículas materiais, o que de algum modo incorpora o fato de a ontologia mecanicista haver promovido a eliminação das diferenças de natureza mutuamente irreduzíveis do cosmo aristotélico. Para o mecanicismo, só há uma natureza, que é, em última instância, uniforme e redutível à matéria e ao movimento. No início do século XVIII, a mecânica newtoniana, a óptica geométrica, a astronomia e o cálculo diferencial e integral haviam fixado as linhas essenciais da imagem da natureza: um universo de corpúsculos ou massas em movimento, descrevendo trajetórias matemáticas, imersos no espaço e no tempo absolutos; e a física tornara-se a base para todas as demais ciências.

Durante o século XIX, os cientistas continuaram a aprimorar o modelo mecanicista, estendendo sua aplicabilidade às demais ciências, incluindo a química, a biologia, a psicologia e mesmo as ciências sociais. Mas, ao final deste século, a mecânica newtoniana já não podia ser considerada uma teoria fundamental e final de todos os fenômenos naturais. Os conceitos de eletrodinâmica de Maxwell e a teoria da evolução, de Darwin, superavam largamente o modelo newtoniano e indicavam que o universo se apresentava muito mais complexo do que haviam acreditado Descartes e Newton. Novos domínios surgiram ao fim do século XIX, dentro da própria física, os quais não corroboravam noções arraigadas como a de espaço e tempo absolutos, a existência de partículas sólidas elementares, substância material fundamental, natureza estritamente causal dos fenômenos físicos e descrição objetiva da natureza, marcando o começo de uma nova revolução que, desencadeada pela termodinâmica, a relatividade e a física quântica, encontra-se em pleno curso nos dias atuais.

Ensina-nos Alexandre Koyré que o *diálogo experimental* é o cerne da prática original a que convencionamos designar por ciência. Esse diálogo remete-nos a duas dimensões

constitutivas das relações homem-natureza, que são *compreender e modificar*, as quais representam por excelência o espírito da ciência moderna, que se consolida em torno de alguns pressupostos e dos seus respectivos desdobramentos, tais como:

- a) A convicção de que o método científico seria a única abordagem válida para a produção do conhecimento;
- b) A concepção do universo como um sistema mecânico composto de unidades materiais elementares;
- c) A concepção da vida em sociedade como uma luta competitiva pela existência;
- d) A crença em um progresso material ilimitado, a ser alcançado através de crescimento econômico e tecnológico constantes.

Antes do século XVII, os objetivos da ciência eram a sabedoria e a compreensão do ordenamento natural do mundo, um mundo que incluía a vida e o próprio homem; mas a partir daí o conhecimento, passando a ser concebido como instrumento para dominação e controle da natureza, começa a instaurar uma crise que acaba por alcançar o próprio sujeito do conhecimento. Assim se pronuncia Alexandre Koyré (1991, p. 245):

O sonho cartesiano da uma humanidade liberada pela máquina de sua sujeição às forças da natureza, de uma humanidade vitoriosa dos males que a oprimiam, animou a Europa durante mais de dois séculos. [...] Ao invés de libertar o homem e fazer dele “o senhor e possuidor da natureza”, a máquina transformou o homem num escravo de sua própria criação.

Conquanto encare de frente tal realidade, o estudo que Koyré faz do *maquinismo*, suas origens e as atitudes filosóficas que lhe dizem respeito, alcança a profundidade que reconhece na crise um caminho condizente com o processo histórico e com as raízes da cultura humana.

## 1.2 A DERROCADA DO MODELO NEWTONIANO-CARTESIANO

Dentre as três grandes frentes que abalaram a estrutura epistêmica da ciência galilaico-newtoniana, provindas da física, apenas duas foram agentes de mudança efetivamente drástica: a termodinâmica e a mecânica quântica. Quanto à relatividade, embora rompendo

com a antiga concepção de objetividade física, manteve ainda intacta uma das características basilares da física clássica, que diz respeito à persecução de uma descrição exaustiva da natureza. Neste sentido, pode-se dizer que a relatividade se situa ainda no prolongamento da física clássica.

A mecânica quântica, porém, nega radicalmente o solo epistêmico do universo clássico. Desde Newton, os físicos acreditaram que todos os fenômenos físicos pudessem ser reduzidos às propriedades de partículas materiais rígidas e sólidas. No entanto, na década de 20, do século passado, a teoria quântica forçou-os a aceitar o fato de que os objetos materiais sólidos da física clássica se dissolvem, no nível subatômico, em padrões de probabilidades semelhantes a ondas. Além disso, esses padrões não representam probabilidades de coisas, mas sim probabilidades de interconexões. Na origem da mecânica quântica, há um conjunto de dados novos que a mecânica clássica não conseguiu interpretar, tal como não havia sido capaz de, um século antes, enunciar as leis do funcionamento das novas máquinas que punham em ação não as forças da gravidade, mas o poder motriz do fogo.

No final do século XIX sabia-se que cada elemento químico emite uma luz que lhe é específica, uma luz que, contrariamente à luz branca, não possui o conjunto contínuo das frequências, mas apenas um espectro descontínuo. Por que um átomo excitado emite numa série de frequências descontínuas? Que estrutura atômica poderia explicar que cada elemento químico tenha um espectro particular? Estas foram algumas das questões cujas respostas introduziram na linguagem teórica um conceito até então desconhecido na física clássica: o *quantum*. Este termo, incorporado após a descoberta do efeito fotoelétrico, corresponde à menor medida de energia, que se apresenta “em pacotes”, como um fenômeno discreto, não-contínuo, fato aparentemente irreconciliável com a teoria ondulatória, à ocasião já amplamente demonstrada.

Para fazer frente às novidades conceituais da mecânica quântica, foram introduzidos os operadores. A toda grandeza física da mecânica clássica corresponde um operador em mecânica quântica e os valores numéricos que essa grandeza física pode tomar são os próprios valores desse operador. Enfim, o aprimoramento e as verificações experimentais ratificadoras da audaciosa construção teórica em torno da física atômica e molecular, acabaram por amalgamar uma estrutura originalíssima para a mecânica quântica, através da qual restou revelado que o mundo microscópico é regido por leis radicalmente novas, inviabilizadoras de uma descrição unificada do Universo, passível de ater-se a um único esquema conceitual.

Citando F.S. Northrop<sup>2</sup> (apud HEISENBERG, 1998, p. 10), em introdução à obra de Heisenberg, *Física e Filosofia*:

Há uma consciência generalizada de que a física contemporânea deu lugar a uma revisão importante da concepção que o homem tem do universo e de seu relacionamento com ele. Já se disse que essa revisão atinge o que há de mais fundamental no destino e liberdade humanas, afetando mesmo a concepção que tem o homem acerca de sua capacidade de controlar seu próprio destino.

Diz o próprio Heisenberg, na obra citada, que a mudança no conceito de realidade, que se manifesta na teoria quântica, não é uma simples continuação do passado, mas uma mudança de tal ordem, que estaria a representar um novo caminho, no que diz respeito à estrutura da ciência moderna. E, em outro trecho, afirma:

Uma das características mais importantes do desenvolvimento e análise da física moderna é a experiência a demonstrar que os conceitos da linguagem cotidiana, mesmo imprecisamente definidos como eles são, parecem exibir uma estabilidade maior na expansão do conhecimento que os termos precisos que a linguagem científica ostenta, decorrência de uma idealização a partir somente de grupos limitados de fenômenos. (HEISENBERG, 1998, p. 277)

Heisenberg antevê, deste modo, o cerne conceitual das questões que conduziriam à incorporação da *complexidade* pela ciência, no final do século XX, cabendo à termodinâmica um papel decisivo na introdução desta novidade. No modelo newtoniano, o futuro de qualquer parte de um sistema, bem como o seu passado, poderia ser calculado com absoluta certeza se o seu estado, em qualquer instante determinado, fosse conhecido em todos os detalhes, não havendo, pois, diferença entre passado e futuro, do que se depreende que os fenômenos, na formulação newtoniana, são completamente independentes da sua história.

A mudança conceitual na ciência, defendida por Prigogine, corresponde a uma transição de processos reversíveis e determinísticos para processos indeterminados e irreversíveis. Com efeito, a segunda lei da termodinâmica assegura a tendência, inerente aos fenômenos físicos, de transitarem da ordem para a desordem, no sentido de uma entropia sempre crescente. A entropia é o elemento fundamental introduzido na ciência pela termodinâmica e diz respeito, de maneira muito específica, aos processos irreversíveis:

Todos sabem o que é um processo irreversível. Podemos pensar na decomposição radioativa, ou na fricção, ou na viscosidade que desacelera o movimento de um fluido. Todos estes processos têm uma direção privilegiada no tempo, em contraste

---

<sup>2</sup> Professor de Direito e Filosofia da Faculdade de Direito da Universidade de Yale, EUA.

com os processos reversíveis, como o movimento de um pêndulo sem fricção. Uma substância radioativa, preparada no passado, desaparece no futuro e a viscosidade torna mais lento o movimento do fluido no futuro. Inversamente, no movimento do pêndulo ideal, não podemos distinguir o futuro do passado. [...] Enquanto os processos reversíveis são descritos por equações de evolução invariantes em relação à inversão dos tempos (+ t ou - t), como a equação de Newton na dinâmica clássica e a de Schrödinger na mecânica quântica, os processos irreversíveis implicam uma quebra da simetria temporal. (PRIGOGINE, 1996, p. 25)

Segundo Prigogine, a regra, na natureza, são os processos irreversíveis, pois os processos reversíveis correspondem sempre a idealizações, ou seja, aproximações decorrentes do isolamento dos sistemas, condição necessária a abordagem exaustiva dos mesmos, que se adequa à exigência de uma descrição matemática completa, própria do modelo científico vigente. Por um lado, o estudo da termodinâmica do não equilíbrio abre-se como uma excelente interface entre a física e as ciências da vida, visto que as demais leis físicas, como tradicionalmente formuladas, descrevem um mundo idealizado e estável, sem pressupostos formais à evolução e à vida, a qual só é possível de ser concebida longe do equilíbrio estático. De outra face, presta-se a alicerçar um reexame profundo do binômio homem x natureza.

Vivenciamos hoje um tempo de reconciliação do homem com a natureza e da ciência com a filosofia. Imerso na incerteza, o futuro está em aberto. O universo está em construção. A história humana, na condição de evento particular na história do universo, obedece a esta mesma dinâmica de inacabamentos, incertezas, flutuações, desvios e bifurcações, remetendo-nos a Henri Bérson, para quem “a realidade é apenas um caso particular do possível”. O possível está sempre em suspenso, em estado de potência, sujeito à flutuações. Esta descrição dá mais importância às relações do que às entidades isoladas e leva em conta o caráter dinâmico das mesmas, característica típica dos padrões orgânicos, que são capazes de unificar os opostos através das oscilações.

Os sistemas orgânicos são dotados de uma flexibilidade interna que, efetivamente, exclui a metáfora da máquina cartesiana. Esta funciona mediante leis lineares que associam cada causa a um efeito, enquanto aqueles são regidos por modelos cíclicos de realimentação. Um organismo vivo é um sistema auto-organizador, cuja ordem interna não é função imposta pelo ambiente, mas estabelecida por si mesmo, através de suas interações com o entorno e seus laços catalíticos internos. É dotado de criatividade e constrói sua história: a concepção mecanicista do universo como um sistema de minúsculas bolas de bilhar em movimento randômico, em contrapartida, é simplista e não tem alcance para explicar a vida e sua evolução.

Trata-se aqui de analisarmos as fundações do conhecimento científico, seus

pressupostos basilares, pois é no fato de tais fundamentos se encontrarem sabidamente abalados que reside evidência da crise paradigmática. No paradigma mecanicista clássico acreditava-se que as propriedades das partes seriam suficientes para explicar a dinâmica do todo, não importando quão complexo fossem os sistemas, e que seria sempre possível avançar no sentido de uma estrutura ou entidade fundamental que lhes servisse de alicerce. Supunha-se que existissem estruturas fundamentais que se encaixavam e interagiam como nos sistemas mecânicos; mas esta imagem do universo como uma máquina tem sido substituída, a partir das grandes mudanças conceituais introduzidas pela física moderna, pela idéia de um todo dinâmico interconectado, composto por sistemas em interação, que não carecem de uma fundação basilar, pois são sustentados por suas próprias relações de retroalimentação.

Entre as novidades trazidas pela física, que afrontam o modelo vigente e apontam para uma drástica mudança de perspectiva, o capítulo que se segue ocupa-se da termodinâmica, primeira das desconstruções que viriam a abalar severamente o até então considerado pronto, acabado e irretocável arcabouço newtoniano.

## CAPÍTULO 2

### UMA INCURSÃO À TERMODINÂMICA

Após breve levantamento histórico, a termodinâmica será apresentada em três níveis: o do equilíbrio, o do quase-equilíbrio ou da linearidade e, por fim, o nível da não-linearidade ou da complexidade, que é aquele que efetivamente importa ao trabalho. Um capítulo próprio será reservado ao estudo da *estabilidade afastada do equilíbrio* e da *irreversibilidade temporal*, temática dupla que se prestará à discussão filosófica a que se propõe o estudo. Feitas estas primeiras considerações, vamos ao encontro da termodinâmica, cuja via introdutória, outra não poderia ser, senão *o fogo*.

“*Ignis mutat res*”<sup>3</sup>: assim os antigos sintetizavam o seu conhecimento a respeito do fogo, vindo de tempos imemoriais, transmitido de geração em geração, diretamente dos mestres aos seus aprendizes; mas, somente no séc. XVIII essa arte-ofício de transformar as coisas pela ação do fogo adquiriu o status de ciência experimental. No século XIX, tão logo se descobriu que a combustão libertava calor e que este provocava uma variação de volume nos gases - podendo, portanto, produzir um efeito mecânico - começaram a aparecer as primeiras máquinas térmicas, abrindo espaço para o surgimento da sociedade industrial. Até então, as únicas fontes de energia concebíveis tinham sido aquelas provenientes dos ventos, da água, dos animais e das máquinas simples que estes elementos podiam fazer funcionar. As máquinas térmicas inglesas foram, portanto, uma novidade técnica sem igual e logo se difundiram.

É certo, pois, que o verdadeiro quadro de interesses a condicionar o desenvolvimento da termodinâmica não dizia respeito à natureza do calor propriamente dito, ou da sua ação sobre os corpos, mas da utilização desta ação, tratando-se de investigar, empiricamente, em que condições o calor produziria “energia mecânica” para fazer girar um motor. Contudo, embora se considere como marco do nascimento da termodinâmica o ano de 1824, com o trabalho de Sadi Carnot sobre a força motriz do fogo, como adiante se verá, já em 1811 o barão Jean Joseph Fourier, administrador civil do departamento de Isère, obtivera um prêmio da Academia Francesa de Ciências pelo seu estudo técnico da propagação do calor nos sólidos. Fourier proclamara, desde então, que “a propagação do calor entre dois corpos de

---

<sup>3</sup> O fogo transforma as coisas.

temperaturas diferentes é um fenômeno “*sui generis*”, não passível de reduzir-se às simples interações mecânicas de vizinhança. É importante evocar esse trabalho, que precedeu em mais de dez anos ao de Carnot, porque ele se apoiara em investigação científica pura e veio a exercer enorme influência no pensamento científico da época, disseminando os primeiros incômodos que, em breve, fariam tremer o solo sobre o qual até então haviam reinado, absolutamente intocáveis, Laplace e seu demônio.

Laplace foi um grande matemático e físico francês, que escreveu uma obra relevante contendo em síntese as idéias da física do século XVIII. Para ele, o mundo era constituído de um espaço euclidiano, onde partículas puntiformes se moviam conforme as leis de Newton. A conhecida expressão “demônio de Laplace” reporta-nos a uma inteligência capaz de conhecer, num dado instante, todas as forças da Natureza, uma figura onisciente por ele mesmo assim descrita:

Devemos, portanto, considerar o estado presente do universo como o efeito de seu estado anterior e como a causa daquele que se seguirá. Uma inteligência que, num instante dado, conhecesse todas as forças de que a Natureza está animada e a situação respectiva dos seres que a compõem, se por outro lado ela fosse suficientemente vasta para submeter todos esses dados à análise, englobaria na mesma fórmula os movimentos dos maiores corpos do universo e aqueles do mais leve átomo: nada seria incerto para tal inteligência, e o futuro, tanto quanto o passado, estaria presente a seus olhos. (LAPLACE apud MERLEAU-PONTY, 2000, p. 142)

Natural, portanto, que Laplace e seus discípulos se insurgissem veementemente contra a termodinâmica, pois “no momento de sua glória mais retumbante, o sonho laplaciano foi atingido mortalmente com o surgimento de uma teoria física matematicamente tão rigorosa quanto as leis mecânicas do movimento e absolutamente estranha ao mundo newtoniano, e, desde então, a física matemática e a ciência newtoniana deixaram de ser sinônimas” (PRIGOGINE, 1991, p. 59). A formulação das leis de difusão do calor ensejou, portanto, principalmente a partir do trabalho de Fourier, as primeiras indagações acerca das fragilidades do modelo newtoniano.

## 2.1 A TERMODINÂMICA DO EQUILÍBRIO

Para estudar a física do calor, define-se um sistema, não como na dinâmica, pela

posição e velocidade dos seus constituintes (há cerca de  $10^{23}$  moléculas num volume de gás ou fragmento de sólido da ordem do  $\text{cm}^3$ ), mas por um conjunto de parâmetros macroscópicos. Esses parâmetros determinam a composição do sistema e também suas relações com o resto do mundo, que constitui o “meio”, onde certas condições se fixam (condições aos limites). Pressão, volume, temperatura, composição química e quantidade de calor constituem os parâmetros físico-químicos clássicos em termos dos quais as propriedades mais gerais dos sistemas materiais podem ser definidas.

A termodinâmica é a ciência das variações correlatas dessas propriedades e é fundamental observar que o seu objeto requer necessariamente um ponto de vista inovado em relação ao objeto dinâmico, pois já não se trata de observar uma evolução, calculando o efeito previsto, com base em formulações ideais das interações entre os elementos do sistema. Trata-se, diferentemente, de agir sobre o sistema prevendo reações atreladas a uma modificação imposta. A descrição incide, então, sobre as mudanças sofridas pelo estado macroscópico e sobre a variação de cada parâmetro e o modo como, variando, cada um influi sobre o valor dos demais.

Enquanto o motor mecânico tão somente restitui, sob a forma de trabalho, a energia potencial que uma interação anterior com o meio lhe tenha conferido, num motor térmico, as trocas de calor com o exterior provocam uma *mudança de estado*, associada a alterações das propriedades mecânicas do sistema, tais como dilatação ou contração, as quais não se devem a um trabalho mecânico, mas a uma transformação intrínseca do sistema. Trata-se, portanto, não apenas de transmitir, repassar, mas de *produzir* movimento.

Visto que o motor térmico *produz* movimento, surge daí um novo problema: depois de uma mudança de estado produtora, é necessário prever um segundo processo que reconduza o sistema ao seu estado inicial, para que sua capacidade de produzir movimento seja restaurada. Uma segunda mudança de estado deve compensar a primeira, através de um processo simultaneamente equivalente e inverso ao processo produtor. Num motor térmico, este segundo processo corresponde ao resfriamento, que permite ao sistema recuperar sua temperatura, pressão e volume iniciais.

