ISSN 1981-4313 impresso
ISSN 2357-8432 online
Revista Científica
Coleção em Pesquisa EF
DIÁLOGOS ENTRE CORPO, MOVIMENTO, SAÚDE, EDUCAÇÃO E SOCIEDADE
Acesso aberto • CC BY 4.0
rcpef.org

O FIM DAS CERTEZAS: O PARADOXO DO TEMPO E A CONSTRUÇÃO DE UMA NOVA RACIONALIDADE CIENTÍFICA EM ILYA PRIGOGINE

THE END OF CERTAINTY: THE TIME PARADOX AND THE CONSTRUCTION OF A NEW SCIENTIFIC RATIONALITY IN ILYA PRIGOGINE

EL FIN DE LAS CERTIDUMBRES: LA PARADOJA DEL TIEMPO Y LA CONSTRUCCIÓN DE UNA NUEVA RACIONALIDAD CIENTÍFICA EN ILYA PRIGOGINE

Márcio Magera Conceição[1]

e25021753
https://doi.org/10.47820/cpef.8e0yz594
PUBLICADO 28.2026

RESUMO
Este ensaio teórico examina a proposta epistemológica de Ilya Prigogine em *O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza* (1996), com o objetivo de reconstituir o argumento pelo qual o autor desloca as leis da natureza do registro da certeza para o registro da possibilidade. Trata-se de pesquisa de natureza teórico-bibliográfica, de abordagem qualitativa e caráter hermenêutico-interpretativo, que toma a obra como fonte primária e a examina em diálogo com a literatura da filosofia da ciência e da termodinâmica de não-equilíbrio. O percurso analítico organiza-se em oito movimentos: a formulação do dilema de Epicuro e a genealogia histórica do ideal de certeza; o paradoxo do tempo e a leitura antropocêntrica da irreversibilidade herdada da derrota de Boltzmann; o papel construtivo dos processos irreversíveis, evidenciado pelas estruturas dissipativas e pelas bifurcações; a ruptura da equivalência entre a descrição individual e a descrição estatística nos sistemas dinâmicos instáveis; a extensão da dinâmica clássica e quântica a partir das ressonâncias de Poincaré; o desdobramento cosmológico da tese de que o tempo precede a existência; as implicações éticas e epistemológicas da ciência concebida como diálogo com a natureza; e, por fim, a transposição do argumento para o exame da inteligência artificial como bifurcação da sociedade do século XXI. Argumenta-se que a contribuição decisiva de Prigogine não reside em acrescentar uma cláusula de incerteza a um edifício determinista preservado, mas em inscrever a instabilidade na estrutura mesma das leis fundamentais, de modo que a flecha do tempo deixe de ser aparência subjetiva e se torne propriedade da natureza. Conclui-se que o programa prigoginiano oferece à comunidade científica contemporânea uma terceira via — o "caminho estreito" entre o determinismo e o acaso puro — cuja fecundidade excede a física e alcança o modo como as ciências, inclusive as humanas e sociais, concebem previsão, explicação e responsabilidade — e, de modo particularmente agudo, o modo como a sociedade do século XXI se posiciona diante da inteligência artificial.

PALAVRAS-CHAVE: Ilya Prigogine. Paradoxo do tempo. Irreversibilidade. Estruturas dissipativas. Inteligência artificial. Epistemologia da complexidade.

ABSTRACT
This theoretical essay examines Ilya Prigogine's epistemological proposal in *The End of Certainty: Time, Chaos and the New Laws of Nature* (1996), aiming to reconstruct the argument by which the author shifts the laws of nature from the register of certainty to that of possibility. This is a theoretical-bibliographical study, qualitative in approach and hermeneutic-interpretative in character, taking the book as a primary source and examining it in dialogue with the literature of philosophy of science and non-equilibrium thermodynamics. The analysis unfolds in eight movements: the formulation of Epicurus' dilemma and the historical genealogy of the ideal of

[1]Doutor em Economia pela PUC -Campinas. MBA de Marketing –ESAMC, Sorocaba. Mestrado em Administração pela UNG -Guarulhos. Mestrado em Sociologia pela PUC -São Paulo. Doutorado em Sociologia pela PUC -São Paulo. Doutorado em Administração pela FCU -USA. Pós-doutorado Unicamp -Campinas. Pós Doutor FCU - USA. Pós Doutor UC-Portugal. Jornalista e Escritor. Avaliador do MEC/INEP. Pró-reitor da Universidade Guarulhos, SP.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

certainty; the time paradox and the anthropocentric reading of irreversibility inherited from Boltzmann's defeat; the constructive role of irreversible processes, evidenced by dissipative structures and bifurcations; the breakdown of the equivalence between individual and statistical description in unstable dynamical systems; the extension of classical and quantum dynamics based on Poincaré resonances; the cosmological unfolding of the thesis that time precedes existence; the ethical and epistemological implications of science conceived as a dialogue with nature; and finally the transposition of the argument to the examination of artificial intelligence as a bifurcation of twenty-first-century society. It is argued that Prigogine's decisive contribution lies not in adding a clause of uncertainty to a preserved deterministic edifice, but in inscribing instability within the very structure of fundamental laws, so that the arrow of time ceases to be a subjective appearance and becomes a property of nature. It is concluded that the Prigoginian programme offers contemporary science a third way — the “narrow path” between determinism and pure chance — whose fruitfulness exceeds physics and reaches the way in which the sciences, including the human and social sciences, conceive prediction, explanation and responsibility — and, most acutely, the way twenty-first-century society positions itself in relation to artificial intelligence.

KEYWORDS: Ilya Prigogine. Time paradox. Irreversibility. Dissipative structures. Artificial intelligence. Epistemology of complexity.

RESUMEN

Este ensayo teórico examina la propuesta epistemológica de Ilya Prigogine en *El fin de las certidumbres: tiempo, caos y las leyes de la naturaleza* (1996), con el objetivo de reconstituir el argumento mediante el cual el autor desplaza las leyes de la naturaleza del registro de la certeza al de la posibilidad. Se trata de una investigación teórico-bibliográfica, de enfoque cualitativo y carácter hermenéutico-interpretativo, que toma la obra como fuente primaria y la examina en diálogo con la literatura de la filosofía de la ciencia y de la termodinámica de no-equilibrio. El recorrido analítico se organiza en ocho movimientos: la formulación del dilema de Epicuro y la genealogía histórica del ideal de certeza; la paradoja del tiempo y la lectura antropocéntrica de la irreversibilidad heredada de la derrota de Boltzmann; el papel constructivo de los procesos irreversibles, evidenciado por las estructuras disipativas y las bifurcaciones; la ruptura de la equivalencia entre la descripción individual y la estadística en los sistemas dinámicos inestables; la extensión de la dinámica clásica y cuántica a partir de las resonancias de Poincaré; el despliegue cosmológico de la tesis de que el tiempo precede a la existencia; las implicaciones éticas y epistemológicas de la ciencia concebida como diálogo con la naturaleza; y, por último, la transposición del argumento al examen de la inteligencia artificial como bifurcación de la sociedad del siglo XXI. Se argumenta que la contribución decisiva de Prigogine no reside en añadir una cláusula de incertidumbre a un edificio determinista preservado, sino en inscribir la inestabilidad en la estructura misma de las leyes fundamentales, de modo que la flecha del tiempo deje de ser apariencia subjetiva y se convierta en propiedad de la naturaleza. Se concluye que el programa prigoginiano ofrece a la ciencia contemporánea una tercera vía — el “camino estrecho” entre el determinismo y el azar puro — cuya fecundidad excede la física y alcanza el modo en que las ciencias, incluidas las humanas y sociales, conciben la previsión, la explicación y la responsabilidad — y, de modo particularmente agudo, el modo en que la sociedad del siglo XXI se posiciona ante la inteligencia artificial.

PALABRAS CLAVE: Ilya Prigogine. Paradoja del tiempo. Irreversibilidad. Estructuras disipativas. Inteligencia artificial. Epistemología de la complejidad.

1 INTRODUÇÃO

Poucas obras de divulgação científica do final do século XX formularam com tanta economia uma pretensão tão ampla quanto *O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza*, publicado por Ilya Prigogine em 1996, em colaboração com Isabelle Stengers. O título anuncia um encerramento; o subtítulo, um programa. O que se encerra é a identificação, três vezes secular, entre conhecimento científico e certeza — a convicção de que uma lei da natureza só merece esse nome quando permite deduzir, de condições iniciais suficientemente precisas, a totalidade do futuro e do passado de um sistema. O que se propõe em seu lugar não é o

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

abandono da legalidade, tampouco a rendição ao acaso, mas uma reformulação das leis fundamentais da física em termos de possibilidades. A tese, enunciada logo no prólogo, é de uma clareza desarmante: “tanto na dinâmica clássica quanto na física quântica, as leis fundamentais exprimem agora possibilidades e não mais certezas” (PRIGOGINE, 1996, p. 13).

O interesse dessa formulação para o debate epistemológico contemporâneo decorre menos de sua audácia retórica do que do lugar de onde é enunciada. Prigogine não fala como filósofo que interpela a física a partir de fora, nem como crítico externo do racionalismo científico. Fala como físico-químico laureado com o Prêmio Nobel de Química de 1977 justamente pelos trabalhos sobre termodinâmica de não-equilíbrio e estruturas dissipativas, e o que apresenta ao leitor é a extensão técnica de um formalismo — a dinâmica clássica e a mecânica quântica reformuladas ao nível estatístico — cujas consequências filosóficas ele extrai em seguida. Essa é a diferença que separa seu argumento das declarações mais gerais sobre incerteza e complexidade que proliferaram nas últimas décadas: aqui, a instabilidade não é uma metáfora importada, mas uma propriedade matemática de classes bem definidas de sistemas dinâmicos, e é dessa propriedade que decorrem as teses sobre o tempo, a natureza e o lugar do ser humano nela.