A questão do rendimento dos motores térmicos, envolvendo a relação entre o trabalho produzido e o calor que é preciso dar ao sistema para os dois processos que se compensam, é o ponto onde a noção de processo irreversível se introduziu em física. Contudo, este enfoque foi em princípio ignorado, principalmente quando a efervescência experimental do começo do século XIX trouxe à baila um outro universal: a energia.

### 2.1.1 O princípio de conservação de energia

Que o calor pode ser convertido em trabalho estava já largamente demonstrado em fins do séc. XVIII, a partir da máquina a vapor desenvolvida por James Watt. Mas somente no século XIX a relação entre calor e energia veio a se esclarecer, cabendo ao médico alemão Julius Robert Mayer as primeiras considerações, datadas de 1842, acerca desta conexão:

As energias são entidade conversíveis, mas indestrutíveis [...] Em inúmeros casos vemos que um movimento cessa sem ter produzido quer outro movimento, quer o levantamento de um peso, mas a energia, uma vez que existe, não pode ser aniquilada; pode somente mudar de forma, e daí surge a questão: que outras formas pode ela assumir? Somente a experiência pode levar-nos a uma conclusão. (MAYER apud NUSSENZVEIG, 2002, p. 168)

O problema do equivalente mecânico da caloria foi também levantado por Mayer, que questionava: “quão grande é a quantidade de calor que corresponde a uma dada quantidade de energia cinética ou potencial?” Mas foi o cientista amador James Prescott Joule quem apresentou as primeiras respostas a esta questão. Seus primeiros resultados datam de 1843, mas, buscando melhorá-los em confiabilidade, somente em 1847, numa reunião científica em Oxford, veio a apresentá-los. No mesmo ano, numa reunião da Sociedade de Física de Berlim, o físico-matemático e fisiologista Hermann von Helmholtz apresentou uma primeira formulação realmente generalizante, mostrando que o princípio da conservação da energia aplicava-se não só aos fenômenos mecânicos e térmicos, mas aos fenômenos elétricos, magnéticos, à físico-química, a astronomia, à biologia e ao metabolismo dos seres vivos em geral:

[...] Chegamos à conclusão de que a natureza como um todo possui um estoque de energia que não pode de forma alguma ser aumentado ou reduzido; e que, por conseguinte, a quantidade de energia da natureza é tão eterna e inalterável como a quantidade de matéria. Expressa desta forma, chamei esta lei geral de “Princípio de Conservação de Energia”. (HELMHOLTZ apud PRIGOGINE, 1991, p. 88)

Os físicos do século XIX atribuíram extrema importância ao *princípio de conservação de energia*, vendo nele não apenas a unificação dos diferentes campos experimentais, através das relações de conversão, mas o protótipo de um conceito unificador para a natureza em todos os seus campos. Por volta de 1860, este princípio, que corresponde na verdade à primeira lei da termodinâmica, já havia sido reconhecido como um princípio fundamental, aplicável a todos os fenômenos conhecidos. Prigogine chama atenção para a importância que

o princípio da conservação de energia assume não só perante a ciência, mas do ponto de vista da cultura em geral, fomentando uma nova concepção de homem e da própria natureza, visto que esta última, com o advento da energia como um universal, já não cabe na metáfora fria do artefato mecânico. Mas, ele faz restrições ao abuso da noção de equivalência:

A Ciência, que descreve as transformações de energia sob o signo da equivalência, deve, contudo, admitir que só a diferença pode ser produtora de efeitos, que sejam por sua vez diferenças. A conversão da energia não é mais que a destruição de uma diferença, a criação de uma outra diferença. (PRIGOGINE, 1991, p. 90)

Não só os processos de conversão envolvendo fenômenos mecânicos e térmicos, mas também elétricos, magnéticos e ópticos, levaram os cientistas, entre os anos de 1820 e 1850, à formulação do princípio da conservação da energia. Mas o que é energia? Que entidade é esta, que passou ao senso comum como algo “etéreo” e universalizante, capaz de circular entre os corpos, saindo livremente de um lugar, aportando em outro, sendo armazenada aqui ou acolá? A verdade é que o conceito de energia é algo essencialmente teórico. Energia não se pode medir, pois não é um observável. Só podemos calculá-la indiretamente, a partir de quantidades observáveis a ela correlatas. Em mecânica, energia é uma quantidade associada a um movimento, seja atual ou potencial. No primeiro caso, temos a energia cinética; no segundo, a energia potencial.

A conservação se exprime como uma condição de constância necessária para a soma destas duas modalidades de energia mecânica. No caso da energia térmica, o princípio de conservação trata da mesma relação entre energia cinética e energia potencial, só que, neste caso, envolvendo a totalidade das moléculas do sistema. A fecundidade do princípio de conservação de energia é enorme para uma abordagem epistemológica. De início, duas grandes questões se apresentam ao estudioso do assunto: a inconsistência do princípio da conservação de energia para sistemas abertos e sua associação direta a uma simetria de translação temporal, de onde se depreende sua adequação perfeita ao modelo clássico, onde só os sistemas fechados são abordáveis e o tempo não afeta as leis físicas em qualquer medida.

### **2.1.2 Das máquinas térmicas às leis da termodinâmica**

Apesar da obviedade de que máquina térmica alguma poderá jamais devolver ao mundo o carvão que tenha consumido, a ciência da energia começa por descrever a natureza

como um conjunto de dispositivos de conversão, regidos por balanços reversíveis. Isto equivale a dizer que a termodinâmica, apesar do seu potencial desestruturante perante a ciência clássica, surgiu classicamente. Nascida, como já se mencionou, em 1824, com o trabalho de Sadi Carnot sobre a força motriz do fogo, a termodinâmica surge, ainda sob a égide do calórico – um fluido com o qual Carnot e a grande maioria dos cientistas do seu tempo identificavam o calor – e como um problema de rendimento: qual máquina dará maior rendimento? Será possível um rendimento ideal? Quais as razões de perda? Quais os processos subjacentes ao fato de o calor fluir sem produção de trabalho?

Estas as questões propostas por Carnot, que se articulavam em torno do seguinte problema: dadas duas fontes, uma cederia fluido calórico ao sistema motor, ao passo que a outra, de temperatura diferente, absorveria o calórico cedido pela primeira, enquanto o movimento do calórico através do motor, entre as duas fontes de temperaturas diferentes, o faria girar, tal como a água que cai entre dois níveis diferentes pode mover um moinho. Enfim, *dadas uma fonte quente e uma fonte fria, qual seria o máximo rendimento que se poderia obter de um motor térmico operando entre elas?* Para que se obtenha o máximo rendimento é preciso que o processo seja reversível. Como seria, então, uma máquina térmica operando reversivelmente, visto que a condução de calor é irreversível? Seria necessário um sistema que só pudesse trocar calor com as fontes quando à mesma temperatura que elas.

Carnot imaginou, então, um ciclo – o famoso “*ciclo ideal de Carnot*” – capaz de realizar o paradoxo de um transporte global de calor entre duas fontes de temperaturas diferentes, sem fluxo algum direto de calor e sem o estabelecimento de contato entre corpos de temperaturas diferentes. A máquina de Carnot é composta por um elemento agente – no caso um gás, contido num recipiente de paredes adiabáticas, exceto pela sua base, que é diatérmica – de um pistão e de uma base adiabática sobre a qual o sistema é colocado e as duas fontes, quente e fria, conforme figura 1:

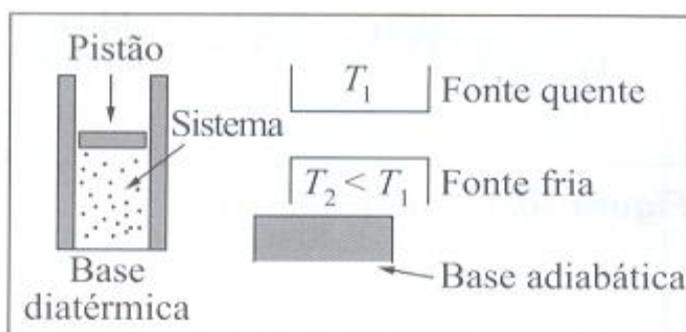


Figura 01 - Componentes de uma máquina de Carnot.  
Fonte: Nussenzveig (2002, p. 212).

O ciclo contém quatro fases, ilustradas na figura 2. No decurso de cada uma das fases isotérmicas, o sistema está em contato com uma das duas fontes térmicas e é mantido à temperatura dessa fonte. Em contato com a fonte quente, as fases isotérmicas são conectadas entre si por duas outras fases onde o sistema é isolado das fontes: o calor não entra nem sai mais do sistema, mas este varia de temperatura em seguida a uma compressão e a uma dilatação, respectivamente.

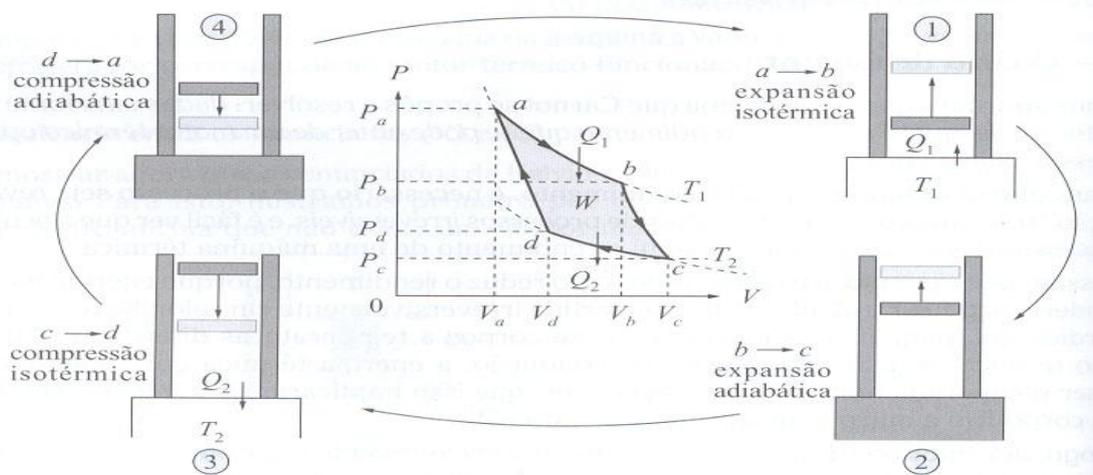


Figura 02 – O Ciclo de Carnot.  
Fonte: Nussenzveig (2002, p. 212).

- (1) Partindo do ponto “a”, faz-se uma expansão isotérmica reversível à temperatura  $T_1$ , até o ponto b. O gás realiza trabalho e absorve uma quantidade de calor  $Q_1$  da fonte quente.
- (2) A partir de “b”, o sistema, colocado sobre a base isolante, sofre uma expansão adiabática reversível: o gás realiza trabalho e sua energia interna diminui, com conseqüente queda de temperatura de  $T_1$  para  $T_2$  (pto c).
- (3) Partindo de “c”, o recipiente é colocado em contato térmico com a fonte fria e é submetido a uma compressão isotérmica reversível à temperatura  $T_2$  da fonte fria. O gás recebe trabalho e fornece uma quantidade de calor  $Q_2$  à fonte fria, até chegar ao ponto “d” da figura, situado sobre a adiabata que passa por “a”.
- (4) Finalmente, a partir de “d”, o sistema é recolocado sobre a base isolante e submetido a uma compressão adiabática reversível, aquecendo o gás até que ele retorne à temperatura  $T_1$  da fonte quente, o que permite que volte ao contato com esta fonte, fechando o ciclo em (1). (NUSSENZVEIG, 2002, p. 212)

A Primeira lei da Termodinâmica está associada, como já foi dito, ao princípio geral de conservação de energia e a ele incorpora o reconhecimento de que o calor é uma forma de energia. Afirmando que o calor recebido por um sistema é igual à soma da variação de sua energia interna com o trabalho por ele efetuado, a primeira lei da termodinâmica pressupõe a reversibilidade de todos os processos térmicos. Ou seja, se um dado processo ocorre num certo *sentido* ou *seqüência temporal*, conservando a energia em cada instante, nada se prevê

que possa impedir a sua inversão.

Se todos os processos até então são tidos por reversíveis, isto significando que nada existe capaz de distinguir uma sucessão de eventos num sentido (temporal) de sua ocorrência no sentido inverso, então qual seria a origem física da distinção entre passado e futuro? Historicamente, esta questão, que é ainda hoje fonte de uma das mais profundas indagações da ciência, está diretamente associada ao problema do rendimento das máquinas térmicas e ela introduz na física uma orientação temporal, a chamada flecha ou “*seta do tempo*”.

Existem enunciados distintos para a segunda lei, que se equivalem no sentido de afirmarem que não existe o moto contínuo de segunda ordem (da primeira lei depreende-se a não-existência do moto contínuo de primeira ordem). Após o trabalho de Sadi Carnot, que lhe abriu caminho, a segunda lei da termodinâmica foi formulada por Clausius em 1850 e por Thomson (Lord Kelvin) em 1851.

*É impossível realizar um processo cujo único efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho.*

(Segunda lei da termodinâmica: enunciado de Kelvin)

*É impossível realizar um processo cujo único efeito seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.*

(Segunda lei da termodinâmica: enunciado de Clausius)

Descrevendo o ciclo de Carnot no novo contexto da conservação da energia, em 1850, Clausius descobriu que a necessidade das duas fontes e a fórmula do rendimento ideal enunciada por Carnot traduzem o problema específico dos motores térmicos: a obrigação de um processo compensador que restitua o motor aos seus estados mecânico e térmico iniciais. Às relações de balanços exprimindo a conversão da energia juntam-se, desde então, novas relações de equivalência entre os dois processos, *fluxo* de calor entre as fontes e *conversão* de calor em trabalho, cujos efeitos se compensam do ponto de vista do estado físico-químico do sistema.

A interpretação de Clausius tem um significado profundo e repercute na própria *idéia de natureza*, a qual é agora um reservatório inesgotável de energia, que só se deixa acessar mediante condições específicas. Como Carnot, Clausius não estava ainda, em 1850, diretamente interessado nas perdas que impõem a um motor real um rendimento inferior ao ideal previsto pela teoria, porque, até então, embora todos os balanços reais fossem deficitários, só *o ideal* era objeto da ciência pois o mundo de então era laplaciano, conservativo e eterno, à imagem da máquina simples ideal. Mas, o novo mundo, descrito por Clausius era uma máquina para a qual a conversão do calor em movimento não poderia se dar

senão a custo de um desperdício irreversível, da dissipação inútil de certa quantidade de calor.

As diferenças produtoras dos efeitos não cessam de diminuir no seio da natureza; o mundo, de conversão em conversão, esgota suas diferenças e se dirige para o estado final definido por Fourier, o estado de equilíbrio térmico onde não subsiste mais diferença alguma que possa produzir um efeito. (PRIGOGINE, 1991, p. 93)

Foi então preciso ir além do simples princípio de conservação de energia e encontrar uma maneira de exprimir a distinção entre os fluxos úteis e os fluxos dissipados, perdidos, entre mudanças de estado sucessivas, de um sistema. É este o papel desempenhado pela entropia. Esta constitui-se no que, em termodinâmica, designa-se por *função de estado* e normalmente, no modelo clássico, está associada com a tendência natural que os sistemas têm para a desordem. Isto é verdade se os sistemas são fechados. Mas, para sistemas abertos, a produção de entropia traduz uma evolução espontânea e irreversível, conforme a *seta do tempo*. Assim, para todo sistema isolado, o futuro é o sentido na qual a entropia aumenta.

### 2.1.3 O princípio de ordem de Boltzmann

No final do século XIX persistiam separadas e sem qualquer vislumbre de uma formulação que as pudesse aproximar, a velha e estabelecida dinâmica, aplicável ao mundo das massas em movimento, e a termodinâmica, base da nova ciência do complexo. Prevalencia a redução da complexidade dos fenômenos naturais à simplicidade de comportamentos elementares, embora já se houvesse revelado como um modelo equivocado. Foi Boltzmann quem primeiro enfrentou o desafio de buscar conceitos novos, capazes de ampliar a física das trajetórias até o alcance das situações descritas pela termodinâmica, abordando-as do ponto de vista probabilístico. A interpretação probabilística de Boltzmann, e o princípio dela decorrente, conhecido como *o princípio da ordem de Boltzmann*, permitem prever a formação de estruturas físicas ordenadas e descrever a coexistência de fases num sistema em equilíbrio.

A termodinâmica do equilíbrio oferece uma resposta satisfatória quanto a um número enorme de fenômenos físico-químicos. Porém, como ela resulta da compensação estatística da atividade de uma multidão de constituintes elementares, desprovidos de atividade macroscópica, é insuficiente para descrever sistemas abertos, os quais não se sujeitam ao formalismo dos sistemas fechados por alimentarem-se do fluxo de matéria e de energia que lhes vem do mundo externo. Pode-se isolar um cristal, mas uma célula não sobreviveria

separada do seu meio. E não apenas a natureza viva é radicalmente estranha aos modelos da termodinâmica do equilíbrio. A hidrodinâmica, a ciência dos fluxos e das turbulências, e a meteorologia são exemplos de fenômenos que descrevem a natureza inanimada como sede de fluxos incessantes que a constituem como ativa e organizada.

#### **2.1.4 A termodinâmica linear**

A produção de entropia permite distinguir três grandes domínios da termodinâmica, cujo estudo corresponde a três etapas sucessivas do seu desenvolvimento. Assim como a produção de entropia, os fluxos e as forças são simultaneamente nulos no equilíbrio, o que corresponde ao primeiro domínio. Próximo do equilíbrio, temos o segundo, onde as forças termodinâmicas são fracas e o fluxo é uma função linear da força. Por fim, o terceiro é aquele que extrapola as condições de aproximação que favorecem a linearidade: é o domínio da termodinâmica não-linear.

A termodinâmica do equilíbrio foi obra do século XIX, enquanto a do não-equilíbrio só veio a se desenvolver no século XX, em princípio nos limites da termodinâmica linear, a qual surge das chamadas “relações de Onsager”, que representam o ponto crucial na transferência de interesse do equilíbrio para o não-equilíbrio. Trabalhando com a dinâmica próxima do equilíbrio, em 1931, Onsager descobriu a primeira relação geral pertencente à termodinâmica de não-equilíbrio: são as chamadas “relações de reciprocidade”.

Conceitualmente, considerando-se que um gradiente é uma medida de variação de determinada característica de um meio. Pode-se afirmar que as relações de Onsager demonstram que a existência de um gradiente térmico pode determinar um processo de difusão de matéria e o aparecimento de um gradiente de concentração, numa mistura inicialmente homogênea; simetricamente, um gradiente de concentração produz, com o mesmo coeficiente de proporcionalidade, um fluxo de calor através do sistema.

Prigogine chama atenção para o fato de as relações de Onsager possuírem uma generalidade, pois as relações de reciprocidade são válidas independentemente de qualquer hipótese microscópica, também pouco importando que os fenômenos irreversíveis se produzam em meio gasoso, líquido ou sólido. Esta generalidade constitui, segundo ele, o primeiro resultado pertencente à termodinâmica dos fenômenos irreversíveis que permite pensar na fecundidade deste domínio em contraposição ao da termodinâmica do equilíbrio.