O problema que organiza a obra é o que o autor denomina paradoxo do tempo. Ele pode ser enunciado em uma frase: como pode a flecha do tempo, onipresente na química, na geologia, na biologia, na cosmologia e nas ciências humanas, emergir de um mundo que a física descreve por leis invariantes sob a inversão temporal? A resposta tradicional — a que se consolidou após o fracasso do programa de Ludwig Boltzmann — atribui a assimetria ao observador: seríamos nós, com nossa descrição necessariamente aproximada, os responsáveis pela diferença entre passado e futuro. Prigogine recusa integralmente essa saída. Para ele, “não somos nós que geramos a flecha do tempo. Muito pelo contrário, somos seus filhos” (PRIGOGINE, 1996, p. 12).

Este ensaio tem por objetivo geral reconstituir e discutir criticamente o argumento pelo qual Prigogine desloca as leis da natureza do registro da certeza para o registro da possibilidade, examinando as condições técnicas que ele estabelece para esse deslocamento e as consequências epistemológicas e éticas que dele extrai. Como objetivos específicos, pretende-se: (i) situar historicamente o ideal de certeza que a obra questiona, a partir do dilema de Epicuro e de sua consolidação na mecânica newtoniana; (ii) examinar a crítica prigoginiana à interpretação antropocêntrica da irreversibilidade; (iii) explicitar o papel construtivo dos processos irreversíveis nos sistemas afastados do equilíbrio; (iv) analisar a ruptura da equivalência entre descrição individual e descrição estatística, que constitui o núcleo técnico da proposta; (v) apresentar a extensão da dinâmica clássica e quântica fundada nas ressonâncias de Poincaré; e (vi) discutir o desdobramento cosmológico e as implicações éticas da nova racionalidade proposta.

Do ponto de vista metodológico, trata-se de pesquisa teórico-bibliográfica, de abordagem qualitativa e caráter hermenêutico-interpretativo. A obra de Prigogine é tomada como fonte primária e submetida a leitura analítica integral, com identificação das teses centrais de cada capítulo, mapeamento dos conceitos operatórios e registro das passagens em que o autor

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

explicita seus compromissos epistemológicos. Em um segundo momento, o argumento reconstituído é confrontado com a literatura secundária pertinente — sobretudo os trabalhos do próprio autor em coautoria com Isabelle Stengers (PRIGOGINE; STENGERS, 1990, 1997) e Grégoire Nicolis (NICOLIS; PRIGOGINE, 1977, 1989), além da reflexão epistemológica desenvolvida por Stengers (2002) sobre a invenção das ciências modernas, e a produção da filosofia da ciência sobre determinismo, indeterminismo e complexidade. Não se trata, portanto, de revisão sistemática, nem de estudo de recepção, mas de exame interno de um argumento, com atenção à sua consistência e ao alcance de suas pretensões. As citações diretas seguem a tradução brasileira de Roberto Leal Ferreira, publicada pela Editora da Universidade Estadual Paulista em 1996.

A justificativa do estudo repousa em uma constatação: a expressão “fim das certezas” incorporou-se ao vocabulário corrente das ciências humanas e sociais brasileiras com uma facilidade que nem sempre foi acompanhada do exame do argumento que a sustenta. Invocada para autorizar desde a crítica ao positivismo até a defesa de metodologias participativas, a fórmula frequentemente perde o vínculo com a demonstração técnica que lhe dá substância. Recuperar esse vínculo é, aqui, condição para avaliar tanto a fecundidade quanto os limites da transposição do argumento prigoginiano para além do campo em que foi originalmente formulado.

2 O DILEMA DE EPICURO E A GENEALOGIA DO IDEAL DE CERTEZA

Prigogine abre o desenvolvimento de sua obra com um gesto de historiador das ideias: recua até a Antiguidade para mostrar que o problema que enfrenta não é um acidente da física moderna, mas uma tensão constitutiva do pensamento ocidental. “Foi Epicuro o primeiro a estabelecer os termos do dilema a que a física moderna conferiu o peso de sua autoridade” (PRIGOGINE, 1996, p. 17). O dilema epicurista nasce de uma dificuldade interna ao atomismo herdado de Demócrito. Se os átomos caem no vazio em trajetórias paralelas e com a mesma velocidade, como poderiam encontrar-se? E se não se encontram, como explicar a formação dos corpos, a diversidade do mundo, a novidade? A solução proposta — o *clinamen*, desvio mínimo e imprevisível que perturba a queda paralela — permaneceu na história do pensamento, observa Prigogine, “como o exemplo mesmo de uma hipótese arbitrária, que salva um sistema pela introdução de um elemento *ad hoc*” (PRIGOGINE, 1996, p. 18).

O que importa reter, contudo, não é o expediente, mas o que ele pretendia preservar. Para Epicuro, o problema da inteligibilidade da natureza e o do destino humano eram inseparáveis: um mundo inteiramente determinado seria um mundo em que a liberdade humana não teria onde inscrever-se. A célebre passagem da carta a Meneceu, citada por Prigogine, exprime a dimensão existencial da questão: “Quanto ao destino, que alguns consideram o senhor de tudo, o sábio ri-se dele. De fato, mais vale ainda aceitar o mito sobre os deuses do que se sujeitar ao destino dos físicos” (PRIGOGINE, 1996, p. 18). A física, já ali, era percebida como ameaça — não por seus resultados, mas por sua forma.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

A modernidade não dissolveu o dilema; conferiu-lhe autoridade. A lei newtoniana da gravitação reúne duas propriedades que, tomadas em conjunto, produzem o determinismo em sentido forte: ela é determinista, na medida em que condições iniciais dadas determinam univocamente a evolução do sistema; e é invariante sob a inversão do tempo, isto é, permanece válida quando se substitui t por $-t$. Dessas duas propriedades decorre a figura que Laplace tornou célebre: uma inteligência que conhecesse a posição e a velocidade de todas as partículas do universo em um instante dado poderia deduzir toda a história futura e toda a história passada. A mecânica quântica, observa Prigogine, não alterou esse quadro no essencial: a equação de Schrödinger é igualmente determinista e igualmente simétrica em relação ao tempo.

O ponto que Prigogine sublinha, e que interessa particularmente à epistemologia, é que essa concepção de lei não é neutra do ponto de vista teológico e cultural. A submissão da natureza a leis deterministas aproximava o conhecimento humano de um ponto de vista divino e atemporal — o Deus legislador do século XVII —, e a formulação de Leibniz nos *Novos ensaios*, citada na obra, exprime-o sem rodeios: na menor das substâncias, olhos suficientemente penetrantes poderiam ler imediatamente toda a sequência das coisas do universo. Prigogine acrescenta, com apoio em Joseph Needham, que a concepção de uma natureza passiva, submetida a leis externas, é uma especificidade da tradição ocidental, e não uma evidência universal do pensamento.

Contra esse ideal, a obra convoca uma linhagem de resistências. Kant, Hegel, Husserl, William James, Bergson, Whitehead e Heidegger são mencionados como pensadores que procuraram preservar a dimensão temporal da existência contra uma representação objetiva do mundo que a suprimia — sem, contudo, conseguirem conciliar inteligibilidade e liberdade. A citação de Popper (1988), retomada por Prigogine, dá a medida do que está em jogo: “Considero o determinismo laplaciano — confirmado, como parece estar, pelo determinismo das teorias físicas e pelo brilhante sucesso delas — o obstáculo mais sólido e mais sério no caminho de uma explicação e de uma apologia da liberdade, da criatividade e da responsabilidade humanas” (PRIGOGINE, 1996, p. 21). E a de Bergson (2006), na mesma página, formula a objeção decisiva em uma pergunta: de que serve o tempo, se tudo está dado?

É essencial notar a distância que Prigogine estabelece entre sua posição e duas outras que lhe poderiam parecer próximas. A primeira é o dualismo cartesiano, que resolve o problema separando a *res cogitans* da *res extensa* e deixando a natureza inteiramente ao determinismo. A segunda é o ceticismo pós-moderno, que ele associa a Richard Rorty e à “desconstrução”, e que converteria os problemas da tradição em temas de conversação civilizada, renunciando à pretensão de verdade. Prigogine recusa ambas: a primeira, por dividir o mundo em duas metades incomunicáveis; a segunda, por abdicar da tarefa que lhe parece propriamente científica. Sua resposta é de outra ordem: “arraigar o indeterminismo e a assimetria do tempo nas leis da física é a resposta que podemos dar hoje ao dilema de Epicuro” (PRIGOGINE, 1996, p. 23).

Essa formulação merece atenção porque contém a chave de todo o programa. Não se trata de acrescentar à física uma cláusula de humildade epistêmica, reconhecendo que nosso conhecimento é limitado; trata-se de modificar as leis, de modo que a indeterminação e a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

orientação do tempo pertençam a elas e não a nós. É a diferença entre dizer que não conseguimos prever e dizer que não há, na natureza, o que seria preciso haver para que a previsão completa fosse possível. Toda a dificuldade técnica da obra consiste em mostrar que a segunda afirmação pode ser sustentada com o rigor da primeira.