Outro resultado geral importante na esfera da termodinâmica linear é que no domínio onde as relações de Onsager são válidas, um sistema evolui para um estado estacionário caracterizado pela produção de entropia mínima, compatível com as coerções a ele impostas pelas condições aos limites, como no caso simples de se impor ao sistema uma força termodinâmica de valor constante.

Enfim, a termodinâmica linear descreve comportamentos estáveis, previsíveis, dos sistemas que tendem para a taxa mínima da atividade compatível com os fluxos que a alimentam. O fato de que a termodinâmica linear, tal como a termodinâmica do equilíbrio, permita a definição de um potencial significa que, com a evolução para o estado estacionário, para o equilíbrio, há o esquecimento das condições iniciais. Assim, qualquer que seja a situação inicial, o sistema atinge um estado determinado pelas condições aos limites e sua reação à mudança destas condições é também previsível. Disto decorre que a termodinâmica linear trabalha com condições que inibem a evolução do sistema para um *devenir complexo*, evitando o paradoxo, que só a termodinâmica não-linear será capaz de enfrentar, que é a oposição entre o surgimento de formas naturais organizadas e a tendência física para a desorganização.

## 2.2 A TERMODINÂMICA DO NÃO-EQUILÍBRIO

Para sistemas em que os fluxos não são funções lineares de forças, não é possível encontrar um método geral de definição de uma função potencial. Assim, a estabilidade deixa de ser atributo de um dado estado, passando a ser examinada em função da regressão de todas as flutuações que possam perturbá-lo. De tal modo, um sistema é dito instável se restar demonstrado que algumas das flutuações a que está sujeito, ao invés de regredirem, são passíveis de se ampliarem invadindo todo o sistema, de modo a que este evolua para um novo regime qualitativamente diverso dos estados estacionários correspondentes à mínima produção de entropia. A termodinâmica permite assim precisar quais os sistemas suscetíveis de escapar ao tipo de ordem que rege o equilíbrio, e a partir de que limiar, de que distância do equilíbrio, de que valor da coerção imposta, as flutuações se tornam capazes de impelir o sistema para um comportamento completamente diferente do usual dos sistemas termodinâmicos.

Longe do equilíbrio, a noção de probabilidade que está no centro do princípio de ordem de Boltzmann invalida-se, ao mesmo tempo em que se relativiza a tendência para o nivelamento e esquecimento das diferenças no interior de cada sistema. Segundo Prigogine (1991), a vida escapa ao princípio de ordem de Boltzmann, mas adentra a ordem das possibilidades implicadas pela termodinâmica longe do equilíbrio, onde “*a dissipação de energia e de matéria – geralmente associada às idéias de perda de rendimento e de evolução para a desordem – torna-se, longe do equilíbrio, fonte de ordem*”.

### **2.2.1 Auto-organização e estruturas dissipativas**

Em 1967, Prigogine apresentou pela primeira vez sua concepção de estruturas dissipativas, numa conferência proferida em um Simpósio Nobel em Estocolmo, e publicou a teoria completa, juntamente com Paul Gransdorff, em 1971, afirmando que estas estruturas não apenas se mantêm num estado estável longe do equilíbrio, como são passíveis de evoluir. Quando o fluxo de energia e de matéria que passa através delas aumenta, elas podem experimentar novas instabilidades, transformando-se em novas estruturas, de complexidade crescente. A detalhada análise desse fenômeno notável, procedida por Prigogine, mostrou que, embora as estruturas dissipativas recebam sua energia do exterior, as instabilidades e os saltos para novas formas de organização são o resultado de flutuações amplificadas por laços de realimentação positivos.

As estruturas dissipativas correspondem, portanto, a uma forma de organização supermolecular. Diferentemente da estrutura cristalina que é descrita por parâmetros relacionados às propriedades das moléculas constituintes, elas refletem, de modo intrínseco, a situação global de não-equilíbrio que as origina, de modo que são macroscópicos, da ordem do cm, os parâmetros que as descrevem, em contraposição à distância entre as moléculas de um cristal, que é da ordem de  $10^{-8}$  cm. Tais estruturas constituem uma das mais influentes e ricas descrições de sistemas dotados de auto-organização.

A concepção de auto-organização surgiu com o advento da cibernética, quando os cientistas começaram a construir modelos matemáticos para representar a lógica associada às redes neurais. Em 1943, o neurocientista Warren McCulloch e o matemático Walter Pitts publicaram um artigo pioneiro intitulado “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”, onde demonstravam que qualquer processo fisiológico poderia ser expresso através

de uma lógica baseada nas regras de construção de uma rede, quando neurônios idealizados foram introduzidos e representados por elementos comutadores binários, construindo-se um modelo simplificado do que seriam as redes reais constitutivas do sistema nervoso.

Na década de 1950, de uma sucessão de experimentos realizados a partir desses modelos de redes binárias, surgiram, para espanto geral, padrões ordenados que emergiam espontaneamente, mesmo que o estado inicial da rede fosse escolhido aleatoriamente. Essa emergência espontânea de ordem ficou conhecida como auto-organização. Durante duas décadas, o físico e ciberneticista Heinz von Foerster manteve, na Universidade de Illinois, um grupo de pesquisas interdisciplinares dedicado ao estudo dos sistemas auto-organizadores. O trabalho desse grupo serviu de base para vários modelos bem-sucedidos de auto-organização desenvolvidos no final da década de 1970 e durante os anos 1980.

No período referido, Ilya Prigogine publica, em 1971, na Bélgica, seu trabalho completo sobre as estruturas dissipativas; Hermann Haken, na Alemanha investiga o fenômeno da coerência no laser; também na Alemanha, Manfred Eigen, prêmio Nobel de Química, introduz o termo “auto-organização molecular” para, através de sua teoria de hiperciclos, descrever processos evolutivos pré-biológicos resultantes, segundo afirma, da organização progressiva de sistemas químicos afastados do equilíbrio. Os neurologistas chilenos Humberto Maturana e Francisco Varela introduzem o conceito de autopoiese – que significa auto-criação – para caracterizar a organização dos sistemas vivos.

Em todos esses modelos, a concepção inicial de auto-organização introduzida pela cibernética foi modificada para incluir a criação de novas estruturas e de novos modos de comportamento nos processos de desenvolvimento, de aprendizagem e de evolução. Pode-se, assim, partir das características comuns a todos os modelos até hoje desenvolvidos, nas mais diferentes frentes teóricas, para conceituar a auto-organização como *o surgimento espontâneo de novas estruturas e novos padrões de comportamento em sistemas abertos, longe do equilíbrio, os quais ostentam laços de realimentação internos e são passíveis de descrição matemática por meio de equações não-lineares.*

Quanto às estruturas dissipativas, que importam mais diretamente ao enfoque deste trabalho, os dois ramos da ciência que delas se ocupam com maior ênfase são a hidrodinâmica e a cinética química, aos quais, recentemente, veio juntar-se a óptica do laser. Um exemplo muito conhecido na hidrodinâmica é a instabilidade de Bénard. Trata-se de um fenômeno surpreendente, resultado da “imposição de um gradiente vertical de temperatura a um estrato horizontal de fluido, até que a diferença de temperatura entre a superfície superior do estrato

fique bastante quente; nesse ponto se formam no líquido turbilhões, em que bilhões de partículas correm vertiginosamente umas atrás das outras, criando estruturas características, de forma hexagonal” (PRIGOGINE, 2002, p. 22).

Antes que se desencadeassem os movimentos coletivos, todos os pontos da camada líquida encontravam-se no mesmo estado; após a ruptura da simetria espacial, com a aparição das vórtices de Bénard, isto já não ocorre, pois ao se estabelecer a instabilidade, em alguns pontos irrompe um movimento ascendente e em outros um movimento descendente. Vórtices são pontos em torno dos quais circula o vetor velocidade de um fluido em movimento. No caso destas estruturas, eles podem girar para a direita ou para a esquerda; no momento da transição à estrutura de vórtices, cada ponto da camada líquida “escolhe” um sentido de giro; há uma ampla gama de estruturas, das quais se “escolhe” uma no ponto de transição (figura 03).

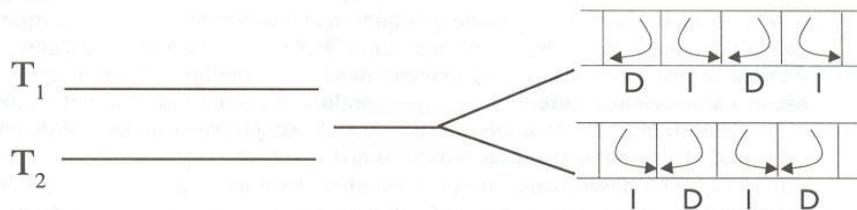


Figura 03 – Instabilidade de Bénard: multiplicidade de soluções.  
Fonte: Fried (1996, p. 32).

Outro campo no qual as estruturas dissipativas desempenham um papel muito importante é o das reações químicas. O esquema teórico mais elementar, proposto em 1967, é o “Brusselator”, representado na figura 4, em que um produto X, sintetizado a partir de A e degradado sob a forma de E, está em relação de catálise mútua com um outro produto Y, produzindo uma cadeia reacional.

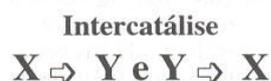
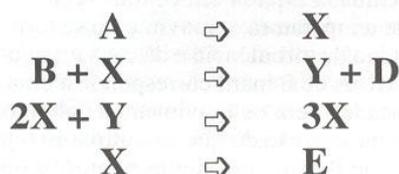


Figura 04 - “Brusselator”.  
Fonte: Fried (1996, p. 32).

A condição principal para que apareça uma estrutura dissipativa é o efeito intercatalítico, segundo o qual X conduz a Y e Y a X. As estruturas dissipativas ocorrem nos pontos de bifurcação, onde emergem novas ramificações (figura 05).

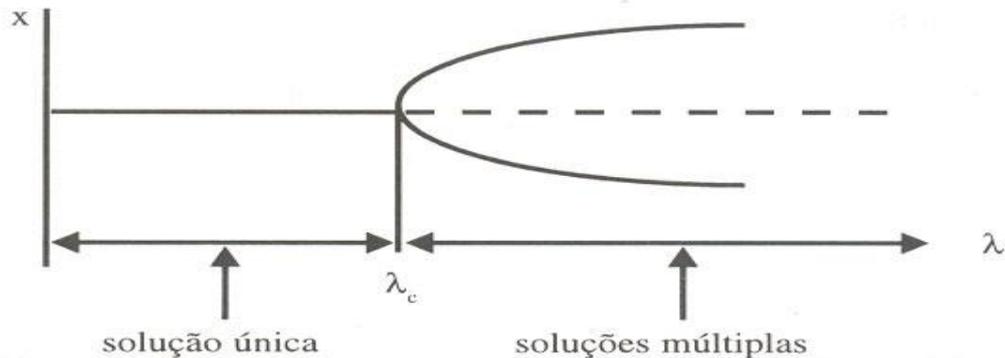


Figura 05 – Ponto de Bifurcação.  
Fonte: Fried (1996, p. 33).

Um sistema tão simples como o de Brusselator comporta já uma série de pontos de bifurcação. Uma das previsões decorrentes do modelo de Brusselator corresponde a aparição de *oscilações químicas*, mesmo que positiva a produção de entropia. Conhece-se hoje um número significativo de osciladores químicos em que a solução oscilante, muito distante do equilíbrio, aparece a partir de um ponto de *bifurcação*. Dos pontos de bifurcação surgem diversas soluções, e a escolha entrelas é dada por um processo probabilístico.

A existência de bifurcações confere um caráter histórico à evolução de um sistema; uma propriedade interessante de tais bifurcações consiste no fato de que pequenas variações conduzem à escolha preferencial de um ramo ao invés de outro. Na figura 06, abaixo, o primeiro esboço representa a bifurcação ideal, enquanto o segundo representa uma bifurcação incompleta, devida à presença de um campo que rompe a simetria entre os dois ramos.

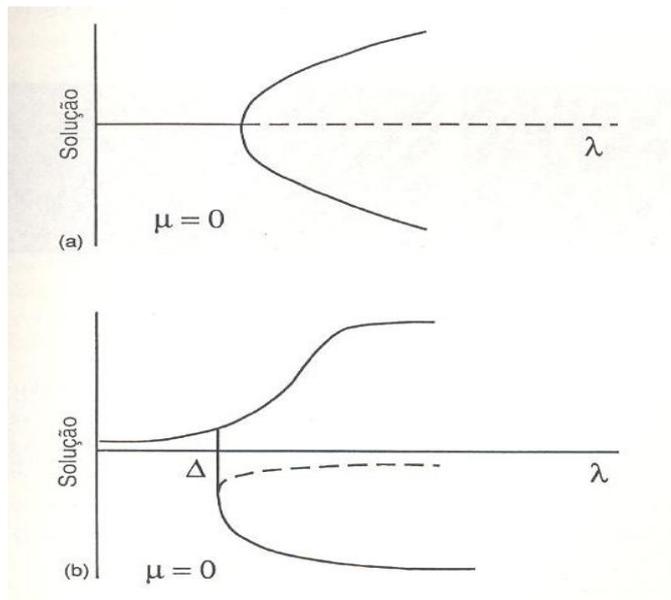


Figura 06 – Bifurcação Incompleta.  
Fonte: Prigogine (2002, p. 25).

Para exemplificar a ruptura de simetria, Ilya Prigogine refere-se, em mais de uma publicação, ao estudo de Kondepudi e sua equipe<sup>4</sup>, que diz respeito à quebra de simetria nos cristais de clorato de sódio ( $\text{NaClO}_3$ ) quando se agita a solução em que cristalizam. Se a solução não é agitada, a metade dos cristais torna-se opticamente ativa para a direita e a outra metade para a esquerda, ao passo que, uma vez agitada a solução, os cristais tornam-se todos opticamente ativos para a direita ou todos para a esquerda (figura 07).

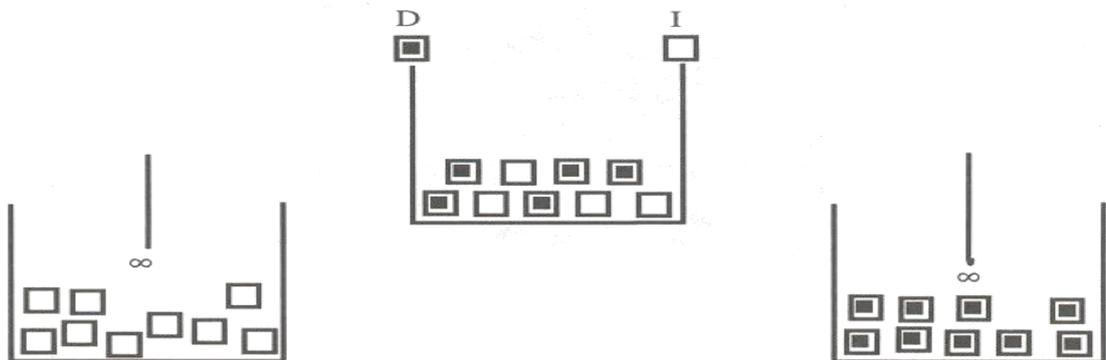


Figura 07 – Quebra de Simetria na atividade ótica dos cristais de clorato de sódio.  
Fonte: Fried (1996, p. 33).

<sup>4</sup> Prigogine remete a Kondepudi & Kaufman, N. Singh, *Science*, v. 250, p. 975, 1990.

Uma outra manifestação de coerência e auto-organização espacial de sistemas distanciadas do equilíbrio é a formação de estruturas espaciais que foram previstas por Turing, em um estudo de 1952 e efetivamente observadas em 1992, nos laboratórios de Bordeaux e Austin (figura 08).

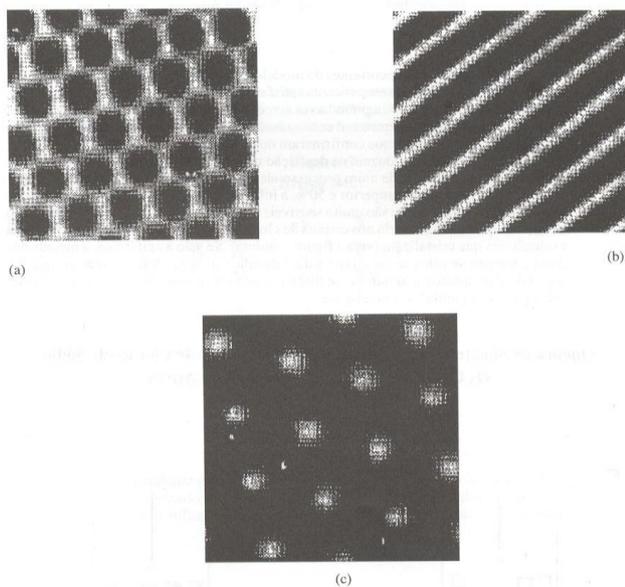
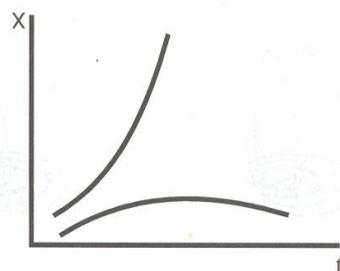


Figura 08 – Estruturas de Turing.  
Fonte: Fried (1996, p. 33).

Situações afastadas do equilíbrio podem propiciar tanto comportamentos espaciais altamente coerentes, como é o caso dos osciladores químicos, quanto pode gerar o “caos”, entendendo-se como tal a indeterminação no comportamento temporal. Aborda-se, no momento, o caos dissipativo, que como fenômeno macroscópico, corresponde a seqüências temporais irregulares, cuja característica básica é a aparição de trajetórias divergentes que se afastam umas das outras exponencialmente, conforme se vê na figura 09.

$$(\delta\chi)_t = (\delta\chi)_0 e^{\lambda t} \text{ (onde } \lambda \text{ é um valor positivo)}$$



$\lambda$  Expoente de Lyapounov

Figura 09 – Caos: trajetórias que divergem exponencialmente.  
Fonte: Fried (1996, p. 35).

Na figura seguinte, vê-se um feixe de trajetórias concentradas numa mesma região, comprovando-se que, ao transcurso do tempo, elas se distribuem em todas as posições possíveis:

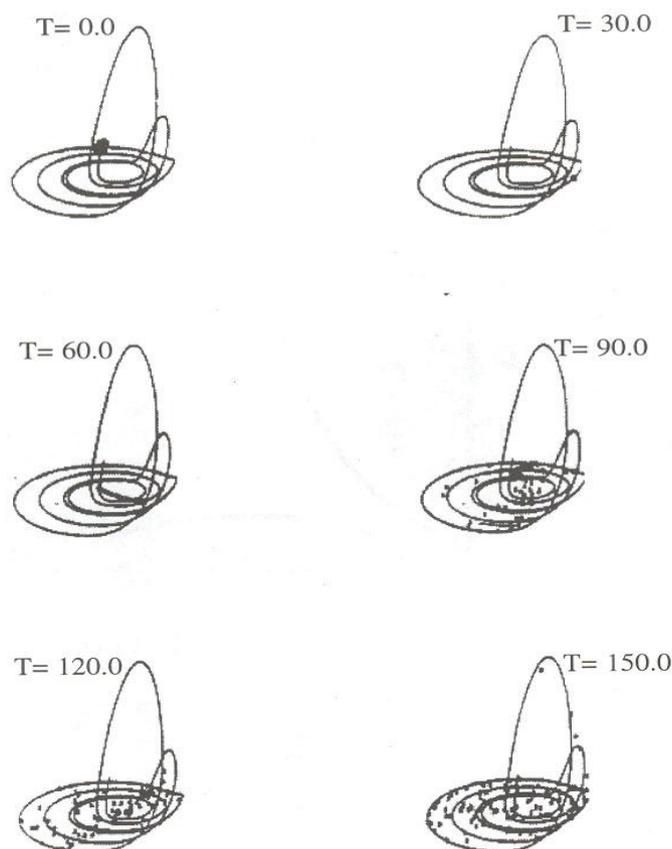


Figura 10 – Distribuição aleatória das trajetórias em um sistema caótico.  
Fonte: Prigogine (2002, p. 28).

Os processos caóticos são, também, particularmente importantes na fisiologia nervosa, onde, curiosamente, o caos parece ser a condição prévia necessária à normalidade da atividade cerebral, visto que sinais elétricos demasiado regulares são indicadores de enfermidade. Na figura 11, que se vê abaixo, entre os sinais cerebrais apresentados, os que ostentam maior regularidade não estão relacionados à condição de vitalidade, mas justamente ao “coma”.

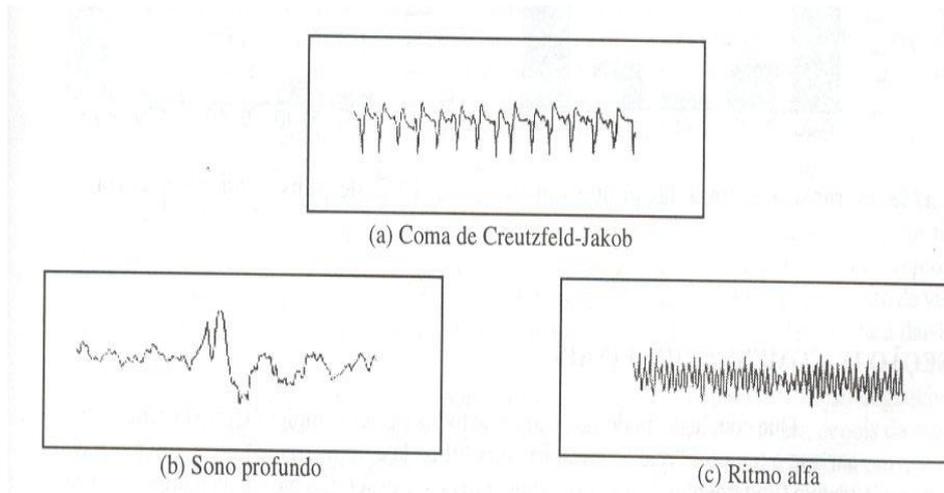


Figura 11 – Sinais elétricos temporais do cérebro.  
Fonte: Fried (1996, p. 37).

Outro exemplo muito curioso é a bifurcação “in vivo” que se pode observar na sociedade das formigas, as quais se comunicam entre si através de sinais químicos, caracterizando uma conduta que pode ser descrita por meio de equações muito semelhantes às da cinética química. Suponham-se duas pontes de tamanhos diferentes construídas entre o formigueiro e uma fonte de alimento. Inicialmente ambas as pontes serão ocupadas por igual contingente populacional, mas logo o predomínio de uma das pontes estará apontando para uma bifurcação. Valendo-se de um sistema de comunicação química bastante eficaz, as formigas são capazes de identificar o caminho mais curto e utilizá-lo preferencialmente (ver figura 12):

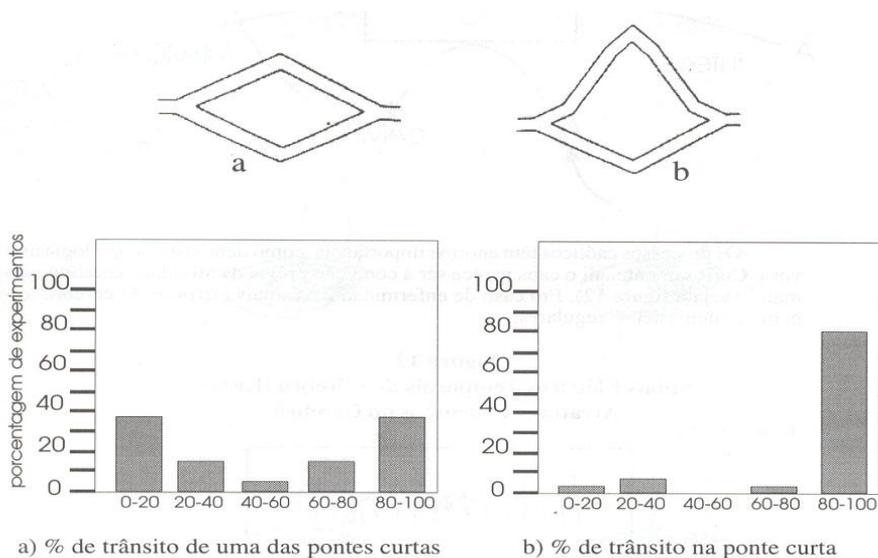


Figura 12 – Bifurcação nas sociedades de formigas.  
Fonte: Fried (1996, p. 38).

A que conclusões conduzem-nos a significativa sequência de exemplos que acaba de ser aqui apresentada? Ilya Prigogine, estudando tais casos, em conferência proferida por ocasião do Encontro Interdisciplinar Internacional realizado no começo dos anos 1990, em Buenos Aires, indica como principal emergência das situações apontadas o papel que a irreversibilidade cumpre na natureza. Para ele, já não se pode fazer ciência sem que se exponham, em nossas descrições, as raízes da irreversibilidade, pois, conforme assegura, o que marca a transição entre a “velha” e a “nova” ciência é a inclusão do elemento temporal, o qual, no nível macroscópico, desempenha um papel construtivo fundamental na natureza<sup>5</sup>.

### 2.2.2 A matemática da complexidade

As teorias e modelos de auto-organização introduzidas na ciência, a partir do século XX, passaram a exigir um novo conjunto de conceitos e técnicas adequado à abordagem da complexidade dos sistemas, do que até então a ciência não se havia ocupado. Designada como *teoria dos sistemas dinâmicos*, de que são ramos a teoria do caos e a teoria dos fractais, a nova matemática da complexidade é uma matemática de relações e padrões.

Até o final do século XIX, existiam duas ferramentas matemáticas para modelar os fenômenos naturais: as equações de movimento exatas, deterministas, para sistemas simples, e as equações estatísticas de quantidade médias, para sistemas complexos. Embora tais técnicas fossem sistematicamente diversas uma da outra, tinham em comum o fato de ambas exibirem equações lineares. Isto não quer dizer que situações de não-linearidade não fossem até então abordadas. O que acontecia, na verdade, era que, em quaisquer sistemas em cujas descrições aparecessem equações não-lineares, estas eram imediatamente “linearizadas”. Assim, as equações da ciência clássica, mesmo em situações de admitida complexidade, mantêm-se na esfera das *pequenas oscilações, ondas baixas, pequenas mudanças* de temperatura e assim por diante.

Na época de Galileu havia duas abordagens diferentes para resolver problemas matemáticos: a geometria e a álgebra, as quais foram unificadas por René Descartes, dando origem à geometria analítica. Depois, com a descoberta simultânea, por Leibniz e Newton, do cálculo diferencial e integral, deu-se um passo gigantesco, pois, pela primeira vez na história

---

<sup>5</sup> A irreversibilidade temporal como elemento distintivo da “metamorfose da ciência” será abordado de modo específico no capítulo seguinte.

humana, a concepção de infinito pode ser matematizada com perfeição. No século XVII, Isaac Newton usou esse cálculo para descrever todos os movimentos possíveis dos corpos sólidos em termos de um conjunto de equações diferenciais.

Nos séculos XVIII e XIX, as equações newtonianas do movimento foram modeladas em formas mais gerais, mais abstratas e mais elegantes, de modo a facultarem a análise de um número cada vez maior de fenômenos naturais, por Laplace, Euler, Lagrange e Hamilton. Também no século XIX, um trato estatístico foi dado às equações da termodinâmica para representarem quantidades médias nos primeiros sistemas complexos abordados. Mas, só muito recentemente desenvolveu-se a teoria dos sistemas dinâmicos, a matemática aplicável ao caos, erigida sobre fundamentos lançados, um século antes, por Henri Poincaré.

Poincaré utilizou, ainda no advento do século XIX, concepções topológicas para analisar as características qualitativas de complexos problemas dinâmicos e, ao fazê-lo, lançou os fundamentos da matemática da complexidade. As técnicas matemáticas que permitiram aos pesquisadores, nas três últimas décadas, descobrir padrões ordenados em sistemas caóticos são desdobramentos dessa abordagem topológica.

As variáveis de um sistema complexo são exibidas num espaço matemático abstrato chamado “espaço de fase”, técnica que foi desenvolvida na termodinâmica na virada dos séculos XIX-XX. As figuras 13, 14 e 15, a seguir, referem-se a um pêndulo simples no espaço de fase. No terceiro caso, em que há atrito, a configuração recebe o nome de “atrator”. Uma trajetória deste tipo é chamada de “atrator” pelos matemáticos porque, metaforicamente, o ponto fixo no centro das coordenadas “atrai” a trajetória.

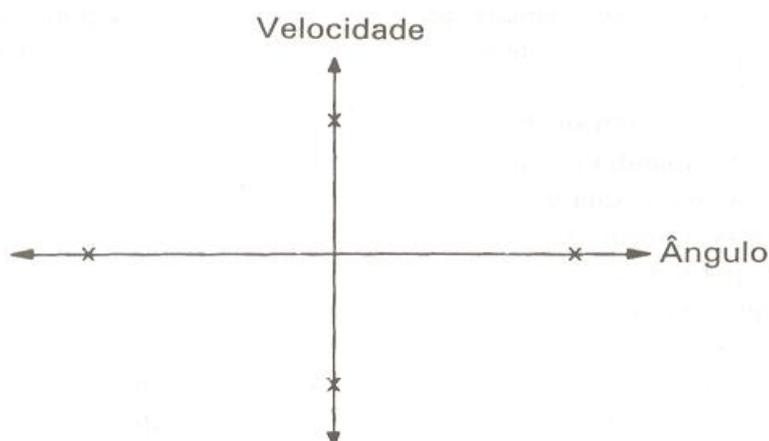


Figura 13 – O espaço de fase bidimensional de um pêndulo.

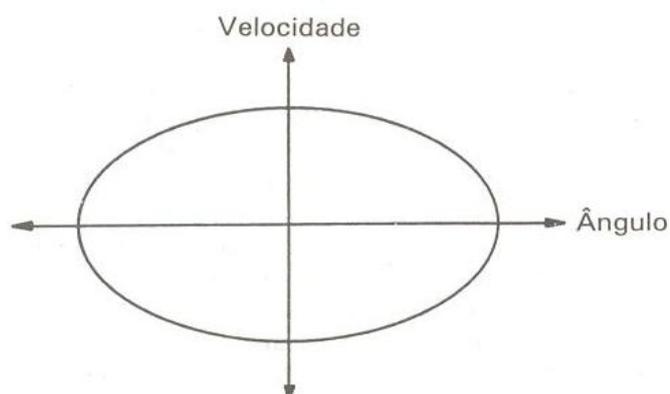


Figura 14 – Trajetória de um pêndulo no espaço de fase.

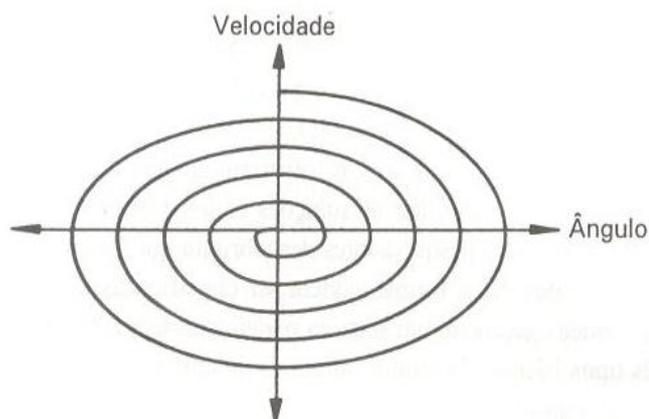


Figura 15 – Trajetória de um pêndulo com atrito no espaço de fase.

Há três tipos básicos de atratores: atratores puntiformes, correspondentes a sistemas que atingem um equilíbrio estável, atratores periódicos, correspondentes a oscilações periódicas e os chamados atratores estranhos, que correspondem a sistemas caóticos. Um exemplo típico de atrator estranho é o “pêndulo caótico” estudado pela primeira vez no final dos anos 60 pelo matemático japonês Yoshisake Ueda (figura 16). Trata-se de um atrator disposto em duas dimensões. Já o atrator estranho de Lorenz (figura 17) é tridimensional. Sua publicação em 1963 marcou o início da teoria do caos.



Figura 16 – O atrator de Ueda.  
Fonte: Ueda et al. (1993 apud PRIGOGINE, 1996, p. 105).

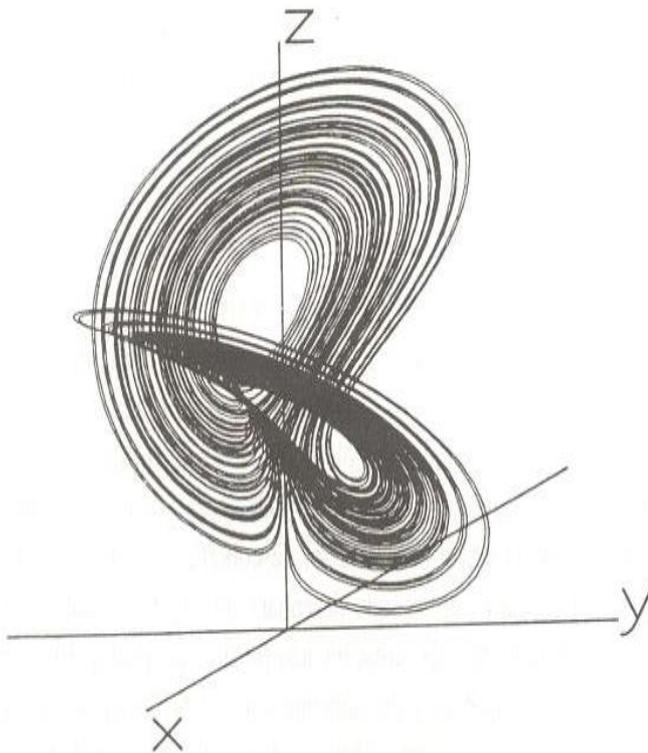


Figura 17a – O atrator de Lorenz.  
Fonte: Mosekilde et al. (1996 apud PRIGOGINE, 2002, p. 107).

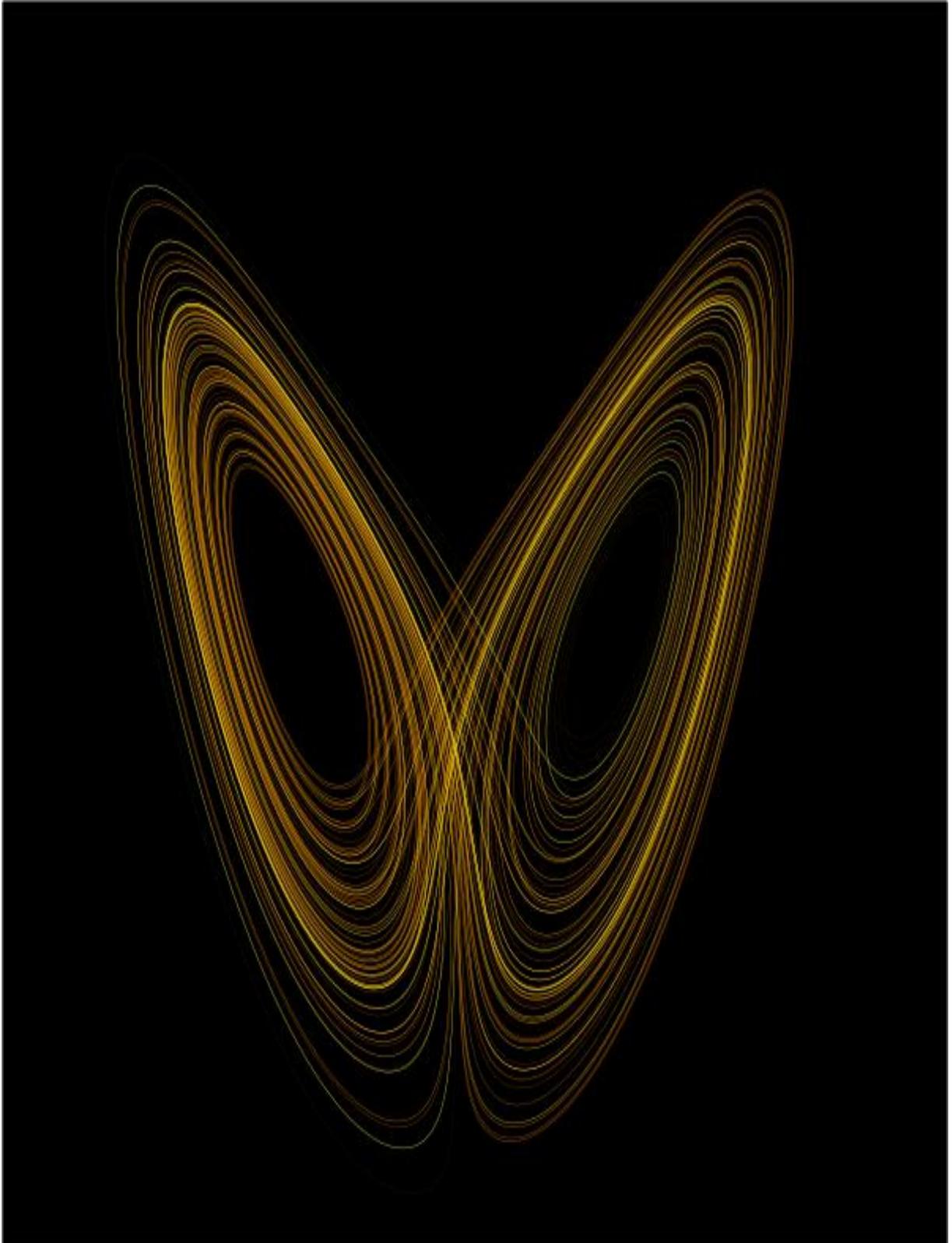


Figura 17b – O atrator de Lorenz.

Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:Lorenz\\_attractor\\_yb.svg](http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:Lorenz_attractor_yb.svg).

Enquanto os atratores estranhos estavam sendo estudados nas décadas de 60 e 70, surgiu, independentemente da teoria do caos, uma nova geometria, chamada de “geometria fractal”, que estuda padrões dentro de padrões. Na figura seguinte (18) vêem-se os chamados conjuntos de Júlia (estudados originalmente pelo matemático francês Gaston Júlia), os quais traduzem formas fractais, que correspondem a um armazém de padrões, de detalhes e variações infinitas.