No capítulo final, Prigogine retoma essa genealogia em chave explicitamente histórica, apoiando-se em Stephen Toulmin (1990). O ideal cartesiano de certeza é ali recontextualizado: Descartes buscava, em um século XVII devastado por guerras de religião nas quais se matava em nome de dogmas, um tipo de certeza que todos os seres humanos pudessem partilhar independentemente de sua fé — daí o *cogito* e a exigência de fundar a ciência na matemática. Leibniz retomaria o programa procurando uma linguagem capaz de restabelecer a paz entre os homens. A busca de certeza, portanto, não foi apenas uma escolha epistemológica: foi uma resposta a uma situação histórica trágica. E Prigogine estende a análise a Einstein, para quem a ciência representava, em suas próprias palavras, uma fuga do tumulto da existência rumo às "regiões tranquilas das altas montanhas". A conclusão que extrai é sóbria: "o cientista não pode, como tampouco o homem urbano, escapar das cidades poluídas indo para as altas montanhas" (PRIGOGINE, 1996, p. 196). As ciências participam da construção da sociedade de amanhã, com todas as suas contradições e incertezas.

3 O PARADOXO DO TEMPO E A CRÍTICA À INTERPRETAÇÃO ANTROPOCÊNTRICA DA IRREVERSIBILIDADE

O século XIX legou à física uma herança dupla e incompatível. De um lado, as leis de Newton, que descrevem um universo estático, no qual passado e futuro desempenham papéis simétricos. De outro, o segundo princípio da termodinâmica, formulado por Rudolf Clausius em 1865 na fórmula que Prigogine cita: "A energia do universo é constante. A entropia do universo cresce na direção de um máximo" (PRIGOGINE, 1996, p. 25). Aqui, pela primeira vez, uma lei fundamental da física distingue o futuro do passado: os processos irreversíveis produzem entropia, e essa produção tem um sinal.

Foi Ludwig Boltzmann quem tentou reconciliar as duas heranças, e sua tentativa é apresentada por Prigogine como o episódio decisivo da história que examina. O caminho escolhido foi o de Darwin: raciocinar sobre populações, e não sobre indivíduos. O teorema H, de 1872, mostra que as colisões entre moléculas fazem decrescer uma certa função *H* até um mínimo, que corresponde à distribuição de equilíbrio de Maxwell-Boltzmann. As colisões apareciam, assim, como o mecanismo microscópico da irreversibilidade — e a flecha do tempo ganhava fundamento dinâmico.

As objeções não tardaram. O paradoxo de Loschmidt observava que, se as leis da dinâmica são simétricas, a inversão de todas as velocidades deveria produzir a evolução contrária, o que contradiz o teorema. O paradoxo de Zermelo invocava o teorema de recorrência de Poincaré: um sistema dinâmico limitado retorna, após tempo suficiente, arbitrariamente perto de seu estado inicial — logo, nenhum processo pode ser estritamente unidirecional. Boltzmann acabou por ceder. Renunciou ao vínculo entre colisões e irreversibilidade e reinterpretou o

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

equilíbrio como o estado macroscópico simplesmente *mais provável*; a irreversibilidade tornou-se consequência do caráter aproximado de nossa descrição. Prigogine é explícito quanto ao custo dessa retirada: “Foi a sua tragédia: tentou realizar na física o que Darwin conseguira na biologia — e fracassou” (PRIGOGINE, 1996, p. 26).

O ponto que interessa ao argumento da obra não é histórico, mas sistemático: essa interpretação derrotada tornou-se a ortodoxia, e é ela que Prigogine se propõe a desmontar. Em sua formulação corrente — exemplificada na obra pela leitura de Murray Gell-Mann (1996) —, macroestados agrupam microestados considerados equivalentes, e a entropia mede nossa ignorância acerca de qual microestado efetivamente se realiza. A flecha do tempo seria, portanto, um efeito de nossa descrição grosseira (*coarse grained*), não uma propriedade do mundo.

Prigogine apresenta contra essa leitura um conjunto articulado de objeções. A primeira é a do demônio de Maxwell: se a irreversibilidade decorre da imprecisão de nossa descrição, então um observador capaz de discriminar os microestados veria um mundo perfeitamente simétrico no tempo — o que equivale a dizer que a irreversibilidade desapareceria com o aperfeiçoamento do conhecimento. A segunda é empírica e, a meu ver, a mais contundente: os coeficientes de difusão, as condutividades térmicas e os tempos de relaxação são grandezas bem definidas, mensuráveis e reprodutíveis, independentes da precisão dos instrumentos com que os medimos. Se a irreversibilidade fosse artefato de nossa ignorância, tais grandezas deveriam variar com o grau de refinamento da observação — e não variam.

A terceira objeção desloca o eixo do problema. A identificação entre irreversibilidade e crescimento da desordem, consagrada pela vulgata do segundo princípio, é insuficiente. Prigogine recorre ao exemplo da difusão térmica: aplicando-se um gradiente de temperatura a uma mistura homogênea de dois gases, produz-se entropia — e, simultaneamente, destrói-se a homogeneidade, com um dos componentes concentrando-se preferencialmente na região quente e o outro na fria. O processo irreversível, aqui, *gera ordem*. A partir dessa constatação, e retomando as teses já apresentadas em *A nova aliança*, o autor formula três proposições que sustentam toda a obra: os processos irreversíveis são tão reais quanto os reversíveis; eles desempenham um papel construtivo na natureza; e exigem, para serem compreendidos, uma extensão da dinâmica (PRIGOGINE; STENGERS, 1997).

Há um argumento adicional, de natureza reflexiva, que merece registro. Se a flecha do tempo fosse ilusão produzida por nossa condição de observadores limitados, seria preciso explicar como observadores limitados vieram a existir em um universo sem flecha do tempo. Ora, a emergência da vida, e, portanto, de observadores, pressupõe processos irreversíveis afastados do equilíbrio. A explicação antropocêntrica é, nesse sentido, circular: pressupõe aquilo que deveria explicar. É o que condensa a frase do prólogo já citada — somos filhos da flecha do tempo, não seus autores.

Cabe uma observação crítica. A recusa da leitura antropocêntrica é, no plano dos argumentos, sólida; mas convém notar que Prigogine escreve em um debate no qual sua posição era minoritária, e permanece objeto de controvérsia entre físicos. Autores da mecânica estatística tradicional continuam a sustentar que a irreversibilidade macroscópica é compatível com a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

simetria temporal microscópica, mediante hipóteses sobre condições iniciais de baixa entropia no universo primitivo. A força do argumento prigoginiano não está em ter encerrado essa discussão — não a encerrou —, mas em ter mostrado que a alternativa antropocêntrica tem custos filosóficos elevados e consequências empíricas que merecem escrutínio.

4 O PAPEL CONSTRUTIVO DA IRREVERSIBILIDADE: ESTRUTURAS DISSIPATIVAS E BIFURCAÇÕES

A resposta positiva de Prigogine ao paradoxo do tempo começa no domínio em que sua contribuição científica é menos contestada: a termodinâmica dos sistemas afastados do equilíbrio. A partir da escola de Théophile de Donder, em Bruxelas, ele retoma a decomposição da variação de entropia em dois termos, $dS = d_eS + d_iS$, em que d_eS designa o fluxo de entropia através das fronteiras do sistema — que pode ser positivo ou negativo — e d_iS a produção interna de entropia, sempre positiva ou nula. Essa distinção, aparentemente técnica, tem consequência de princípio: o segundo princípio deixa de ser um enunciado restrito a sistemas isolados e passa a aplicar-se a sistemas abertos, isto é, a praticamente todos os sistemas de interesse na química, na biologia e nas ciências da Terra.

O caso do vivo ilustra o alcance da reformulação. Schrödinger (1997), em *O que é a vida?*, descrevera o metabolismo em termos de um fluxo de entropia negativo: o organismo em estado estacionário mantém $dS = 0$, o que implica $d_eS = -d_iS < 0$. Prigogine aceita a descrição, mas desloca a ênfase: o que caracteriza o vivo não é apenas absorver entropia negativa do ambiente, mas *produzir* entropia intensamente. A vida não é uma exceção ao segundo princípio; é uma de suas manifestações mais elaboradas.

Nas proximidades do equilíbrio, no chamado regime linear, o comportamento dos sistemas ainda é governado por um princípio extremal: o teorema do mínimo de produção de entropia, demonstrado por Prigogine em 1945 com apoio nas relações de reciprocidade de Onsager, estabelece que o estado estacionário minimiza a produção de entropia, o que garante a regressão das flutuações e, portanto, a estabilidade. Já aí, contudo, um traço inesperado aparece: o estado estacionário de não-equilíbrio pode ser *mais organizado* que o de equilíbrio, como mostra o exemplo da difusão térmica.

O quadro muda radicalmente longe do equilíbrio. Com Paul Glansdorff, Prigogine demonstrou que, nessa região, não existe mais função extremal alguma — nem energia livre, nem produção de entropia — cuja minimização determine o estado do sistema. Só é possível formular condições suficientes de estabilidade, reunidas no chamado critério geral de evolução. A consequência epistemológica é notável e frequentemente subestimada: perto do equilíbrio, as leis são universais, no sentido de que independem dos detalhes do sistema; longe do equilíbrio, tornam-se *específicas*, dependentes do tipo de processo irreversível envolvido. “Longe do equilíbrio, a matéria adquire novas propriedades em que as flutuações, as instabilidades desempenham um papel essencial: a matéria torna-se mais ativa” (PRIGOGINE, 1996, p. 68).