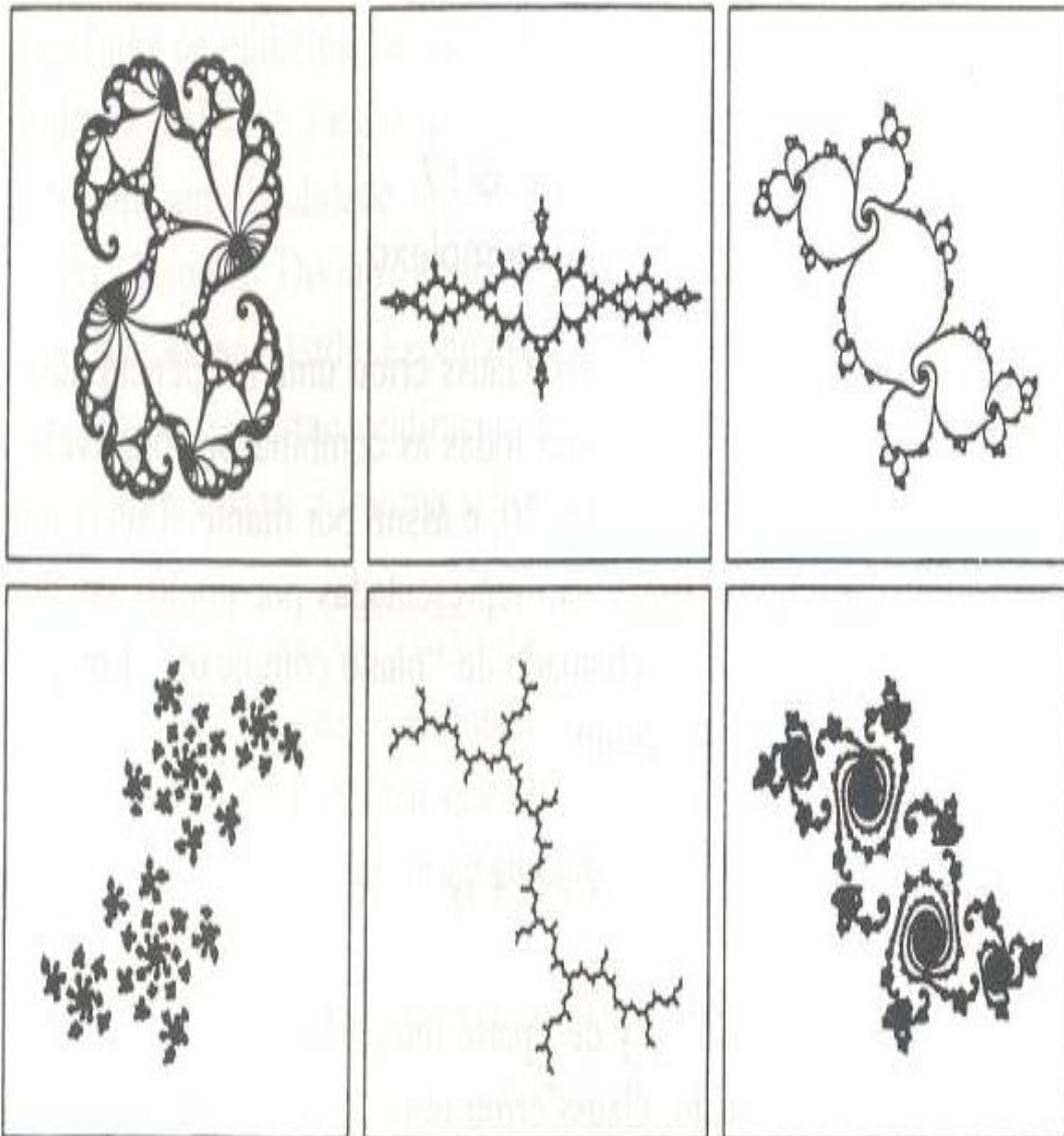


Figura 18a – Tipos diversos de “conjuntos de Júlia”.  
Fonte: Pertgen e Richter (1996 apud PRIGOGINE, 2020, p. 28).

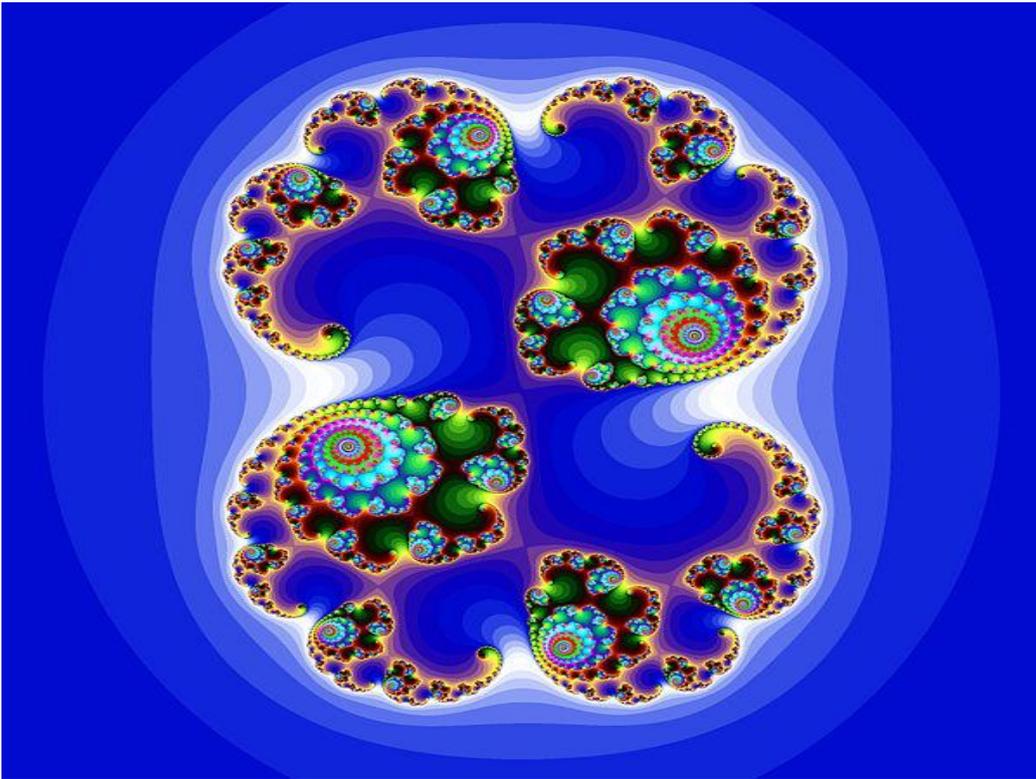


Figura 18b – Conjunto de Júlia.  
Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fractal>.



Figura 18b' – Conjunto de Júlia (recorte ampliado).  
Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fractal>

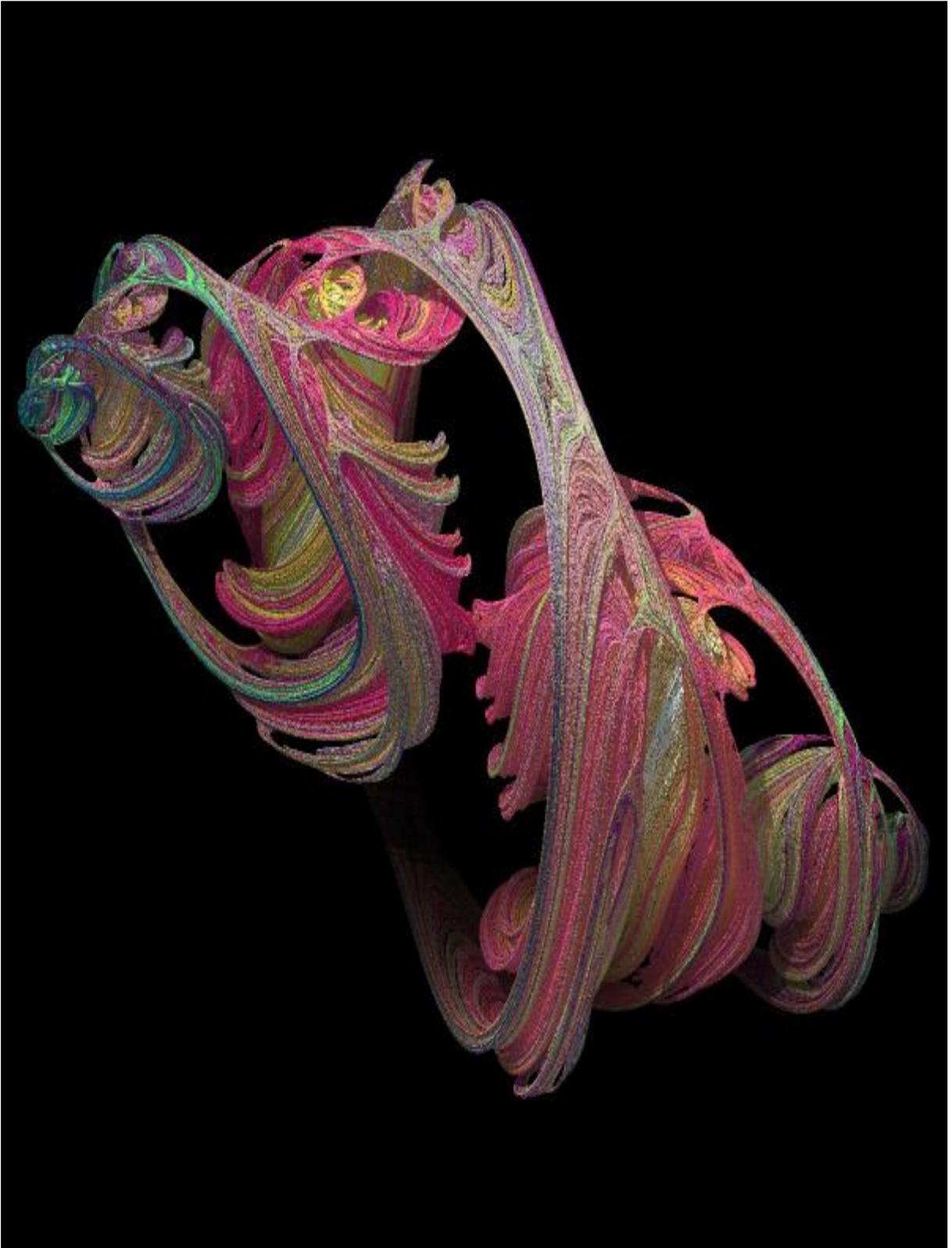


Figura 18c – Conjunto de Júlia.

Fonte: [http://pt.wikipedia.org/wiki/Conunto\\_de\\_Julia](http://pt.wikipedia.org/wiki/Conunto_de_Julia).

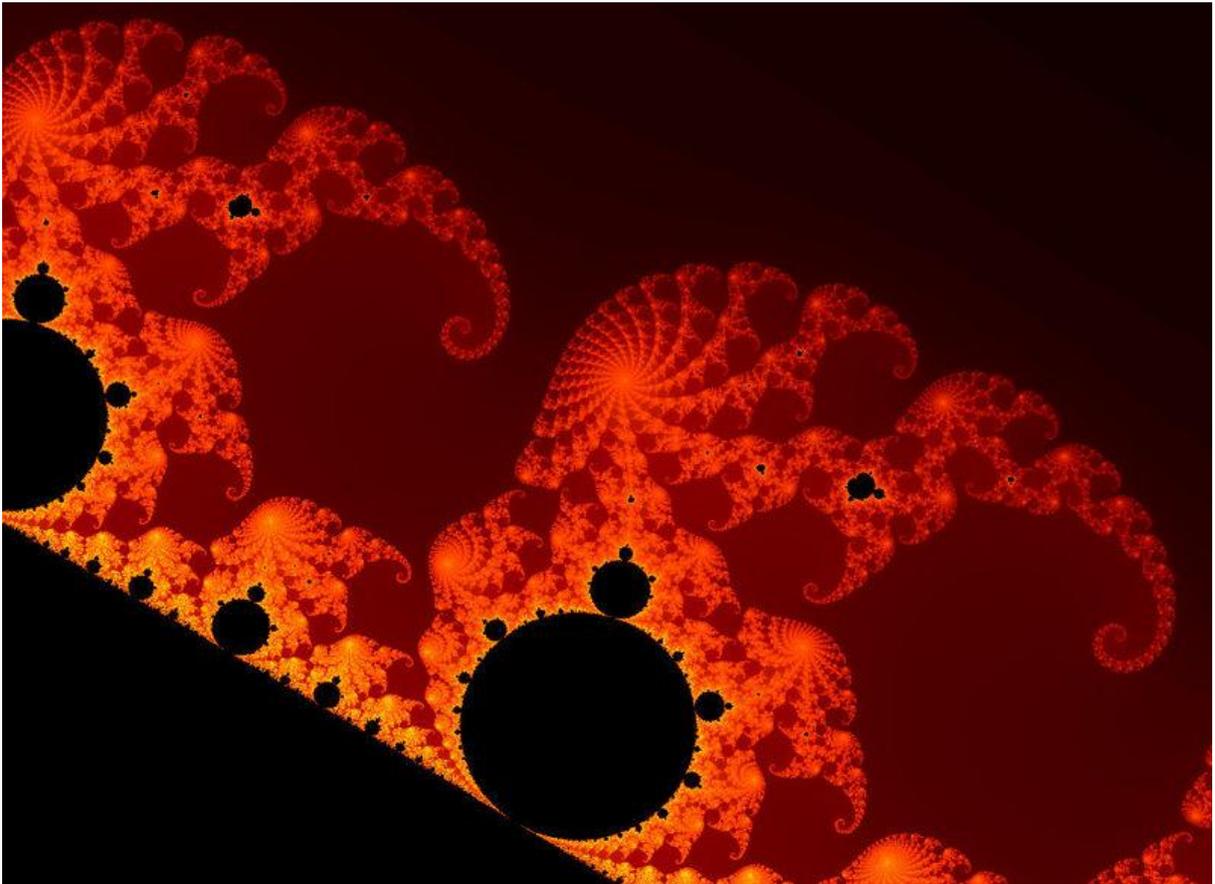


Figura 18d – Conjunto de Mandelbrot I.  
Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fractal>.

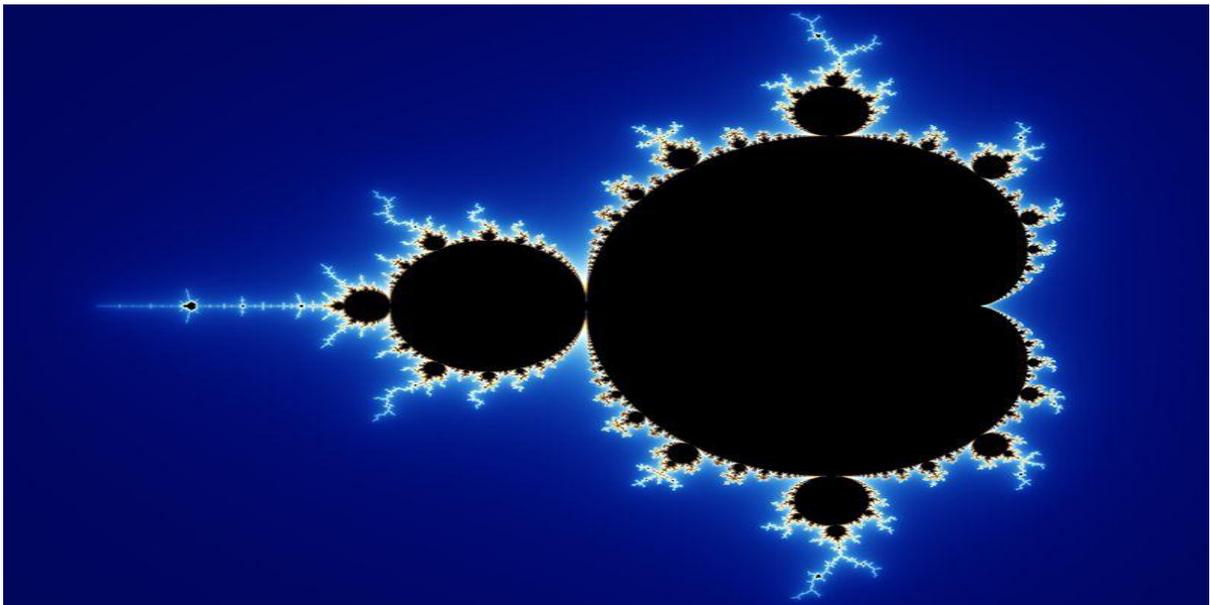


Figura 18e – Conjunto de Mandelbrot II.  
Fonte: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Fractal>.

Um aspecto particularmente importante da nova matemática da complexidade é que ela está levando mais e mais pesquisadores a perceberem que a matemática é muito mais que um aglomerado de formulações áridas, visto que a identificação de atratores e da bacia de atração de um sistema dinâmico é feita através de análises qualitativas, o que nem por isto implica menor rigor ou descaracteriza a matematicidade do procedimento.

### 2.3 A NOVIDADE EPISTÊMICA DA TERMODINÂMICA

Do ponto de vista de uma nova *episteme*, a obra de Prigogine, centrada no caos e na complexidade, cujas raízes remontam ao problema da perda de calor nos primeiros motores a combustão, atribui à termodinâmica um papel proeminente nas grandes transformações que puseram fim à idade clássica. Pode-se resumir a novidade introduzida pela termodinâmica em dois ítems abrangentes, que extrapolam as situações adiabáticas ideais (sem qualquer troca de calor com o meio): em primeiro lugar, sistemas agora abordados em circunstâncias bem reais, frente à demanda efetiva de produção de trabalho, adquirem necessariamente um entorno, com o qual interagem; e, segundo, diante das perdas irreversíveis (de calor) para o meio, os sistemas são crivados por um traço de irreversibilidade capaz de lhes conferir uma história, situação inconcebível no universo newtoniano, em que, por um lado, o tempo é absoluto e, por outro, as interações dentro do próprio sistema são reduzidas a uma norma, incapazes de incorporar a historicidade como um atributo. Estes dois aspectos dizem respeito à *estabilidade afastada do equilíbrio*, situação pertinente ao mundo das estruturas dissipativas, e à *irreversibilidade temporal*, temáticas centrais da obra de Prigogine, que dão título a esta dissertação e que serão abordadas, no próximo capítulo, sob a ótica investigativa da nova *idéia de natureza* a elas subjacentes.

## CAPÍTULO 3

### **ILYA PRIGOGINE E A CONTEMPORANEIDADE**

Quando Ilya Prigogine começou a trabalhar com as *estruturas dissipativas*, desde logo percebendo seu importante papel na natureza, tratou de procurar vinculá-las às leis fundamentais. Não o conseguindo, foi obrigado a repensar os grandes princípios da física clássica. Os fenômenos nos quais tais estruturas aparecem não se explicam com base em partículas individuais, mas através de conjuntos de partículas sujeitos a flutuações que caracterizam o mundo do não-equilíbrio.

Uma primeira questão suscitada a partir do estudo das estruturas dissipativas é a nova relação que se estabelece entre a ordem e a desordem. A tendência atual é um reconhecimento crescente do papel construtivo da desordem, a partir do estudo de sistemas não-lineares e de fenômenos de auto-organização. Tradicionalmente vistas como realidades opostas, sabe-se hoje que ordem e desordem podem produzir-se uma a outra e esta novidade está no cerne da concepção do caos. Amplamente capaz de modificar a formulação que fazemos das leis da natureza, que correspondem ao arcabouço da ciência ocidental, cuja característica mais intrínseca é o determinismo, o caos desbanca os pressupostos clássicos segundo os quais, uma vez conhecidas as condições iniciais, pode-se localizar, com certeza infalível, uma partícula em sua trajetória, qualquer que seja o tempo, passado ou futuro.

A idéia de um mundo sujeito a leis deterministas é atribuída por alguns historiadores da ciência, como é o caso de Robert Lenoble, ao surgimento do Deus cristão, concebido como um legislador onipotente, e embora ela tenha se estabelecido a partir da ciência galilaico-newtoniana, seu surgimento teria sido gradual, vindo a se constituir num dos elementos fundamentais do solo epistêmico da ciência clássica. Prigogine elege como o aspecto mais importante da redução da natureza a leis deterministas a eliminação da seta do tempo. Apesar de a distinção entre passado e futuro constituir um elemento essencial ao cotidiano da existência humana, ela não integra o escopo da ciência moderna.

### 3.1 ESTABILIDADE AFASTADA DO EQUILÍBRIO: EMERGÊNCIA DE NOVOS ESTADOS EM SISTEMAS CAÓTICOS

Quando se fala em estabilidade afastada ou além do equilíbrio, em termodinâmica, a referência são as *estruturas dissipativas* de Ilya Prigogine. Estas se contrapõem à estabilidade proposta pela ciência clássica, via do equilíbrio, pressuposto essencial à abordagem da natureza no modelo newtoniano-cartesiano, cuja *episteme* se assenta sobre ideais de exauriência e de certeza. A expressão *estabilidade afastada do equilíbrio*, que é central para este trabalho, refere-se aos novos *estados* da matéria passíveis de emergirem em situações distanciadas do equilíbrio. A descoberta de que o caos pode produzir a ordem, em sistemas auto-organizantes, implica a introdução, no corpo da ciência, dos conceitos de probabilidade e irreversibilidade. Enquanto esta última admite a ocorrência de eventos não redutíveis a leis, a primeira passa a ser entendida como constitutiva destes mesmos eventos e não mais como mero recurso formal para abordagem de incertezas metodológicas.

As estruturas dissipativas são criadas e mantidas a partir da troca de energia de um sistema dado com o exterior, e esta é precisamente a razão de se chamarem *dissipativas*. Em certas condições críticas de estrangimentos externos, as ínfimas flutuações naturais e constantes de um sistema acabam por arrastá-lo numa outra direção. Esta idéia de uma entropia construtiva longe do equilíbrio aponta para um desvio e evidencia uma ruptura em relação à termodinâmica clássica, pois quanto mais um sistema se afasta do equilíbrio, maior a tendência que ele apresenta de engendrar efeitos inéditos e imprevisíveis, mensuráveis como uma nova ordem, longe da prisão do sistema clássico, este fechado e desprovido de dinamismo histórico.

### 3.2 O TEMPO IRREVERSÍVEL COMO CATEGORIA CONSTITUTIVA DOS EVENTOS

Foi estudando manifestações de coerência e auto-organização em sistemas distanciados do equilíbrio que Prigogine chegou à conclusão de que o conceito de irreversibilidade temporal implica diretamente uma reconceitualização profunda da ciência, a que se tem assistido a partir do início do século passado, no mesmo patamar que o

reconhecimento da indeterminação, características estas que passam a figurar como constitutivas dos fenômenos naturais.

O tempo, do modo como o incorporam as leis fundamentais da física, é em qualquer hipótese reversível. Isto significa que, por ser aí entendido como uma grandeza absoluta, a todos os eventos afetaria da mesma maneira, o que seria o mesmo que a nenhum deles afetar. Assim, para os sistemas newtonianos, há completa equivalência entre passado e futuro, simetria temporal que embasa a visão determinista do cosmos associada a visão newtoniana-cartesiana. O surgimento e desenvolvimento da física do não-equilíbrio e da dinâmica dos sistemas instáveis, que introduziram em ciência a noção de caos, obrigam-nos a repensar o tempo que, sem dúvida, já não é o mesmo da formulação galilaica.

Na física do não-equilíbrio, que estuda processos dissipativos, o tempo é caracterizado pela sua unidirecionalidade. É certo que fenômenos como difusão, atrito e viscosidade sempre estiveram associados a uma “flecha do tempo”; mas, por constituírem casos mais simples, puderam ser tratados nos limites da dinâmica convencional, o que não ocorre com fenômenos mais complexos, como turbilhões, oscilações químicas ou radiação laser, onde a “flecha do tempo” não pode deixar de ser vista, desde logo, como constitutiva de cada um destes fenômenos.

Antes do advento da complexidade, a irreversibilidade era percebida como decorrência direta do nosso conhecimento imperfeito em torno do sistema abordado. Sabe-se hoje que ela é condição essencial ao comportamento coerente de populações de bilhões e bilhões de moléculas. Isto equivale a dizer que hoje, ao contrário do que ocorria nos quadros da ciência newtoniana, somos compelidos a reconhecer o papel primordial das flutuações e da instabilidade, as quais atribuem um novo significado às leis da natureza, que passam a exprimir possibilidades em lugar de certezas, de maneira que o tempo repetitivo da mecânica não nos pode dar conta da riqueza do mundo tal qual o conhecemos. De igual modo, o tempo associado à degradação da termodinâmica clássica revela-nos um universo drasticamente simplificado. “Não há dúvida de que o universo, que está altamente organizado, deve ter um mecanismo de organização. Se há mecanismos de destruição das estruturas, deve haver também mecanismos de construção” (SPIRE, 2000, p. 19).

A questão do tempo e sua relação com o determinismo não se restringe ao domínio da ciência. Ela integra o pensamento ocidental desde as suas origens, quando já os pré-socráticos questionavam-se sobre o funcionamento do universo e o papel desempenhado pelo tempo em suas regularidades. Para Epicuro, sucessor de Demócrito, o mundo era constituído por átomos

que caíam com velocidade constante, seguindo trajetórias paralelas. De que maneira, então, colidiriam? Como poderiam se combinar para produzir o novo? Para solucionar esse problema, que ficou conhecido como o “dilema de Epicuro”, uma hipótese arbitrária foi levantada por Epicuro: ele idealizou o *clinamen*, um elemento imprevisível e sutil, que seria o responsável pela perturbação dos sistemas. Curiosamente, nos dias atuais, a descrição da natureza tem mais a ver, segundo Prigogine, com o mundo imaginado pelos atomistas gregos - flutuante, ruidoso e caótico - do que com a descrição regular e simétrica, tradicionalmente associada ao mundo newtoniano. O *clinamen*, introduzido por Epicuro para solução do seu dilema, é hoje reconhecido como uma tentativa compreensível de expressar a estabilidade dinâmica, a qual, por sua vez, dá significado à entropia, corrobora a rota da evolução.

Todo o trabalho de Prigogine e de seus colaboradores tem por meta principal demonstrar que a *seta do tempo* cria estruturas e que há uma teleologia nos processos aleatórios, da qual o tempo é elemento fundamental. Os fenômenos irreversíveis têm para estes teóricos uma importantíssima função construtiva, de tal modo que, no nível microscópico, pode-se proceder a uma descrição do universo por meio de sistemas dinâmicos instáveis. No nível macroscópico, equivale ao surgimento simultâneo da ordem e da desordem como modos de expressão de um sistema universal auto-regulado, cujas possíveis representações conceituais extrapolam de muito os limites paradigmáticos da ciência newtoniana e introduzem na ciência contemporânea a noção de complexidade.

Já na década de 1940, Prigogine propusera que o aumento da entropia, descrito pela segunda lei da termodinâmica, não significaria necessariamente implemento da desordem, pois para determinados sistemas químicos, sujeitos a contínua agitação, com os quais tratava em seu laboratório, a deriva entrópica gerava novos padrões e estados inesperados que denunciavam a irreversibilidade temporal, até então considerada pelos físicos como uma simples ilusão decorrente dos limites da observação.

Prigogine foi um entusiasta do estudo do tempo e se pode afirmar que este é seu tema central, em razão do que buscou incluir padrões evolutivos em suas descrições, acreditando serem estes construtos capazes de inovar as práticas científicas e suas implicações. Enfatizou a impossibilidade de sermos partes de um mecanismo autômato e ao mesmo tempo acreditarmos na vida. Não seria o caso de se supor que o progresso no estudo das reações químicas distanciadas do equilíbrio possa nos esclarecer sobre organismos vivos ou mesmo padrões sociais; mas importa compreender os elementos unificadores que a ciência da complexidade e os sistemas caóticos introduzem no escopo do saber humano em geral: a

bifurcação, a dimensão histórica e a idéia genérica de padrões evolutivos. Com isto, a obra prigoginiana, que aponta para o “fim das certezas”, propõe-se a desvelar a possibilidade de uma releitura da natureza, não mais entendida como pura idéia, mas como o sujeito de um diálogo metarracional, perspectiva a que ele e sua colaboradora Stengers chamam “o reencantamento da natureza”.

### 3.3 O REENCANTAMENTO DA NATUREZA

A natureza na modernidade é um construto, uma instância pensada, diferente de uma *natureza em si*. Por esta razão, a natureza que existe a despeito das nossas formulações e que é objeto da ciência empírica, faz-se necessariamente estranha ao homem, na mesma medida em que ele pretende dela ser senhor. Sabendo-se hoje, que as estrelas explodem, as galáxias nascem e morrem e que não se pode garantir, sequer, a estabilidade do movimento planetário, os processos naturais voltam a ser centro de interesse por si mesmos e é a isto que Prigogine se refere como o “reencantamento da natureza”.

Para Prigogine, as ciências agora estão no mundo, um mundo que evolui e surpreende, povoado por seres e instâncias que extrapolam às suas formulações, que não se deixam mais capturar. Sujeito a flutuações e bifurcações, os seres nascem e morrem, e, no interregno, emergem do nivelamento com suas singularidades. É a natureza bifurcante, sujeita a flutuações caóticas em que pequenas alterações, mínimas diferenças, em presença de circunstâncias oportunas, podem invadir todo um sistema e engendrar para o todo um novo regime de funcionamento.

Descobre o homem de ciência contemporâneo que a natureza não se deixa e nunca se deixou subjugar impunemente e não se importa o mínimo com as nossas vãs teorias. É um ser colossal e histórico que, ferido, talvez dormitasse, mas, agora, já se ergue para continuar a ser o que sempre foi: não só fonte de inspiração, mas condição *sine qua non* da presença do humano no mundo, cuja nova representação inclui entidades em interação, que refletem em qualquer momento o estado geral do sistema. Para Prigogine, com grande beleza e alento poético, esta natureza reencantada se oferece unicamente à ciência que se proponha a contemplar e descrever o nascimento, a proliferação e a morte dos seres naturais, entre os quais o próprio homem, reentranhado no mundo, religado à aurora, ao céu, às coisas.

Comentando Whitehead, cuja filosofia da natureza ratifica, Prigogine define uma cosmologia como filosófica, justamente na medida do seu alcance universal:

Enquanto cada teoria científica seleciona e abstrai na complexidade do mundo um conjunto particular de relações, a filosofia, por sua vez não pode privilegiar nenhuma região da experiência humana, mas deve construir, por uma experimentação da imaginação, uma coerência que dê lugar a todas as dimensões dessa experiência, dependam elas da física, da fisiologia, da psicologia, da biologia, da ética, da estética, etc. (PRIGOGINE & STENGERS, 1991, p.77)

Sob o escopo desta cosmologia filosófica, Prigogine acusa as comunidades científicas de insistirem no enquadramento da natureza em seus arcabouços teóricos preestabelecidos, esperando dela respostas que se expressem na linguagem que suas regras paradigmáticas lhe pretendem impor. Mas a natureza não se deixa apreender, surpreende sempre, desvencilha-se das malhas teóricas, *reencanta-se*. E, segundo ele, a ciência do caos tem a oferecer à filosofia novas matrizes conceituais, pois

assistimos ao surgimento de uma ciência que não mais se limita a situações simplificadas, idealizadas, mas nos põe diante da complexidade do mundo real, uma ciência que permite que se viva a criatividade humana como a expressão singular de um traço fundamental comum a todos os níveis da natureza. (PRIGOGINE, 1996, p. 14)

Em um documento dirigido às gerações futuras<sup>6</sup>, Prigogine aborda grandes questões de política internacional e faz exortação pela paz, uma paz a ser construída, pois o futuro não é dado, conforme demonstram as recentes ciências da complexidade, que negam o determinismo e insistem na criatividade em todos os níveis da natureza. Evoca as ciências da complexidade como fontes de metáforas úteis à construção de outros saberes: um evento é a aparição de uma nova estrutura social, depois de uma bifurcação, e tem uma “microestrutura”; flutuações são resultado de ações individuais. Do seu ponto de vista, a história é uma sucessão de bifurcações e, como toda bifurcação, tem beneficiários e vítimas.

De um modo geral, as bifurcações são a um só tempo um sinal de instabilidade e um sinal de vitalidade em uma dada sociedade. O homem abre novas perspectivas, explora novas possibilidades, constrói utopias na busca de relações mais harmoniosas dos homens entre si e do homem com a natureza. E a que ponto teremos chegado neste principiar do Século XXI? Prigogine diz-se convencido de que estamos nos aproximando de uma bifurcação conectada ao progresso da tecnologia da informação e a tudo que a ela se associa, como a multimídia,

<sup>6</sup> Carta para as futuras gerações. Disponível em: <<http://hps.infolink.com.br/peco/p000130a.htm>>.

robótica e inteligência artificial. Seria uma sociedade de redes com seus problemas e sonhos de aldeia global. E qual será o resultado dessa bifurcação? Para qual dos seus ramos nos encaminharemos? Ante o fantasma da globalização, Prigogine (1996, p. 14) busca na natureza um modelo instrutivo:

Cerca de 12 mil espécies de formigas são conhecidas hoje. Suas colônias variam de algumas centenas a muitos milhões de indivíduos. É interessante notar que o comportamento das formigas depende do tamanho da colônia. Em colônias pequenas, a formiga se comporta de forma individualista, procurando comida e a levando de volta ao ninho. Quando a colônia é grande, porém, a situação muda e a coordenação de atividades se torna essencial. Estruturas coletivas surgem espontaneamente, então, como resultado de reações auto-catalíticas entre formigas que produzem trocas de informações medidas quimicamente. O crescimento populacional transfere a iniciativa do indivíduo para a coletividade.

A mensagem otimista de Prigogine às gerações futuras baseia-se no potencial humano de escolha de rumos durante as bifurcações que sucedem os períodos de flutuação, nos quais as ações individuais, talvez de modo diverso do que ocorre com as formigas, não importa quão massificado o sistema, retomam suas potencialidades transformadoras e suas características essenciais. Para ele, estaríamos apenas no começo, em ciência, embora, paradoxalmente, isto coincida com o “fim das certezas”.

Estaríamos nos distanciando do tempo em que se acreditava que o universo pudesse ser descrito em termos de umas poucas leis fundamentais. Temos nos deparado com o complexo e o irreversível, não só no domínio microscópico, que diz respeito ao mundo das partículas elementares, mas também no macroscópico que nos cerca, e no universo gigantesco da astrofísica. Uma nova síntese está a cargo das novas gerações, por meio de uma ciência nova que está nascendo, que abrace o desafio de conciliar a globalização e a preservação do pluralismo cultural, a violência crescente e a ética, a cultura da guerra e a razão, além de reaver o contato com outros atributos relegados da nossa humanidade intrínseca, que anseiam pela paz.

### 3.4 HISTORICIDADE E VIZINHANÇA EM SISTEMAS COMPLEXOS

A termodinâmica, com o enunciado da sua segunda lei, que introduz o conceito de entropia, incorpora a idéia de evolução à física e se afasta da concepção vigente do universo

como um sistema fechado. Prigogine veio a demonstrar, com os estudos em torno das estruturas dissipativas, que lhe valeram o Prêmio Nobel de Química em 1977, o papel construtivo das situações de desequilíbrio, em que a produção de entropia tem um duplo papel, correspondendo à criação simultânea da ordem e da desordem. É uma atitude recorrente em todo o seu trabalho científico, e também na vertente filosófica que constrói em parceria com Isabelle Stengers, a proposta por uma revisão na noção de lei da natureza e, por fim, no próprio conceito de natureza. É de fundamental importância, neste terreno, a assertiva de que a maioria dos sistemas dinâmicos são instáveis e sujeitos a flutuações, ainda que não tenham sido, a qualquer título, objeto de abordagem na dinâmica clássica.

No universo que a dinâmica clássica descreve, todas as transformações são redutíveis ao movimento da matéria no espaço, descrito em termos de trajetórias reversíveis, em que o futuro e o passado não desempenham qualquer papel. Esta característica, segundo Prigogine, seria uma das responsáveis pelo descompasso que se estabeleceu entre as duas culturas no ocidente: a científica e a humanística. A dinâmica dos sistemas instáveis, que não pode prescindir da noção fundamental de evolução, assume o perfil de um saber capaz de ultrapassar o conflito tradicional entre estas duas culturas. Somos, então, forçados a abandonar a idéia newtoniana de que uma teoria científica deveria ser universal, fechada, determinista, objetiva ao ponto de não reservar qualquer lugar para o observador e, sobretudo, seria tanto mais perfeita quanto mais próxima de um nível fundamental, que escapasse aos efeitos do tempo.

Todos os trabalhos relacionados com a termodinâmica, com a complexidade e o estudo de sistemas não-lineares em geral, associam a existência de entropia à irreversibilidade das evoluções temporais dos sistemas, ou seja, um processo é irreversível quando a entropia do sistema aumenta, enquanto a reversibilidade é característica dos sistemas com entropia constante. A segunda lei da termodinâmica se traduz por degradação entrópica de energia, o que significa a passagem de um sistema estruturado para um estágio de desorganização crescente. A entropia cresce na medida em que crescem a quantidade de trajetórias possíveis e a complexidade geral do sistema, de modo que a sua desordem é proporcional à quantidade de estados diferentes ou microestados. Enfim, a entropia está diretamente ligada ao número de interações possíveis nos seios de cada sistema, de modo a produzir um determinado macroestado. Entretanto, a segunda lei da termodinâmica só tem a conotação de degradação constante e aumento de desordem se os sistemas envolvidos são fechados, como na mecânica clássica.

Para os sistemas complexos, que são abertos, a interpretação é de que a entropia corrobora a autorregulação e, sujeitos a flutuações, os sistemas podem conhecer novos estados (macroestados), imprevisíveis, para cuja emergência corroboram as interações dentro do próprio sistema e as que ele mantém com sua vizinhança. Das interações internas, via de regra ignoradas na dinâmica clássica, resulta que os sistemas são agora dotados de uma historicidade; e do fato de que interagem com sua vizinhança decorre sua adequação a um sistema maior, que o engloba e ao seu entorno, permitindo-lhe incorporar as inovações advindas destas trocas e assim realimentar sua própria história.

Dentre todas estas perspectivas abertas pela termodinâmica, que dão à entropia um papel construtivo, Prigogine se apega de modo especial à historicidade dos eventos, neste sentido bastante específico de que serem inexoravelmente marcados pela *flecha do tempo*. Sempre foi uma imensa incógnita, para Prigogine, o fato de a ciência tradicional haver podido se articular, de forma tão poderosa e hegemônica, ignorando a distinção entre passado e futuro, os quais na maioria dos fenômenos que observamos desempenham papéis totalmente diferentes. A distinção entre interações persistentes e transitórias passa a ter uma importância fundamental na passagem da dinâmica reversível das trajetórias newtonianas às flutuações da termodinâmica. A grande diferença é que a mecânica clássica sempre considerou movimentos isolados, enquanto a irreversibilidade só encontra seu sentido quando consideramos os sistemas imersos em um meio de interações persistentes, que é como, de fato, ocorrem os eventos na natureza.