O mecanismo dessa atividade é a bifurcação. Considere-se um reator químico aberto no qual se pode variar a distância ao equilíbrio. Enquanto essa distância é pequena, o sistema

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

segue o que Prigogine chama de ramificação termodinâmica — o prolongamento, no domínio de não-equilíbrio, da solução que corresponde ao equilíbrio. A partir de um valor crítico, porém, essa ramificação torna-se instável, e surgem novas soluções estáveis: oscilações químicas, estruturas espaciais periódicas do tipo previsto por Alan Turing (1952) no contexto da morfogênese, ondas químicas propagantes. São essas as estruturas dissipativas — organizações espaço-temporais coerentes que só se mantêm mediante dissipação contínua de energia e que, diferentemente da ramificação termodinâmica, *aumentam* a produção de entropia.

Duas condições são necessárias para sua emergência: distância suficiente do equilíbrio e existência de etapas catalíticas ou autocatalíticas, em que um produto intervém em sua própria formação — condição universalmente satisfeita pelos organismos vivos por meio das enzimas. A confirmação experimental veio com a reação de Belousov-Zhabotinski, em que bilhões de moléculas alternam coletivamente de estado, tornando visível, na alternância de cor da solução, uma coerência de longo alcance inexistente no equilíbrio. É a essa coerência que se refere a fórmula que Prigogine gostava de repetir e que atravessa a obra: “Num tom metafórico, pode-se dizer que no equilíbrio a matéria é cega, ao passo que longe do equilíbrio ela começa a ver” (PRIGOGINE, 1996, p. 71).

O ponto de bifurcação introduz, ademais, um elemento probabilista irredutível na descrição. Quando o sistema atinge o valor crítico, as leis determinam quais ramos estão disponíveis, mas não qual deles será efetivamente escolhido: são as flutuações — irrelevantes perto do equilíbrio, decisivas ali — que decidem. Disso decorre uma característica de enorme alcance conceitual: um sistema submetido a uma sucessão de bifurcações adquire uma *história*. Observar o sistema em determinado estado permite inferir por quais bifurcações anteriores ele passou; a trajetória percorrida está inscrita no estado presente. A natureza física, aqui, torna-se narrável — não porque lhe atribuamos uma narrativa, mas porque a sucessão de escolhas efetivamente realizadas constitui uma sequência irreversível de eventos.

Prigogine extrai desse quadro uma inversão da narrativa das “feridas narcísicas” que Freud atribuíra à história das ciências. Se Copérnico deslocou a Terra do centro, Darwin retirou o homem do lugar de exceção e a psicanálise destituiu a consciência de sua soberania, a física de não-equilíbrio operaria em sentido contrário: mostraria que a criatividade humana não é estranha à natureza, mas amplificação de traços já presentes no mundo físico. A formulação que sintetiza essa reconciliação é bergsoniana e whiteheadiana ao mesmo tempo: “O possível é mais rico que o real. A natureza apresenta-nos, de fato, a imagem da criação, da imprevisível novidade. Nosso universo seguiu um caminho de bifurcações sucessivas: poderia ter seguido outros. Talvez possamos dizer o mesmo sobre a vida de cada um de nós” (PRIGOGINE, 1996, p. 75).

É preciso, no entanto, marcar o limite desse resultado. As estruturas dissipativas estabelecem o papel construtivo da irreversibilidade no nível macroscópico, mas não respondem à pergunta que constitui o paradoxo do tempo. Elas mostram *que* a irreversibilidade produz ordem; não mostram *de onde* a irreversibilidade vem. E Prigogine é inequívoco quanto à impossibilidade de contornar essa questão pela via da emergência simples: “Não seria o tempo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

uma propriedade emergente? Mas então é preciso descobrir as suas raízes. A flecha do tempo nunca emergirá de um mundo regido por leis temporais simétricas" (PRIGOGINE, 1996, p. 62). Essa frase é o eixo da obra: é ela que obriga o autor a descer ao nível microscópico e a propor uma extensão das leis fundamentais.

5 A RUPTURA DA EQUIVALÊNCIA ENTRE A DESCRIÇÃO INDIVIDUAL E A DESCRIÇÃO ESTATÍSTICA

Antes de expor o núcleo técnico da obra, convém registrar uma autocrítica que o próprio Prigogine formula e que ilumina o sentido de sua proposta. Em *Do ser ao devir*, publicado em 1980, ele havia apresentado a relação entre descrição dinâmica e descrição termodinâmica como uma complementaridade, à maneira de Bohr (PRIGOGINE, 2011). Em 1996 ele lamenta esse enunciado: se houvesse mais de uma descrição igualmente legítima, quem decidiria qual delas é a correta? "A existência de uma flecha do tempo não é uma questão de conveniência. É um fato imposto pela observação" (PRIGOGINE, 1996, p. 78). A solução, portanto, não pode ser a coexistência pacífica de dois pontos de vista, mas uma extensão da própria dinâmica — tese que ele desenvolveria também em *As leis do caos* (PRIGOGINE, 2002).

O núcleo técnico da obra é uma tese de aparência modesta e consequências consideráveis. Ela pode ser enunciada assim: para uma classe bem definida de sistemas dinâmicos — os sistemas instáveis —, a descrição em termos de trajetórias individuais e a descrição em termos de distribuições de probabilidade deixam de ser equivalentes, e apenas a segunda permite formular as leis da evolução.

Convém explicitar o que essa equivalência significa na física clássica. Um estado individual de um sistema mecânico é representado por um ponto no espaço das fases, cujas coordenadas são as posições e os momentos de todas as partículas. Um conjunto estatístico — o *ensemble* de Gibbs e Einstein — é representado por uma distribuição de probabilidade $\rho(q,p,t)$ sobre esse mesmo espaço. Para Gibbs e Einstein, o recurso a conjuntos era um expediente de cálculo, justificado por nossa ignorância das condições iniciais exatas; em princípio, tudo o que a distribuição diz poderia ser reconstituído a partir das trajetórias individuais que ela recobre, e a trajetória individual seria recuperada como caso-limite, representada por uma função delta de Dirac concentrada em um ponto.

Prigogine mostra que essa reconstituição é possível para sistemas estáveis e impossível para sistemas caóticos. O argumento é conduzido, com notável economia, sobre modelos de pouquíssimos graus de liberdade — o que constitui, a meu ver, o movimento retórico mais eficaz do livro. No gás de Boltzmann, com seus 10^{23} constituintes, sempre se podia invocar a impossibilidade prática de acompanhar as partículas; nos exemplos que Prigogine escolhe há uma ou duas variáveis apenas, e mesmo assim a irreversibilidade aparece. Como ele observa, "neste caso, não é concebível recorrer à nossa ignorância ou a aproximações e, contudo, a propriedade essencial que está na origem da irreversibilidade já aparece" (PRIGOGINE, 1996, p. 96-97).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

O primeiro modelo é a aplicação de Bernoulli, $x_{n+1} = 2x_n$ (módulo 1). Escrita na representação binária, ela equivale a um deslocamento: a cada iteração, cada dígito assume o valor daquele que o precedia. Como os dígitos de um número irracional são independentes entre si, a sequência gerada é tão aleatória quanto uma sucessão de lançamentos de moeda — em um sistema rigorosamente determinista. A sensibilidade às condições iniciais é imediatamente legível: dois números que diferem apenas no quadragésimo dígito binário — isto é, por menos de 2^{-39} — passarão a diferir de meia unidade após quarenta iterações. O expoente de Lyapunov, que mede a taxa de divergência exponencial de trajetórias vizinhas, vale aqui log 2.

O contraste entre os dois níveis de descrição é então dramático. Enquanto a trajetória individual permanece errática e imprevisível, a distribuição de probabilidade $\rho_n(x)$ converge rápida e regularmente para uma constante — a distribuição uniforme, que é o equilíbrio do sistema. Prigogine formula o resultado em uma frase que inverte a intuição corrente: “A instabilidade no nível da trajetória leva a um comportamento estável no nível da descrição estatística” (PRIGOGINE, 1996, p. 89). O nível estatístico não é, portanto, uma versão degradada do individual: é o nível em que o sistema exibe legalidade.

A razão técnica dessa assimetria está na estrutura espectral do operador de evolução das distribuições, o operador de Perron-Frobenius. Além do conjunto de soluções que reproduz a descrição por trajetórias, esse operador admite um segundo conjunto de funções próprias — os polinômios de Bernoulli, com valores próprios $1/2^m$ — que descrevem o amortecimento exponencial das contribuições e, portanto, tempos de relaxação bem definidos. Ocorre que essas novas soluções só têm sentido quando aplicadas a distribuições regulares; aplicadas às funções delta que representam trajetórias individuais, produziriam produtos de funções singulares, matematicamente destituídos de significado. Como sintetiza o autor, “a formulação estatística da aplicação de Bernoulli só diz respeito às funções de distribuição ρ normais, e não às trajetórias individuais que, como vimos, correspondem a funções singulares δ” (PRIGOGINE, 1996, p. 99). Para acomodar simultaneamente os dois tipos de função é preciso abandonar o espaço de Hilbert usual e trabalhar em espaços de Hilbert generalizados, ou espaços de Gelfand.