A ciência é um diálogo com a natureza. As peripécias desse diálogo foram imprevisíveis. Quem teria imaginado no início do século a existência das partículas instáveis, de um universo em expansão, de fenômenos associados à auto-organização e às estruturas dissipativas? Mas como é possível um tal diálogo? Um mundo simétrico em relação ao tempo seria um mundo incognoscível. [...] Mas o conhecimento não pressupõe apenas um vínculo entre o que conhece e o que é conhecido, ele exige que esse vínculo crie uma diferença entre passado e futuro. A realidade do devir é a condição *sine qua non* de nosso diálogo com a natureza. (PRIGOGINE, 1996, p. 157)

A historicidade que se atribui a um sistema, a partir da abordagem complexa, decorre do fato de que as interações entre os seus elementos constitutivos são consideradas agora do ponto de vista da flecha ou *seta do tempo*. Isto significa que as interações internas passam a ser vistas como fatores efetivamente modificadores da capacidade que um sistema tem de interagir com o seu entorno, desvelando, assim, um processo complexo e recursivo. Ora, para que tal recursividade se dê a perceber e a considerar, é necessário, em princípio, que a todo

sistema seja admitido um entorno, uma vizinhança. Esta situação, porém, é incabível num trato estritamente newtoniano, em que os sistemas são fechados e as variáveis que não caibam nas elegantes formulações matemáticas são simplesmente ignoradas, e mesmo as que caibam, são tratadas no campo das aproximações linearizantes. Mas o principal fator a atribuir historicidade a um sistema, do ponto de vista estrito do caos, é o fato de que ele flutua e está sujeito a bifurcações probabilísticas.

Prigogine é categórico ao afirmar que “é a existência de bifurcações que confere um caráter histórico à evolução de um sistema” (SPIRE, 2000, p. 136). Portanto, um sistema com história e vizinhança é um sistema dotado de pertinência em relação à totalidade em que se insere, desempenhando também quanto a esta totalidade um papel enquanto agente de auto-organização e fonte de criatividade, seja no micro como no macrocosmos. Tal situação, quando exposta ao trato filosófico, não é trivial, pois se trata de lidar com a antinomia decorrente de que os processos dominantes na natureza, desde que atravessados pela *seta do tempo*, são irreversíveis; mas são, ao mesmo tempo, recursivos.

### 3.5 ILYA PRIGOGINE E A CONTEMPORANEIDADE

Na esfera das ciências duras, a obra de Prigogine não é aceita sem reservas. Um certo número de físicos contesta veementemente o seu trabalho. Ora questionam suas teorias acerca das estruturas dissipativas, por se tratar de domínio muito específico, ora censuram a generalização que praticou a partir de suas próprias descobertas, denunciando nisto alguma vulgarização. De outra parte, manifestações científicas baseadas em conceitos emergentes, a partir da ruptura paradigmática a que se tem referido no curso deste trabalho, tomam por base o papel construtivo da desordem, da auto-organização e da não-linearidade, de modo que a obra de Prigogine assume uma posição significativa no momento em que a ciência passa a lidar com perplexidades que a obrigam a reencontrar um lugar para o sujeito em suas práticas, repensar o tempo como categoria constitutiva no mundo e reconhecer a importância dos processos interativos.

Do ponto de vista epistemológico, no terreno em que os saberes são construídos, trata-se de erigirmos para a descrição da natureza uma nova estrutura, da qual também fazemos

parte, pois, como afirma Georges Canguilhem<sup>7</sup>, o estudo da *epistème* pressupõe uma consciência crítica dos métodos atuais de um saber, no sentido de examinar sua adequação ao objeto que lhe é próprio. Segundo este renomado teórico francês, cabe à epistemologia valorar a atividade científica, esclarecendo seus critérios de progressividade e de degenerescência, conforme o espírito de cada época.

Sabemos que a epistemologia cartesiana é toda ela apoiada na referência a idéias simples que se justapõem linearmente; porém, como visto no estudo da termodinâmica não-linear, não se pode mais considerar, no modelo de conhecimento vigente, qualquer evento ou sistema como originariamente *simples*, exceto se quisermos nos contentar com meras *simplificações*. Na obra em que analisa as fontes de ruptura da epistemologia cartesiana, *O Novo Espírito Científico*, Gaston Bachelard chama-nos a atenção para as simplificações das abordagens nos sistemas newtonianos. Embora o acento dominante da sua análise recaia sobre as novidades introduzidas pela relatividade e pela mecânica quântica e sua abordagem se restrinja, quanto à termodinâmica, ao campo da linearidade - que é justamente onde ela nada ou quase nada inova - seu trato é esclarecedor:

Podemos então perguntar-nos se a epistemologia cartesiana, toda ela apoiada na referência a idéias simples, pode bastar para caracterizar o pensamento científico atual. Veremos que o espírito de síntese que anima a ciência moderna tem, ao mesmo tempo, toda uma profundidade e liberdade diferente da *composição* cartesiana. (BACHELARD, 1996, p. 19).

Mesmo não contemplando diretamente a termodinâmica não-linear, Bachelard evoca a questão da mudança do ponto de vista da racionalidade, que é efetivamente o que importa, se o que queremos é entrever uma *episteme*. Para ele, os sábios do século XIX, do mesmo modo que Descartes, tinham por inabaláveis as bases racionais do mecanicismo, o que os conduziu à elaboração de conceitos como entidades fechadas. Numa nova epistemologia, condizente com as drásticas mudanças da ciência contemporânea, o corpo de explicação é um universo teórico necessariamente aberto. Isto pressupõe uma outra forma de racionalidade, intercambiável com certo nível de imprevisibilidade dos fatos e flutuações capazes de redirecioná-los ou recriá-los, o que nos remete à idéia de um universo essencialmente criativo, como defendido por Whitehead.

Robert Lenoble, filósofo e historiador da ciência afirma que a investigação sobre as ciências não pode estar separada da reflexão filosófica e ele, em particular, abordou a história

---

<sup>7</sup> CANGUILHEM, G. *Études d'histoire et de philosophie des sciences*. Paris: Vrin, 1968.

das ciências na condição de filósofo. Em um dos seus importantes trabalhos, em que estuda a história das idéias de natureza (LENOBLE, 1990), este pensador afirma, referindo-se à *idéia de natureza* como um artefato mecânico:

Mas esta Natureza sem drama e sem vida profunda não poderia bastar ao homem, incluindo o do século XVIII. Mesmo mecanizada, continua a reafirmar, pela palavra que a designa, o velho tema do nascimento: *natura, nasci*. Este tema, tal como o verbo *nasci*, já o sabemos, inspirou ao mesmo tempo que uma *Natura* cósmica, a solidariedade das gerações no interior da *Natio* [...], Natureza que, em cada época, tomava as suas características originais, pois que a associação da Natureza e do Homem se mantém indissolúvel e o homem de uma época canta-se a si mesmo na Natureza que constrói. (LENOBLE, 1990, p. 290)

Prigogine coloca esta questão como uma aliança que fora rompida pelo homem no decurso de seu aprimoramento técnico, e propõe que uma *nova aliança* se estabeleça, de algum modo a velha aliança restaurada, via de uma renovação consciente do seu diálogo com a natureza. Já ao fim da sua vida, no ocaso de sua produção, Prigogine chega a levantar o problema de um pertencimento, uma nova ordem de pertencimento do homem em relação ao mundo. Esta nova ordem corresponderia a um modelo de racionalidade baseado não mais nas certezas, mas nas possibilidades, no qual a verdade científica não é o certo ou o determinado e o indeterminado ou incerto já não se confunde com a ignorância, porque, segundo ele, “*há liberdade na natureza que descrevemos, a qual permite por sua vez a liberdade interior que experimentamos*” (PRIGOGINE, 2002, p. 12).

Bachelard, ao contrário, não pensa em termos de uma mudança gradual, de práticas e conceitos, que possa vir a restaurar uma aliança entre homem e natureza, recompor o estado anterior da relação sujeito-objeto. Antes, Bachelard entende que existe um negativo e um positivo na história do pensamento científico. O positivo são os atos epistemológicos e o negativo são os obstáculos epistemológicos. Do embate permanente entre estas duas instâncias, depreende-se um quadro de constante progressividade para o saber. Sob esta ótica, não se pode fugir ao momento em que a velha *episteme* venha a falhar, por não ser, em si mesma, capaz de produzir o novo. Ilya Prigogine não se alinha a filósofos que, como Bachelard, definem o progresso da ciência em termos de ruptura, de hiatos. Argumenta ele que não há de fato um vazio entre dois estágios da ciência, pois o hiato aparente estaria na verdade preenchido pelas questões negadas, declaradas ilegítimas, mas que por serem dotadas de existência real ali permaneceram, surdamente, minando o solo do desenvolvimento científico estabelecido e lançando o germe das transformações naturais ao curso do saber, que acabarão por se articular em torno de uma verdadeira *metamorfose da ciência*.

Ultrapassando esta divergência formal entre o pensamento de Prigogine e a teoria dos obstáculos epistemológicos de Bachelard, este trabalho considerou o solo epistêmico que tornou possível o estabelecimento da ciência moderna e algumas das condições e características associadas à sua posterior fragilização, responsáveis pelo advento de uma nova *idéia de natureza* e de uma imagem de mundo baseada na interdependência essencial de todos os fenômenos: físicos, biológicos, psicológicos, sociais e culturais: esta nova imagem de mundo corresponde à concepção sistêmica.

A concepção sistêmica ou o pensamento sistêmico novo-paradigmático, conforme a nomenclatura adotada por Vasconcellos (2007), opõe à análise a contextualização dos fenômenos e às relações causais lineares, as relações recursivas. Pressupostos como simplicidade, estabilidade e objetividade são substituídos por complexidade, instabilidade e intersubjetividade, categorias que o modelo newtoniano não comporta, haja vista aos fenômenos de auto-organização que se caracterizam pela emergência espontânea de padrões ordenados de funcionamento e se ajustam melhor a um padrão de redes do que a um modelo mecânico.

Como a auto-organização, que se define como a emergência espontânea de novos estados e de novas formas de comportamento em sistemas abertos afastados do equilíbrio, é um dos conceitos centrais do pensamento sistêmico novo-paradigmático, vê-se que a obra de Prigogine assume um papel relevante nesta nova visão de mundo, que se constrói a partir da relativização do modelo newtoniano-cartesiano. Assim, a inclusão da *seta do tempo* como um problema epistêmico, dando notícia do tempo como elemento ativo na constituição dos eventos e na composição do tecido da história, parece ser um feito que por si só assegura a Ilya Prigogine e à sua obra um lugar de destaque na revolução científico-cultural em curso. No entanto, demais aspectos da sua produção científica, principalmente os que dizem respeito aos fenômenos complexos num sentido mais amplo, estão entre as referências que dão suporte a este novo modelo de produzir e pensar a ciência.

## CONCLUSÃO

Admitimos, no desenvolver deste trabalho, que revolução científica que instaurou a modernidade suprimiu a visão de mundo medieval, baseada na filosofia aristotélica e na teologia cristã, onde o universo figurava como um elemento vivo, orgânico e espiritual, substituindo-a pela visão do universo como uma máquina. Constatamos que o modelo de racionalidade daí decorrente consolidou-se como um sistema de saber fechado em torno de uma descrição quantitativa da natureza e denunciemos que uma de suas principais características consiste numa reserva formal em relação às demais formas de saber, que não se prestem às descrições matemáticas.

Este trabalho considerou a desconstrução paulatina que o modelo de racionalidade que dá suporte à ciência moderna vem sofrendo, desde as primeiras décadas do século XX, sob o efeito de variadas frentes de ruptura, em particular aquelas provenientes da física: a termodinâmica, a física quântica e, menos radicalmente, a teoria da relatividade. Embora a ruptura formal do modelo cartesiano já venha sendo largamente discutida, em áreas distintas da saber contemporâneo, só muito recentemente a visão de mundo que lhe subjaz delineou-se ao ponto de requerer para si uma nova conformação teórica. A investigação acerca desta conformação, subjacente às mudanças drásticas com que a física contemporânea afetou o modelo científico em vigor, a partir do início do século XX, ofereceram suporte motivacional a este trabalho dissertativo, o qual se embasou e delimitou pela obra do físico-químico belga Ilya Prigogine.

Dentre as frentes de ruptura epistemológica procedentes da física, apenas a termodinâmica foi aqui abordada. No âmbito desta, cuidou-se particularmente das chamadas estruturas dissipativas e da irreversibilidade temporal, tópicos introduzidos por Prigogine na ciência contemporânea, invocados como possíveis contribuições a uma nova *idéia de natureza*. Estruturas dissipativas, como foi visto, correspondem a sistemas que, ao contrário de qualquer previsão possível na esfera da física newtoniana, alcançam *estabilidade longe do equilíbrio* e *irreversibilidade temporal* é uma propriedade dos sistemas abertos, incorporada à física por Prigogine como a “flecha do tempo” ou a “seta do tempo”.

A imagem de mundo e as *idéias de natureza* associadas ao modelo científico vigente incluem uma desinserção do homem do seu meio natural, criando, em primeira instância, o binômio homem-natureza e, de consequência, a irredutibilidade da dicotomia epistêmica

sujeito-objeto. No modelo instaurado pela ciência de Newton, a natureza é tão somente extensão e movimento. É passiva, eterna e reversível: mecanismo cujos elementos se podem desmontar e depois relacionar sob a forma de leis, não esboçando quaisquer atributos que nos impeçam de desvendar seus mistérios.

O conhecimento científico moderno, baseado na formulação de leis, tem como pressuposto a idéia de ordem e estabilidade do mundo, a idéia de que o passado se repete no futuro. Com o advento da física moderna e as perplexidades a que ela submete o pensador contemporâneo, desenvolveu-se uma consciência generalizada de que a revolução instaurada no seio da física, a que estivemos aludindo ao longo deste trabalho, impõe-nos uma revisão profunda da concepção que o homem tem do universo e do seu relacionamento com ele.

A mudança no conceito de realidade, que se manifesta na teoria quântica, não é, pois, uma simples descontinuação do passado, mas uma mudança de tal ordem, que estaria a representar um caminho integralmente novo proposto não só à ciência, mas abrangente sobre todos os domínios do saber humano, vez que o que pôs em questão foi o nosso próprio senso de realidade, ante o fato de que o mundo microscópico é regido por leis radicalmente novas, inviabilizadoras de uma descrição unificada do Universo.

Viu-se como, para se estudar a física do calor, define-se um sistema, não como na dinâmica, pela posição e velocidade dos seus constituintes, mas por um conjunto de parâmetros macroscópicos, tais como pressão, volume, temperatura, composição química e quantidade de calor, em termos dos quais as propriedades mais gerais dos sistemas materiais podem ser definidas. Ao considerar-se a termodinâmica como a ciência das variações correlatas dessas propriedades, observa-se que o seu objeto requer necessariamente um ponto de vista inovado em relação ao objeto dinâmico, pois já não se trata de observar uma evolução, calculando o efeito previsto, com base em formulações ideais das interações entre os elementos do sistema, mas de agir sobre este.

No modelo newtoniano, o futuro de qualquer parte de um sistema, bem como o seu passado, poderia ser calculado com absoluta certeza se o seu estado, em qualquer instante determinado, fosse conhecido em todos os seus aspectos, não havendo, pois, diferença entre passado e futuro. Disto se depreende que os fenômenos, na formulação newtoniana, são completamente independentes da sua história. Mas, estudando manifestações de coerência e auto-organização em sistemas distanciados do equilíbrio, Prigogine chegou a conclusão de que o conceito de irreversibilidade temporal impõe profunda reconceitualização à ciência, visto que o tempo passa a figurar como fenômeno constitutivo dos eventos.

A mudança conceitual na ciência, defendida por Prigogine, corresponde a uma transição de processos reversíveis e determinísticos para processos indeterminados e irreversíveis, pois a flecha do tempo, para ele, não aponta para uma ordem crescente, mas para fora desta ordem. Com efeito, a segunda lei da termodinâmica assegura esta tendência, inerente aos fenômenos físicos, de transitarem da ordem para a desordem, no sentido de uma entropia sempre crescente. A entropia é um conceito fundamental introduzido na ciência pela termodinâmica e diz respeito, de maneira muito específica, aos processos irreversíveis, os quais, segundo Prigogine, são a regra na natureza, pois os processos reversíveis correspondem sempre a idealizações, a aproximações decorrentes do isolamento dos sistemas, condição necessária a abordagem matematizada e exaustiva dos mesmos, exigível pelo modelo vigente.

Mostrou-se como Prigogine pretende demonstrar que a ciência praticada segundo o modelo estabelecido não é capaz de contemplar um universo em evolução, precisamente por fundar-se no pressuposto da reversibilidade temporal. Segundo ele, a realidade do devir é a condição *sine qua non* de nosso diálogo com a natureza; e as mudanças introduzidas na ciência moderna fazem-nos, doravante, capazes de decifrar a mensagem da evolução, em termos de instabilidade associada ao caos. O resultado mais significativo das pesquisas de Prigogine e sua equipe é, de fato, a identificação de sistemas que impõem uma ruptura de equivalência entre a descrição individual (trajetórias, funções de onda) e a descrição estatística dos sistemas, que só neste nível podem ser incorporadas às leis fundamentais. As leis da natureza adquirem, então, um significado novo: não tratam mais de certezas formais, mas sim de probabilidades empíricas. Apontam para o devir e afirmam as múltiplas potencialidades do ser, enquanto descrevem um mundo de movimentos irregulares, caóticos, um mundo mais próximo do imaginado pelos atomistas antigos do que das órbitas newtonianas.

Para Prigogine, a flecha ou a “seta do tempo”, é elemento constitutivo dos fenômenos naturais, a tal ponto que, sem a coerência dos processos irreversíveis de não-equilíbrio, o aparecimento da vida na Terra seria inconcebível. Portanto, não são mais as situações estáveis e as permanências que devem nos interessar em primeiro plano, mas as evoluções, as crises e as instabilidades. “Já não queremos estudar apenas o que permanece, mas também o que se transforma, as perturbações geológicas e climáticas, a evolução das espécies, a gênese e as mutações das normas que interferem nos comportamentos sociais” (PRIGOGINE, 1991, p. 5).

A termodinâmica, como visto, ao mesmo tempo em que desencadeou a revolução

industrial, pôs em questão o modelo que a propiciou, ao desvendar-nos a complexidade e o caos, características de um mundo novo e fascinante que a física de Newton não alcança através do modelo de ciência que se estabeleceu a partir dela. Com base nesta física e sob a metodologia cartesiana, para sustentar a “certeza”, a “exauriência” na abordagem de um sistema – o que se faz necessariamente pela via quantitativa – impõe-se, por um lado, que o sistema seja isolado, fechado em torno de variáveis manipuláveis, e, por outro, pressupõe-se, como regra, que o tempo seja uma grandeza reversível. Esta postura exerceu influência radical sobre a cultura ocidental e uma das suas principais consequências, e sem dúvida a mais dramática, consiste na proliferação e uso indiscriminado de artefatos tecnológicos, incorporando à própria cultura uma conduta omissiva e, mais recentemente, francamente irresponsável, em relação ao equilíbrio e à preservação dos nossos ecossistemas.

Parece largo demais o passo, a uma primeira vista, para uma inferência desta tipo; contudo, não é difícil perceber, a um segundo olhar, que, num modelo assim baseado em idealizações, onde o *complexo* não passa da justaposição de sistemas estrategicamente simplificados, não há lugar para o excedente, para a escória, para os detritos. Enfim, desta conduta teórica não se poderia esperar produto diferente, de tal forma que assistimos a uma revolução industrial que não contemplou, por qualquer via que fosse, a destinação a ser dada para seus detritos, para seu lixo. E, ademais, o arcabouço teórico da ciência newtoniana não contém elementos sugestivos para a análise do caráter irreversível de nossas drásticas incursões sobre os processos e metabolismos naturais.

A teoria de Prigogine contém indicadores de uma mudança conceitual significativamente profunda em relação a este modelo, visto que ele trabalhou com as estruturas dissipativas, que são sistemas caóticos passíveis de descrição, por exemplo, em termodinâmica não-linear, cujas características principais são a sensibilidade a pequenas mudanças nos pontos críticos, incerteza e imprevisibilidade do futuro, concepções efetivamente revolucionárias, se comparadas aos pressupostos da ciência newtoniana.

Compreender a natureza foi um dos grandes projetos do pensamento ocidental, mas infelizmente este projeto foi confundido com controle e o homem se vê ameaçado de estar engendrando sua própria ruína. Mas é possível que um novo saber esteja em gestação no seio destas mudanças, subjacentes às revoluções no campo específico das ciências, assim como demonstram os fenômenos de autorregulação e o caos entrópico, que, através de ínfimas flutuações-bifurcações promove evolução e propicia a irrupção de novas organizações complexas.

O enfoque científico aqui visitado destaca a importância capital do tempo irreversível – o fluxo do devenir – pedra angular de qualquer mudança. E tal metamorfose da ciência concorre, segundo Prigogine, para uma “nova aliança”, para a convergência de duas culturas, a científica e a humanista, que se interrogam sobre a significação dos mesmos fenômenos: o devenir, a reabilitação da desordem e o acaso organizador. E, obviamente, a ciência e as humanidades não poderão se reconciliar senão sob a égide de uma outra forma de racionalidade, uma proposta radicalmente inovadora frente ao conhecimento e à própria vida em sociedade. A busca desta racionalidade inovada e de seu *status* filosófico constituem um objeto de investigação em aberto, visando à conformação de uma epistemologia contemporânea, que ainda está por ser construída, uma epistemologia que encontre um lugar de dignidade para o ser humano no corpo do seu próprio saber, um chão epistêmico – milagroso num certo sentido arendtiano<sup>8</sup> - onde o homem e a vida possam ao menos se entreolhar.

Pensando sobre o fio condutor que norteou este trabalho, do começo ao fim, parece ser a incompletude do conhecimento a evidência mais significativa que a complexidade nos traz. As demais noções abordadas, tais como o indeterminismo, a assimetria temporal, a espontaneidade e a criatividade dos sistemas abertos, revelam-se circundantes à evidência de uma incompletude irremediável, que sugere um descompasso ontológico, apontando para a multidimensionalidade do mundo em contraposição a linearidade do pensamento e do próprio saber, de modo que estaremos sempre fadados a lidar com faixas, com “nesgas” do real – o real que, além do mais, não o é *em si*, mas apenas representado. Ora, foi neste ponto que o saber moderno se ateu às restrições formais da ciência, pondo entre parêntesis, por regra, o que não fosse quantificável ou passível de formalização, chegando não só a acreditar que tudo aquilo que não pudesse ser quantificado seria irrisório, sem valor, mas, principalmente que só o pensado seria o real. Talvez fique bem admitirmos que só o pensado é real, mas o real que nos cabe, que nos é dado, dentro do imponderável Real.

Então, o que foi colocado de fora, alijado dos sistemas através de prévia tomada de interesses e seleção de variáveis manipuláveis, em prol de uma intervenção que desse conta de tudo, não seria justamente o *ambiente*? Uma questão que se coloca é, pois, de que modo o modelo de racionalidade praticado em nossos dias incorpora o ambiente enquanto “idéia”? Em suma: o que é o ambiente, da perspectiva do saber contemporâneo? Que relação é

---

<sup>8</sup> Refere-se, aqui, à idéia de “milagre”, no sentido da novidade improvável, mas possível de eclodir a partir de práticas humanas dramaticamente autênticas, de que trata Hannah Arendt (2009) em sua obra *A condição Humana*, que pode ser entendida como uma descrição possível para um salto epistemológico.

possível de se estabelecer entre as idéias de natureza e o ambiente? E como o estudo da complexidade contribui à elucidação de tais questões?

Um segundo questionamento, a que nos leva o estudo da obra de Ilya Prigogine, é o da orientação temporal dos sistemas – a flecha ou seta do tempo – introduzida na ciência pela termodinâmica, através do conceito de entropia. O segundo princípio da termodinâmica, que descreve a entropia como a taxa de crescimento da desordem de um sistema, se fechado, mas expressa a direção da evolução deste mesmo sistema, quando aberto, estabelece diferença entre processos reversíveis e irreversíveis, dos quais a regra são os últimos e os primeiros a exceção. Sabendo-se que só com os processos reversíveis a ciência até então se ocupara, pela circunstância de ser toda ela baseada em idealizações e ter por pressuposto essencial o tempo absoluto de Newton, dá-se a perceber que tal modelo desfavorece grandemente, enquanto arcabouço conceitual, a reflexão em torno do caráter irreversível das nossas incursões sobre os sistemas naturais.

Pode ser que se esteja a implementar um pensamento inovador, descortinador de posturas mais adequadas à atuação de cada cidadão e das instituições, frente às questões cruciais do nosso tempo, que remetem à iminência de um colapso dos nossos ecossistemas. Convém que repensem o ambiente e a natureza, que os retomemos *enquanto conceitos*, antes de propormos soluções imediatistas para os desafios emergentes, pois soluções do mesmo alcance epistemológico dos problemas não são soluções efetivas, *não o podem ser*. São, quando muito, problemas de segunda ordem. Isto, de o conhecimento se processar segundo ordens distintas, em níveis, é uma leitura possível às rupturas bachelardianas, aqui entendidas como saltos, à moda dos saltos quânticos, que ocorrem espontaneamente nos limites energéticos de cada estado de equilíbrio orbital. Não é impertinente, nesta linha de pensamento, retomarmos, para este arremate reflexivo, as grandes indagações levantadas por Gaston Bachelard em sua obra *Epistemologia*:

Terá o conceito de limite do conhecimento científico um sentido absoluto? Será mesmo possível traçar as fronteiras do pensamento científico? Estaremos nós verdadeiramente encerrados num domínio objetivamente fechado? Seremos escravos de uma razão imutável? Será o espírito uma espécie de instrumento orgânico, invariável como a mão, limitado como a vista? Estará ele ao menos sujeito a uma evolução regular em ligação com uma evolução orgânica? Eis muitas perguntas que põem em jogo toda uma filosofia e que devem dar um interesse primordial ao estudo dos progressos do pensamento científico. (BACHELARD, 2006, p. 23)

O conceito explorado por Bachelard, no desenrolar do argumento introduzido pelas questões acima, parece explicitar uma espécie de fronteira epistemológica. Seria então

possível admitir que a atividade criadora de que fala Hannah Arendt (2006, p. 41), que possibilita a eclosão do novo quando e de onde menos se espera, como um *milagre*, compatibiliza-se com esta noção de fronteira que se alinha com o terreno epistêmico para onde nos conduziram as incursões na obra científica de Ilya Prigogine, a partir do estudo da instabilidade, das flutuações e mudanças espontâneas de estado, que fundam uma nova ordem a partir da própria energia degenerescente da ordem anterior, tema que pretendemos seguir investigando na sede acadêmica seguinte.

## REFERÊNCIAS

ABRANTES, Paulo C. C. A concepção estóica de natureza e a moderna física do contínuo. *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, Campinas: Unicamp/CLE, série 2, v. 2, n. 1, p. 33-65, 1990.

\_\_\_\_\_. A filosofia da ciência de H. Hertz. In: ÉVOR, F. (Org.). *Século XIX: o nascimento da ciência contemporânea*. Campinas: Unicamp/CLE, [s.d], p. 351-375. (Coleção CLE 11)

\_\_\_\_\_. *Imagens de natureza, imagens de ciência*. Campinas: Papyrus, 1998.

\_\_\_\_\_. Newton e a física francesa do século XIX. *Cadernos de História da Filosofia*, Campinas: Unicamp/CLE, série 2, v. 1, n. 1, p. 5-31, 1989.

ABRÃO, Baby; COSCODAI, Mirtes (Orgs.). *História da filosofia*. São Paulo: Nova Cultura, 2002.

ANDERY, Maria Amélia et alli. *Para compreender a ciência: uma perspectiva histórica*. EDUC, 2002.

ARENDT, Hannah. *A condição humana*. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2009.

BACHELAR, Gaston. *A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento*. Tradução Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

\_\_\_\_\_. *Epistemologia*. Lisboa: Edições 70, 2006.

\_\_\_\_\_. *O novo espírito científico*. Tradução de Antônio José Pinto Ribeiro. Lisboa: Edições 70, 1996.

BACON, Francis. *Novum organum*. São Paulo: Nova Cultural, 1998. (Col. Os Pensadores)

BATESON, Gregory. *Mind and nature*. Londres: Fontana, 1985.

BERNARDES, N. *Termodinâmica, linguagem e indeterminação*. Campinas: Unicamp/CLE,

1998. (Col. CLE 26)

BOHR, Niels. *Atomic physics and human knowledge*. New York: Wiley, 1958.

\_\_\_\_\_. *Física atômica e conhecimento humano*. Tradução de Vera Ribeiro, Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

CANGUILHEM, G. *Études d'histoire et de philosophie des sciences*. Paris: Vrin, 1968.

CAPRA, Fritjof. *A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos*. Tradução de Newton Roberval Eicheberg. São Paulo: Cultrix, 1996.

\_\_\_\_\_. *As conexões ocultas: ciência para uma vida sustentável*. São Paulo: Cultrix, 2002.

\_\_\_\_\_. *O Ponto de mutação: a ciência, a sociedade e a cultura emergente*. São Paulo: Cultrix, 2002.

CASINI, Paolo. *As filosofias da natureza*. Tradução de Ana Falcão Bastos e Luis Leitão. Lisboa: Presença, 1975.

CLAVELIN, M. *La philosophie naturelle de Galilleu*. Paris: A Colin, 1969.

COHEN, Bernard I. & WESTFALL, Richard S. (Orgs.). *Newton: textos, antecedentes, comentários*. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 2002.

DAVIES, Paul. *O enigma do tempo: a revolução iniciada por Einstein*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1999.

DESCARTES, René. *Discours de la méthode*. Paris: Flammarion, 2000.

\_\_\_\_\_. *Meditações*. São Paulo: Nova Cultural, 1987. (Col. Os Pensadores)

EINSTEIN, Albert. *Comment je vois le monde*. Paris: Flammarion, 1979.

\_\_\_\_\_. *La relativité*. Paris: Petite Bibliothèque Payot, 1956.

\_\_\_\_\_. *L'évolution des idées en physique*. Paris: Petite Bibliothèque Payot, 1963.

\_\_\_\_\_. *L'éther et la théorie de la relativité*. Col. "Discours de la Méthode". Paris: Gauthiers Villars, 1979.

FOUCAULT, Michel. *As palavras e as coisas: uma arqueologia das ciências humanas*. São Paulo: Martins Fontes, 2002.

\_\_\_\_\_. *La volonté de savoir*. Paris: Gallimard, 1976.

FOURIER, Charles. *Théorie des quatre mouvements et des destinées générales*. Paris: Jean-Jackes Pairvert, 1967.

FREIRE JR., Olival. *David Bohm e a controvérsia dos quanta*. Campinas: Editora UNICAMP, 1999.

FRIED, Dora S. (Org.). *Novos paradigmas, cultura e subjetividade*. Tradução de Jussara Haubert Rodrigues. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996.

GALILEI, Galileu. *Diálogo dos dois grandes sistemas do mundo*. Lisboa: Publicações Gradiva, 1979.

GELL-MANN, Murray. *O quark e o jaguar: aventuras no simples e no complexo*. Tradução de Alexandre Tort. Rio de Janeiro: Rocco, 1996.

GIDDENS, Anthony. *As consequências da modernidade*. Tradução de Raul Fiker. São Paulo: Editora UNESP, 1991.

GONÇALVES, Márcia Cristina Ferreira. *Filosofia da natureza*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2006.

HAWKING, Stephen & PENROSE, Roger. *A natureza do espaço e do tempo*. São Paulo: Papyros, 1997.

\_\_\_\_\_. *O fim da física*. Tradução José Gabriel Rosa. Lisboa. Gradiva, 1994.

\_\_\_\_\_. *O universo numa casca de noz*. Tradução de Ivo Korytowski. São Paulo: Arx, 2001

\_\_\_\_\_. *Une brève histoire du temps*. Paris: Flammarion, 1991.

HEISENBERG, Werner. *Física e Filosofia*. Tradução de Jorge Leal Ferreira. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1998. [7], [8].

HORGAN, John. *O fim da ciência: uma discussão sobre os limites do conhecimento científico*. Tradução de Rosaura Eichenberg. São Paulo: Companhia das Letras, 1998.

KOYRÉ, A. *Do mundo fechado ao universo infinito*. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2006.

\_\_\_\_\_. *Etudes galiléennes*. Paris: Hermann, 1996.

\_\_\_\_\_. *Estudos históricos do pensamento filosófico*. Rio de Janeiro: Forense Universitário, 1991.

\_\_\_\_\_. *Etudes newtoniennes*. Paris: Gallimard, 1968.

KUHN, Thomas. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectivas, 1998.

LENOBLE, Robert. *História da idéia de natureza*. Lisboa: Edições 70, 1990

LAPLACE, Paul. *Exposition dy système du monde*. Paris: Bachilier, 1836.

LEFF, Enrique. *Epistemologia ambiental*. São Paulo: Cortez, 2002.

LYOTARD, J.F. *Moralidades pós-modernas*. São Paulo: Papyrus, 1996.

MARIOTTI, Humberto. *Pensamento complexo: suas aplicações à liderança, à aprendizagem e ao desenvolvimento sustentável*. São Paulo: Atlas, 2007.

MATURANA, H. *A árvore do conhecimento*. São Paulo: Palas Athenas, 2001.

MORIN, Edgar. *A religação dos saberes*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.

\_\_\_\_\_. *Ciência com consciência*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

\_\_\_\_\_. *O método I: a natureza da natureza*. Porto alegre: Sulina, 2005.

MURPHY, M.P. & ONEIL, A. J. (Orgs.). *“O que é a vida?” 50 Anos depois: especulações sobre o futuro da biologia*. Tradução de Laura Cardellini. São Paulo: Editora UNESP, 1997.

NEWTON, Isaac. *Mathematical principles of natural philosophy*. Berkeley: University of Califórnia Press, 1934.

NUSSENZVEIG, Moisés. *Física*. v. 2 São Pulo: Edgar Blücher, 2002.

OMNÈS, Roland. *Filosofia da ciência contemporânea*. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora UNESP, 1996.

PATY, Michel. *A matéria roubada*. São Paulo: EDUSP, 1995.

\_\_\_\_\_. *Eistein Philosophe*. Paris: PUF, 1993.

\_\_\_\_\_. *L'analyse critique des sciences ou le tétraèdre epistemologique*. Paris: Hamattan, 1990.

\_\_\_\_\_. *La matière derobée – l'appropriation critique de l'objet de physique contemporaine*. Montreux: Éditions des Archives Contemporaines, 1988.

\_\_\_\_\_. *Sur l'hitoire et la philosophie de la decouverte scientifique: champs de rationalité, styles scientifiques, traditions et influences*. Anais do segundo congresso latino-americano de história da ciência e da tecnologia. São Paulo: Nova Stella, 1989. p. 26-40.

PESSOA JR., Osvaldo. *Auto-organização e complexidade: uma introdução Histórica e Crítica*. Dissertação (Mestrado em Ensino) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

PIZZA, Toledo A. F. R. *Schorödinger & Heisemberg – a física além do senso comum*. São Paulo: Odysseus, 2003.

POINCARÉ, H. *Science et méthode*. Paris: Flammarion, 1908.

PONTY, J. Merleau. *A natureza*. São Paulo: Martins Fontes, 2000.

PRIGOGINE, I. *As Leis do caos*. Tradução Roberto Leal Ferreira, São Paulo: UNESP, 2002.

\_\_\_\_\_. *Entropy and dissipative structures*. Berlim: Sppringer, 1971.

\_\_\_\_\_. *From being to becoming: time and complexity in phisical sciences*. São Francisco: Freeman, 1980.

\_\_\_\_\_. *O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza*. São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 1996.

PRIGOGINE, I. & GLANSDORFF, P. *Structure, stabilité et fluctuations*. Paris: Masson, 1971.

PRIGOGINE, Ilya & STENGERS, Isabela. *A nova aliança: metamorfose da ciência*. Tradução de Miguel Faria e Maria Joaquina Machado Trincheira. Brasília: Editora UnB, 1991.

\_\_\_\_\_. *Entre o tempo e a eternidade*. São Paulo: Companhia das Letras, 1992.

\_\_\_\_\_. *Idées contemporaines*. Paris: Édition La Découverte e jornal Le Monde, 1984.

\_\_\_\_\_. *La nouvelle alliance: metamorphose de as science*. Paris: Gallimard, 1979.

\_\_\_\_\_. *Order out of caos: a new dialogue of men and nature*. Nova York: Bantam, 2003.

SANTOS, B. S. *Um discurso sobre as ciências*. São Paulo: Cultrix, 2003.

SCHENBERG, M. *Pensando a física*. São Paulo: Landy Editora, 2001.

SCHORÖDINGER, E. *O que é vida? – o aspecto físico da célula viva*. São Paulo: UNESP, 1997.

SHIELDS, P. *The theory of Bernoulli shifts*. Chicago: University of Chicago, 1973.

SIQUEIRA, Abrão B. *História da filosofia*. São Paulo: Editora Best Seller, 2002.

SPIRE, Arnaud. *O Pensamento-Prigogine*. Tradução de Felipe Duarte. Lisboa: Instituto Piaget, 2000.

TERNES, José. *Michel Foucault e a idade do homem*. Goiânia: UCG, 1998.

VARELA, João. *O século dos quanta*. Lisboa: Gradiva, 1996.

VASCONCELLOS, Maria José Esteves de. *Pensamento sistêmico: o novo paradigma da ciência*. Campinas: Papyrus, 2002.

WHITEHEAD, Alfred N. A filosofia da ciência de H. Hertz. In: ÉVOR, F. (Org.). *Século XIX: o nascimento da ciência contemporânea*. Campinas, Unicamp/CLE, [s.d], p. 351-375. (Coleção CLE 11)

\_\_\_\_\_. *O conceito de natureza*. Tradução de Júlio B. Ficher. São Paulo: Martins Fontes, 1993.