O segundo modelo, a transformação do padeiro, elimina uma objeção que se poderia dirigir ao primeiro. A aplicação de Bernoulli não é invertível, de modo que sua assimetria temporal poderia ser atribuída à própria equação. A transformação do padeiro — que achata um quadrado unitário em um retângulo e o recorta para reconstituir o quadrado, com uma coordenada dilatante e outra contratante, e expoentes de Lyapunov +log 2 e −log 2 — é, ao contrário, “invertível, reversível em relação ao tempo, determinista, recorrente e caótica” (PRIGOGINE, 1996, p. 106). Ela reúne, portanto, todas as propriedades em nome das quais se costuma negar a irreversibilidade, e é justamente nela que Prigogine mostra o surgimento de duas representações espectrais irredutíveis: uma aplicável ao futuro, com amortecimento; outra aplicável ao passado, com amplificação.

A escolha entre elas constitui o que o autor denomina princípio de seleção. Formalmente, no espaço de Hilbert a evolução constitui um grupo, no qual as duas direções do tempo permanecem indissociadas; nos espaços generalizados, esse grupo cinde-se em dois

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

semigrupos, e é preciso selecionar aquele em que o equilíbrio é alcançado em nosso futuro. O fundamento dessa seleção não é matemático, mas físico, e repousa em um fato de observação de generalidade máxima: “Todos os processos irreversíveis na natureza são caracterizados por uma mesma direção de sua flecha do tempo. Todos produzem entropia na mesma direção do tempo” (PRIGOGINE, 1996, p. 108).

Uma objeção previsível é enfrentada de modo direto. Poder-se-ia argumentar que, com precisão infinita na preparação das condições iniciais, a descrição por trajetórias continuaria válida. Prigogine compara essa objeção àquela que sustentasse que, sendo velocidades infinitas “imagináveis”, a relatividade seria dispensável. Trata-se, em ambos os casos, de uma idealização que a estrutura da teoria exclui: como observara Pierre Duhem já em 1906 (DUHEM, 2014), “a noção de trajetória só é um modo de representação adequado se a trajetória permanecer aproximadamente a mesma quando modificamos ligeiramente as condições iniciais” (PRIGOGINE, 1996, p. 95). Em um sistema caótico, essa robustez não existe — e um conceito que não é robusto não é um bom conceito físico.

A conclusão do movimento é formulada sem atenuantes: “quando estamos diante de sistemas instáveis, devemos formular as leis da dinâmica no nível estatístico. Isso, por certo, muda de maneira radical a nossa descrição da natureza, uma vez que os objetos fundamentais da física não são mais trajetórias ou funções de onda, mas sim probabilidades” (PRIGOGINE, 1996, p. 77-78). É este o sentido preciso em que as certezas terminam: não porque nada se possa saber, mas porque o objeto do saber deixou de ser aquilo que a tradição supunha ser.

6 RESSONÂNCIAS DE POINCARÉ E A EXTENSÃO DA DINÂMICA CLÁSSICA E QUÂNTICA

Os modelos de tempo discreto examinados na seção anterior cumprem função demonstrativa, mas não constituem, por si, uma reformulação da física. O passo seguinte da obra consiste em mostrar que a mesma ruptura ocorre nos sistemas dinâmicos reais, e a peça técnica que o permite é o teorema de não-integrabilidade de Poincaré.

Um sistema dinâmico é dito integrável quando suas variáveis podem ser redefinidas de modo a eliminar a energia potencial, tornando-o isomorfo a um conjunto de partículas livres — o que equivale a dizer que suas equações podem ser resolvidas exatamente. Poincaré (1995) demonstrou que a maioria esmagadora dos sistemas dinâmicos não é integrável, e identificou a causa: as ressonâncias entre graus de liberdade, isto é, relações numéricas simples entre suas frequências, do tipo $n_1\omega_1 + n_2\omega_2 = 0$. Tais relações fazem aparecer, nos desenvolvimentos perturbativos, denominadores que se anulam — os “pequenos divisores” já notados por Le Verrier em mecânica celeste —, e as séries divergem. Já o problema de três corpos é não integrável.

A tradição leu esse resultado como um obstáculo. Max Born, citado por Prigogine, exprimiu o sentimento corrente ao observar que seria notável se a natureza tivesse encontrado um meio de resistir ao progresso do conhecimento escondendo-se atrás do muro das

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

dificuldades analíticas do problema de *n* corpos. Prigogine propõe a inversão: as ressonâncias não são um obstáculo, mas a fonte de uma legalidade nova. Eliminadas no nível estatístico — onde não produzem divergências, mas termos difusivos —, elas quebram simultaneamente o determinismo e a simetria temporal.

O argumento decisivo é de natureza conceitual, e merece destaque porque é frequentemente omitido nas apresentações resumidas da obra. As ressonâncias são condições sobre *frequências*, não eventos localizados em um ponto do espaço e em um instante do tempo. Elas introduzem, portanto, um elemento estranho à própria noção de trajetória, que é por definição uma descrição local. Não se trata, aqui, de uma limitação de nossa capacidade de cálculo, mas de uma incompatibilidade entre o tipo de objeto que a ressonância é e o tipo de objeto que a trajetória é. Essa é a razão pela qual a extensão da dinâmica não pode ser feita no nível individual.

Duas condições físicas delimitam o domínio de validade da reformulação. A primeira é a persistência das interações. Nas interações transitórias — o *scattering* de laboratório, em que um feixe se aproxima, interage e se afasta — os efeitos novos não aparecem. Nas interações persistentes — as moléculas de um gás, que nunca cessam de colidir — aparecem. A segunda condição é o limite termodinâmico, com o número de partículas e o volume tendendo ao infinito e sua razão permanecendo finita, o que caracteriza os chamados grandes sistemas de Poincaré. Prigogine insiste que esse limite não é um artifício de cálculo, mas a condição de existência de propriedades reais como as transições de fase. Um sistema finito não tem estados sólido, líquido e gasoso bem definidos; a distinção entre eles só existe no limite.

Nesse quadro, o autor constrói uma representação espectral do operador de Liouville — o operador que governa a evolução das distribuições de probabilidade — fora do espaço de Hilbert. A justificativa física é a mesma da seção anterior, agora aplicada a sistemas contínuos: interações persistentes exigem distribuições de probabilidade não localizadas, cuja transformada de Fourier é singular, ao passo que a trajetória é precisamente o caso extremo de localização. Os valores próprios complexos assim obtidos produzem contribuições que decaem no futuro e divergem no passado, e é dessa estrutura que decorre a quebra de simetria temporal. O resultado é o que Prigogine chama de descrição probabilista irredutível: “Obtemos, portanto, uma descrição probabilista irredutível, caracterizada por uma quebra da simetria temporal. O conflito entre o tempo reversível da dinâmica e o tempo orientado da termodinâmica é, assim, resolvido no próprio interior da dinâmica, sem interferência de elementos extrínsecos” (PRIGOGINE, 1996, p. 114).

Convém sublinhar a modéstia com que o autor delimita o alcance da tese. O indeterminismo aqui defendido não é ausência de previsibilidade: “O indeterminismo, defendido por Whitehead, Bergson ou Popper, impõe-se doravante na física. Mas ele não deve ser confundido com a ausência de previsibilidade, que tornaria ilusória toda ação humana. É de limite à previsibilidade que se trata” (PRIGOGINE, 1996, p. 115). A distinção é essencial e frequentemente perdida nas apropriações da obra: o que se afirma é a existência de horizontes de previsibilidade, não a impossibilidade de prever.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

A transposição do argumento para a mecânica quântica ocupa o capítulo mais técnico do livro e responde ao que Prigogine chama de paradoxo quântico. A teoria quântica, tal como codificada por von Neumann, repousa em uma estrutura dualista: de um lado, a equação de Schrödinger, determinista e simétrica no tempo, que governa a evolução da função de onda; de outro, a redução da função de onda, processo irreversível associado à medição, que converte um caso puro em uma mistura. Não há, na teoria, critério que determine quando abandonar o primeiro processo pelo segundo, nem interpretação realista consensual do segundo — o que abriu espaço para as soluções que invocam a consciência do observador, os universos múltiplos ou a decoerência ambiental. Roger Penrose (1991), a quem Prigogine se refere com apreço, classificara essa dualidade entre os "paradoxos" propriamente ditos da teoria — aqueles que não se deixam dissolver por refinamento interpretativo.

A tese de Prigogine é que o paradoxo quântico é um caso particular do paradoxo do tempo, e que a mesma solução resolve ambos. Como as ressonâncias de Poincaré aparecem também nos sistemas quânticos de espectro contínuo, obtém-se para eles uma formulação estatística fora do espaço de Hilbert, na qual a grandeza fundamental deixa de ser a amplitude de probabilidade e passa a ser a probabilidade: "nesta nova formulação, a grandeza fundamental não é mais a amplitude de probabilidade, mas sim a própria probabilidade" (PRIGOGINE, 1996, p. 138). A redução da função de onda deixa de exigir uma intervenção externa e passa a ser um processo dinâmico produzido pelas ressonâncias. Segue-se o resultado que o autor considera decisivo do ponto de vista epistemológico: um aparelho de medida deve ser um grande sistema de Poincaré com simetria temporal quebrada, e "os GSPs medem-se a si mesmos, por assim dizer. A atualização das potencialidades contidas nas funções de onda se faz graças aos GSPs" (PRIGOGINE, 1996, p. 155). O observador perde o estatuto de demiurgo responsável pela atualização das potencialidades da natureza.

É importante registrar, por honestidade intelectual, que essa proposta não obteve consenso na comunidade de física. A formulação de Bruxelas-Austin permanece minoritária diante das abordagens de decoerência hoje dominantes, e as objeções técnicas dirigidas às representações espectrais fora do espaço de Hilbert nunca foram inteiramente respondidas. Isso não invalida o interesse epistemológico do programa, mas recomenda cautela a quem o invoca como resultado consolidado da física contemporânea. O que a obra estabelece com segurança é a formulação de um problema e a demonstração de que a saída antropocêntrica tem custos; o que ela propõe como solução é um programa de pesquisa, e como tal deve ser apresentado.

7 A EXTENSÃO COSMOLÓGICA: "O TEMPO PRECEDE A EXISTÊNCIA"

O capítulo oitavo da obra abre com uma anedota que Prigogine visivelmente aprecia. Convidado pelo físico Ivanenko a escrever uma frase na parede da Universidade Lomonossov, em Moscou, ao lado de frases deixadas por Dirac e Bohr, ele hesitou e escreveu: "O tempo precede a existência" (PRIGOGINE, 1996, p. 169). A frase condensa a extensão cosmológica de todo o argumento.

A questão que ela responde é a seguinte: se a flecha do tempo é propriedade da natureza e não do observador, e se ela é universal — todos os processos irreversíveis apontando na

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

mesma direção —, então ela deve ter uma origem cosmológica. Ora, a cosmologia padrão situa a origem do universo em uma singularidade inicial, na qual as leis conhecidas deixam de valer, e Stephen Hawking (1988) havia proposto, com o expediente do "tempo imaginário", uma descrição em que as quatro dimensões se tornam espaciais e o universo aparece como estrutura eterna e puramente geométrica. Prigogine recusa esse caminho pela mesma razão que recusa a leitura antropocêntrica da irreversibilidade: ele elimina o tempo em vez de explicá-lo.

Sua proposta é substituir a singularidade pela instabilidade: "O ponto essencial é que o nascimento de nosso universo não está mais associado a uma singularidade, mas sim a uma instabilidade, com certa analogia com uma transição de fase ou com uma bifurcação" (PRIGOGINE, 1996, p. 187). O modelo, desenvolvido com Jules Géhéniau, Edgard Gunzig e Pasquale Nardone a partir dos trabalhos de Brout, Englert e Gunzig, apoia-se na constatação de que a energia gravitacional é negativa e a energia da matéria positiva, de modo que a energia total do universo pode ser nula — a hipótese do "almoço grátis" formulada por Edward Tryon. A criação de matéria a partir do vácuo quântico torna-se então possível sem violação da conservação da energia, e o preço é pago não em energia, mas em entropia: "O nascimento de nosso universo traduz-se por uma explosão de entropia" (PRIGOGINE, 1996, p. 189).

A analogia com as estruturas dissipativas é explícita e vale registrá-la, porque revela a unidade do pensamento prigoginiano. Assim como uma célula de convecção só existe enquanto atravessada por um fluxo dissipativo, o universo aparece como um sistema afastado do equilíbrio cujas "estruturas dissipativas" são a própria matéria e o espaço-tempo curvo. E, assim como o segundo princípio rompe a equivalência entre trabalho e calor estabelecida pelo primeiro, ele romperia a equivalência entre geometria e matéria estabelecida pelas equações de Einstein, conferindo direção ao processo: a conversão de espaço-tempo em matéria é dissipativa, e o processo inverso está excluído.

A consequência que o autor extrai é a mais especulativa da obra, e ele o reconhece. Como não há estado fundamental estável para o campo conforme envolvido no modelo, o processo não se detém no nascimento de nosso universo: ele se aplicaria a um meta-universo no qual um número indefinido de universos pode nascer, e no qual o lugar e o momento de cada nascimento têm significado apenas estatístico, ligado a flutuações quânticas. Daí a formulação: "Nesta perspectiva, o tempo é eterno. Temos uma idade, nossa civilização tem uma idade, nosso universo tem uma idade, mas o tempo, por seu lado, não tem nem começo nem fim" (PRIGOGINE, 1996, p. 173).

Duas observações críticas são devidas. A primeira é que Prigogine é escrupuloso ao demarcar o estatuto dessas proposições. Já no prólogo advertira que, nas fronteiras do conhecimento, raciocínio físico e especulação dificilmente se demarcam, e que seria prematuro falar de demonstração ou de prova; o que se pode fazer é analisar possibilidades conceituais. Essa cautela contrasta favoravelmente com o tom de algumas apropriações posteriores de sua obra.

A segunda observação diz respeito à função argumentativa do capítulo. O modelo cosmológico não é uma consequência necessária da tese sobre a irreversibilidade; é antes uma

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

verificação de consistência. Se a flecha do tempo é universal, ela não pode ter surgido em algum ponto da história do universo — teria de ser tão antiga quanto o universo, ou mais. O capítulo mostra que existe pelo menos um modelo cosmológico compatível com essa exigência. Que ele seja o modelo correto é outra questão, e Prigogine não pretende tê-la resolvido.

8 A NOVA RACIONALIDADE: DIÁLOGO COM A NATUREZA, ÉTICA E O CAMINHO ESTREITO

O capítulo sétimo da obra, situado entre os desenvolvimentos técnicos e a extensão cosmológica, formula em chave epistemológica o que os demais estabelecem em chave física. Sua tese é que a ciência é um diálogo com a natureza, e que esse diálogo pressupõe a realidade do devir: “A ciência é um diálogo com a natureza. [...] Um mundo simétrico em relação ao tempo seria um mundo incognoscível. [...] A realidade do devir é a condição *sine qua non* de nosso diálogo com a natureza” (PRIGOGINE, 1996, p. 157).

O argumento é mais forte do que a fórmula sugere. Toda medição pressupõe que o sistema observado possa afetar o observador, produzindo nele um registro que persiste. Ora, um registro que persiste é, por definição, uma assimetria entre o antes e o depois. Se o mundo fosse temporalmente simétrico em todos os seus níveis, não haveria registros, não haveria memória e não haveria conhecimento. A irreversibilidade não é, portanto, um dado empírico entre outros: é a condição de possibilidade da experiência que fundamenta a própria física que a nega. Há aqui uma estrutura transcendental, no sentido kantiano do termo, embora Prigogine não use essa linguagem.

Da mesma página vem uma distinção que merece ser retida por quem trabalha com formação científica: “Compreender a natureza foi um dos grandes projetos do pensamento ocidental. Ele não deve ser identificado com o de controlar a natureza. Seria cego o senhor que acreditasse compreender seus escravos sob pretexto de que eles obedecem às suas ordens” (PRIGOGINE, 1996, p. 157). A imagem é dura e o alvo é preciso: a redução da inteligibilidade à capacidade de predizer e manipular. Um mundo inteiramente controlável seria um mundo do qual nada haveria a aprender, e Prigogine associa esse ideal — sem tempo, sem memória e sem história — aos pesadelos romanescos de Huxley, Orwell e Kundera.

O capítulo introduz ainda a noção de tempo entrópico, cuja consequência é mais radical do que costuma ser notado. Se o fluxo do tempo está enraizado nas ressonâncias, e se estas dependem do hamiltoniano do sistema, então dois sistemas submetidos a condições diferentes envelhecem diferentemente. Duas amostras quimicamente idênticas, uma delas na presença de um catalisador, produzem entropias distintas e, nesse sentido preciso, têm fluxos de tempo distintos. Prigogine conclui: “A conclusão essencial é que, mesmo num universo newtoniano, o fluxo do tempo não é único” (PRIGOGINE, 1996, p. 164). O tempo deixa de ser o continente universal dos eventos e passa a ser propriedade dos processos.

O capítulo final da obra recolhe as consequências éticas e é, do ponto de vista de um leitor das ciências humanas, o mais denso. Prigogine constrói ali uma simetria argumentativa notável. De um lado, examina a recusa de Einstein diante do modelo cosmológico de Gödel, que

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

admitia viagens ao próprio passado: Einstein, por maior que fosse sua atração pela eternidade, não pôde aceitar essa consequência lógica de suas próprias ideias, porque aceitar o retorno ao passado equivale a negar a realidade do mundo. E convoca Borges (2007), que em “Uma nova refutação do tempo” expõe as doutrinas que fazem do tempo uma ilusão e conclui com o célebre “E no entanto, no entanto...”. A lição extraída é inequívoca: “Negar o tempo pode parecer um consolo ou aparecer como o triunfo da razão humana, é sempre uma negação da realidade” (PRIGOGINE, 1996, p. 197).

De outro lado, e é aqui que o argumento ganha seu equilíbrio, Prigogine recusa com igual firmeza a solução oposta: “O acaso puro é tanto uma negação da realidade e de nossa exigência de compreender o mundo quanto o determinismo o é” (PRIGOGINE, 1996, p. 197). Um mundo em que tudo estivesse decidido de antemão e um mundo em que nada pudesse ser descrito em termos gerais são igualmente inabitáveis para o pensamento, e ambos, por caminhos opostos, dispensam o trabalho da ciência.

Entre essas duas negações situa-se o que dá título ao último capítulo:

> O que procuramos construir é um caminho estreito entre essas duas concepções que levam igualmente à alienação, a de um mundo regido por leis que não deixam nenhum lugar para a novidade, e a de um mundo absurdo, acausal, onde nada pode ser previsto nem descrito em termos gerais (PRIGOGINE, 1996, p. 198).

A fórmula que sintetiza essa terceira via é de uma concisão notável: “As leis não governam o mundo, mas este tampouco é regido pelo acaso. As leis físicas correspondem a uma nova forma de inteligibilidade que as representações probabilistas irredutíveis exprimem” (PRIGOGINE, 1996, p. 199). Não se trata de enfraquecer a noção de lei, mas de redefini-la: uma lei descreve o campo dos possíveis e a estrutura de suas probabilidades, sem reduzir os eventos a consequências dedutíveis dela.

Três implicações merecem destaque para o debate epistemológico contemporâneo.

A primeira diz respeito à criatividade. Prigogine observa que a criatividade científica é frequentemente subestimada em comparação com a artística: se Shakespeare, Beethoven ou Van Gogh tivessem morrido prematuramente, ninguém teria realizado suas obras, ao passo que se supõe que a ciência, sendo empreendimento coletivo submetido a critérios rigorosos, teria chegado de qualquer modo aos mesmos resultados. Ele reconhece o que há de verdadeiro nesse contraste, mas conclui que os constrangimentos da prática científica não eliminam a criatividade — são desafios para ela. A própria formulação do paradoxo do tempo é apresentada como exemplo extraordinário de imaginação humana.

A segunda diz respeito à situação do ser humano na natureza. Ele não é demiurgo, responsável por atualizar as potencialidades do mundo pela observação — essa é a figura que a reformulação da mecânica quântica dissolve. Mas tampouco é espectador de um espetáculo já escrito. É participante de um diálogo, e o que caracteriza esse diálogo é que a dificuldade se converte em recurso: a sensibilidade às condições iniciais e as ressonâncias de Poincaré, que a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

física clássica registrava como fraquezas de seu edifício, tornam-se o ponto de partida de uma linguagem nova.

A terceira é propriamente ética e articula-se à genealogia histórica examinada na seção 2. Se a busca de certeza absoluta nasceu, com Descartes, em um contexto de guerras travadas em nome de dogmas, então a crítica das certezas não é um exercício acadêmico: ela toca a relação entre conhecimento e violência. E a conclusão que Prigogine extrai não é cética, mas afirmativa: as ciências participam da construção da sociedade de amanhã e não podem renunciar à esperança. A obra encerra-se em abertura, e não em resposta: “Discernimos novos horizontes, novas questões, novos riscos. Vivemos um momento privilegiado da história das ciências” (PRIGOGINE, 1996, p. 199).

Cabe, para concluir esta seção, uma advertência sobre os usos da obra. A tese de que “as leis não governam o mundo” tem sido invocada em contextos muito distantes daquele em que foi formulada, por vezes para autorizar a suspensão de exigências de rigor metodológico. Nada há em Prigogine que sustente esse uso. O indeterminismo que ele defende é resultado de demonstração, não de renúncia à demonstração; os limites de previsibilidade que estabelece são limites determinados, calculáveis, associados a expoentes de Lyapunov e a tempos de relaxação bem definidos. A distinção que ele próprio faz — indeterminismo não é ausência de previsibilidade, mas limite à previsibilidade — é a barreira que separa sua posição de um relativismo que ele explicitamente recusou ao criticar a “desconstrução” pós-moderna. Transpor a obra para as ciências humanas é legítimo e fecundo; transpô-la como licença para a imprecisão é traí-la.

9 A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL COMO BIFURCAÇÃO: O FIM DAS CERTEZAS NA SOCIEDADE DO SÉCULO XXI

A seção anterior encerrou-se com uma advertência sobre os usos da obra, e a transposição que agora se propõe corre justamente o risco ali denunciado. Falar de inteligência artificial a partir de *O fim das certezas* pode facilmente degenerar naquele gênero de comentário que empresta ao objeto contemporâneo um vocabulário físico que ele não sustenta, produzindo o efeito de profundidade sem o custo da demonstração. Há, contudo, uma razão para correr o risco, e ela não é de oportunidade. A inteligência artificial não é um objeto qualquer entre os que se poderiam examinar com o instrumental prigoginiano: é a tecnologia na qual a tensão entre lei e possibilidade, entre previsão e novidade, deixou de ser questão de epistemólogos e tornou-se problema prático de sociedades inteiras. Examiná-la à luz da obra exige, por isso, quatro movimentos e uma delimitação: o estatuto epistêmico das máquinas probabilistas; a produção do conhecimento científico quando a previsão se dissocia da compreensão; a sociedade contemporânea como sistema afastado do equilíbrio; e a ética do caminho estreito aplicada à governança. O quinto movimento, que fecha a seção, é o do reconhecimento dos limites da própria analogia.

Convém começar por uma ironia histórica que raramente é notada. A máquina de computar nasceu como a última figura do demônio de Laplace. Turing (1950), ao formular o jogo da imitação, raciocinava sobre um dispositivo cujo comportamento era, em princípio, inteiramente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

determinado por sua tabela de estados: dado o estado inicial e a entrada, o resto seguia-se por necessidade. A cibernética de Wiener (1961) organizou-se em torno da noção de controle por retroalimentação, isto é, da correção do desvio em direção a um alvo previamente fixado. E Shannon (1948), ao construir a teoria matemática da comunicação, tomou de empréstimo à termodinâmica o próprio nome de *entropia* para designar a incerteza de uma fonte — de modo que, no exato período em que a física discutia se a irreversibilidade era propriedade da natureza ou limitação do observador, a engenharia da informação incorporava o conceito como medida de ignorância. O tema deste ensaio atravessa a computação desde o seu nascimento.

A ruptura veio do interior da própria disciplina. Os sistemas hoje reunidos sob o nome de inteligência artificial — aprendizado estatístico, redes profundas, modelos generativos — não computam uma função conhecida de antemão: ajustam parâmetros a uma distribuição de probabilidade estimada sobre dados, e sua saída é o resultado de uma amostragem sobre essa distribuição. A mesma pergunta não produz a mesma resposta. A máquina que fora o emblema do determinismo passou a operar exprimindo possibilidades, e não certezas. A fórmula do prólogo da obra, transposta para esse domínio, descreve o funcionamento desses sistemas com fidelidade desconcertante — e é precisamente essa fidelidade que exige cautela.

Cautela porque o preceito estabelecido nas seções anteriores obriga a distinguir dois probabilismos. Todo o argumento de Prigogine repousa na diferença entre a probabilidade como expressão de nossa ignorância, que preserva intacto o edifício determinista, e a probabilidade inscrita na própria lei, que o modifica. Ora, o probabilismo de um modelo de linguagem pertence, em princípio, ao primeiro gênero: é uma escolha de modelagem, não uma propriedade do substrato. A rede executa-se sobre um substrato computacional determinista, e fixar a semente do gerador pseudoaleatório reproduz a saída. Quem afirma que a inteligência artificial "confirma" Prigogine comete exatamente a confusão que a obra se dedicou a desfazer. O que se sustenta aqui é mais modesto e, por isso mesmo, defensável: trata-se de analogia estrutural, com valor heurístico, e não de aplicação nem de corroboração.

Feita a ressalva, a heurística não é trivial. Considere-se o argumento, corrente entre pesquisadores da área, de que a opacidade desses sistemas é provisória — que avanços suficientes em interpretabilidade permitiriam reconstituir integralmente as razões de cada saída. Formalmente, esse argumento tem a mesma estrutura da leitura antropocêntrica da irreversibilidade examinada na seção 3: atribui à limitação do observador aquilo que talvez pertença ao objeto, e projeta um observador ideal — um demônio de Maxwell da interpretabilidade — capaz de discriminar os microestados, aqui os pesos da rede, e de ler neles a determinação do comportamento macroscópico. A diferença é decisiva e deve ser registrada: no caso de Prigogine, existe um teorema de não-integrabilidade que proíbe a reconstituição; no caso das redes profundas, não há resultado análogo, e a questão permanece empiricamente aberta. Há razões para suspeitar da resposta afirmativa — a escala dos parâmetros, a não linearidade, a sensibilidade da saída à formulação da entrada —, mas suspeita não é demonstração, e a diferença entre uma e outra é o que separa este ensaio do gênero que ele recusa.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

Existe, porém, um ponto em que a correspondência ultrapassa a analogia solta, e é o da historicidade. Um modelo treinado é um objeto com história no sentido preciso que a seção 4 estabeleceu: seu estado presente não é dedutível de sua arquitetura e de sua função objetivo, porque carrega a memória do caminho percorrido — o corpus de dados, a ordem em que os exemplos foram apresentados, as sementes aleatórias, as escolhas humanas na fase de alinhamento. Dois modelos de arquitetura idêntica, treinados sob condições ligeiramente distintas, divergem de modo irrecuperável. A explicação de porquê um sistema desses se comporta como se comporta é, no sentido rigoroso do termo, irredutivelmente narrativa: exige reconstituir a trajetória, e não apenas exibir as leis. Reencontra-se aqui, realizado num artefato, o segundo dos três deslocamentos conceituais que a quarta conclusão deste ensaio identifica como o legado transponível da obra.

O segundo movimento diz respeito à produção do conhecimento científico. O caso exemplar é o da predição de estruturas de proteínas: Jumper e colaboradores (2021) demonstraram ser possível prever, com acurácia comparável à das técnicas experimentais, a conformação tridimensional de uma cadeia polipeptídica, sem que dessa predição resulte uma teoria inteligível do enovelamento. O ganho científico é imenso e não está em discussão. O que está em discussão é o que essa forma de sucesso autoriza a concluir. Anderson (2008) formulou a conclusão máxima na forma provocativa do “fim da teoria”: com dados em quantidade suficiente, a correlação bastaria, e o método científico — hipótese, modelo, teste — tornar-se-ia obsoleto. A tese é fraca e foi amplamente criticada, mas sua versão atenuada opera silenciosamente em muitos programas de pesquisa: prever bem passa a valer como compreender.

É neste ponto que o capítulo epistemológico da obra, examinado na seção 8, deixa de ser comentário e torna-se critério. A distinção que Prigogine ali estabelece entre compreender e controlar a natureza, condensada na imagem do senhor que se julga conhecedor de seus escravos porque lhes obtém obediência, antecipa com precisão a situação. Um sistema que prevê sem modelo inteligível oferece controle sem compreensão; nada há de ilegítimo nisso enquanto a diferença for mantida, e tudo se perde quando ela é apagada. O argumento mais forte, contudo, é o outro: se a ciência é diálogo com a natureza, então ela pressupõe que quem pergunta possa ser surpreendido e modificado pela resposta. Um aparato que devolve respostas de alta acurácia e conteúdo explicativo nulo não participa desse diálogo — responde sem ensinar a perguntar. O risco do século XXI não é que as máquinas pensem; é que a dificuldade cognitiva, que é o lugar onde a formação científica efetivamente ocorre, se torne facultativa.

A consequência para a formação e para o sistema editorial é direta e merece registro, pois toca o trabalho cotidiano de quem forma pesquisadores e avalia manuscritos. Delegar a construção do estado da arte, a redação do método ou a interpretação dos resultados a um sistema generativo não produz apenas texto de qualidade variável: produz pesquisadores que nunca atravessaram a dificuldade de formular um problema. Bender e colaboradores (2021) chamaram a atenção para o fato de que modelos de linguagem otimizam a plausibilidade da forma, não a verdade do conteúdo — o que, no domínio científico, se manifesta em referências

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

inexistentes, atribuições falsas e sínteses que reproduzem o consenso aparente de um corpus em vez de examiná-lo. Mitchell (2019) observa, na mesma direção, que a competência desses sistemas é estreita e frágil fora da distribuição em que foram treinados. Seria unilateral, no entanto, encerrar aqui: os mesmos instrumentos ampliam o acesso à literatura internacional, reduzem a barreira linguística que penaliza sistematicamente pesquisadores de países periféricos e permitem análises de dados antes inviáveis. O que se exige não é a recusa, mas a manutenção da diferença entre o que a ferramenta faz e o que o pesquisador deve continuar fazendo.

O terceiro movimento desloca o exame do laboratório para a sociedade, e é onde a transposição se torna mais fecunda e mais arriscada. Sustenta-se aqui que a sociedade do início do século XXI satisfaz, em sentido analógico, as duas condições que Prigogine estabeleceu como necessárias à emergência de estruturas dissipativas. A primeira é a distância suficiente do equilíbrio: crise climática, transição demográfica, rearranjo geopolítico e saturação do ambiente informacional constituem, em conjunto, um regime de fluxos intensos e desequilíbrios persistentes, e não um estado estacionário próximo ao equilíbrio. A segunda condição, a existência de etapas autocatalíticas, é satisfeita de modo literal e não apenas metafórico: sistemas de inteligência artificial são hoje empregados no projeto dos circuitos, na escrita do código, na curadoria dos dados e no treinamento dos modelos que produzirão a geração seguinte de sistemas de inteligência artificial. Um produto que intervém na própria formação é a definição técnica de autocatálise.

A consequência dessa configuração é conhecida fora da física sob outro nome. Retroalimentação positiva em presença de retornos crescentes produz dependência de trajetória e aprisionamento em configurações que não são as mais eficientes, mas as que se estabilizaram primeiro — o mecanismo que Arthur (1994) formalizou para a economia e que Crawford (2021) documenta, no caso da inteligência artificial, na concentração de capacidade computacional, insumos energéticos e dados em um número reduzido de atores. É o regime de bifurcação: pequenas diferenças amplificam-se, e a escolha entre os ramos disponíveis não é determinada pelas “leis” do sistema — o mercado, a racionalidade técnica, a curva de custos —, mas por flutuações, isto é, por decisões de pequena amplitude tomadas no momento crítico. Aqui reside o ponto propriamente político da transposição, e ele é preciso: é exatamente no ponto de bifurcação que decisões de pequena amplitude têm efeito desproporcional, e é depois de tomado o ramo que o sistema reingressa em um regime quase determinista, no qual as alternativas, ainda que pensáveis, deixaram de estar disponíveis. A irreversibilidade não é, aqui, figura de retórica: é o nome técnico daquilo que faz de uma escolha uma escolha.

Desse quadro decorre a recusa simultânea dos dois gêneros de discurso que hoje dominam o debate público sobre o tema. O primeiro é o determinismo tecnológico, que enuncia o futuro no modo da inevitabilidade: a inteligência artificial eliminará tal proporção de postos de trabalho, a inteligência geral é questão de tempo, a adaptação é a única política disponível. Trata-se, na forma, do demônio de Laplace em trajes contemporâneos, com a peculiaridade de que a dedução do futuro a partir do presente é feita por extrapolação de curvas em vez de integração

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

de equações — o que a torna mais frágil, não mais robusta. O segundo gênero é o seu simétrico: o discurso da imprevisibilidade radical, segundo o qual nada pode ser dito, tudo é exagero ou vertigem, e por isso não faz sentido planejar. Um e outro, como a conclusão final deste ensaio observa a respeito do determinismo e do acaso puro, dispensam o esforço de conhecer — o primeiro porque tudo já estaria decidido, o segundo porque nada se deixaria apreender. A posição prigoginiana entre eles é a mais exigente: descrever o campo de possíveis, identificar quais ramos estão disponíveis, estimar sob que condições cada um se estabiliza e reconhecer que a escolha entre eles não está escrita.

O quarto movimento é ético, e recolhe o que o capítulo final da obra estabelece. Se a responsabilidade só tem sentido em um mundo que não é nem inteiramente determinado nem inteiramente aleatório, então os dois discursos recusados no parágrafo anterior partilham uma função que raramente é explicitada: ambos são álibis. O determinismo tecnológico absolve, porque ninguém decide aquilo que era inevitável; a imprevisibilidade radical absolve igualmente, porque ninguém responde por aquilo que não podia ser previsto. Cabe notar — e a observação é empírica, não retórica — que os dois discursos são frequentemente emitidos pelos mesmos atores, em alternância conforme a conveniência: a inevitabilidade quando se trata de justificar o desenvolvimento, a imprevisibilidade quando se trata de responder por seus efeitos. Restabelecer o caminho estreito entre eles é, antes de qualquer prescrição normativa, a condição para que exista destinatário da pergunta pela responsabilidade.

É sob essa condição que os instrumentos de governança adquirem sentido, e a obra oferece para pensá-los uma imagem inesperadamente exata. Na seção 5 examinou-se o princípio de seleção pelo qual, cindido o grupo de evolução em dois semigrupos, escolhe-se aquele compatível com a preparação efetivamente realizável a partir de nosso passado. Os marcos normativos operam como um princípio de seleção invertido no eixo do tempo: selecionam, entre os ramos disponíveis, aquele compatível com um futuro que a coletividade possa subscrever. A Recomendação sobre a Ética da Inteligência Artificial (UNESCO, 2021), o Regulamento (UE) 2024/1689 (UNIÃO EUROPEIA, 2024), o Projeto de Lei n. 2.338/2023 em tramitação no Congresso Nacional (BRASIL, 2023) e os protocolos técnicos de padronização examinados por Alves Correia et al. (2026) são tentativas de constituir esse princípio. Sua eficácia é incerta e legitimamente disputada; Russell (2019) argumenta que o problema do controle precisa estar inscrito no projeto dos sistemas, e não apenas na regulação de seu uso, enquanto Floridi (2014) sustenta que a transformação em curso é de ordem ambiental e não instrumental, o que desloca a questão da conduta individual para o desenho da infosfera. O ponto essencial, contudo, não é qual instrumento funciona: é que instrumento algum faz sentido sob a hipótese de que a trajetória está dada.

Resta um instrumento conceitual da obra que raramente é mobilizado neste debate e que talvez seja o mais preciso. Trata-se da noção de tempo entrópico, examinada na seção 8: se o fluxo do tempo se enraíza nas ressonâncias, e se estas dependem das condições a que o sistema está submetido, então sistemas distintos envelhecem de modo distinto, e não há um tempo único no qual todos se inscrevam. Transposta com a devida prudência, a noção esclarece

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

o problema central da governança: o desenvolvimento técnico e o desenvolvimento institucional possuem tempos internos incomensuráveis. O intervalo entre o momento em que uma tecnologia se estabiliza e o momento em que as instituições produzem resposta adequada não é falha administrativa a ser corrigida com eficiência processual; é propriedade estrutural do acoplamento entre sistemas de naturezas diferentes. Uma política de governança que ignora isso chega sempre tarde, porque persegue um estado já ultrapassado; uma que o reconhece trabalha por antecipação, isto é, atua enquanto a flutuação ainda é amplificável — antes que a bifurcação se resolva.

Cabe encerrar esta seção voltando contra ela mesma a advertência formulada ao final da seção 8. A sociedade não é um reator químico; “bifurcação”, “autocatálise” e “distância do equilíbrio” não possuem, aqui, medida, equações nem critério de refutação; e nada do que se argumentou acima tem estatuto de demonstração. Convém, por isso, distinguir três níveis de legitimidade na transposição. O primeiro é o do deslocamento epistemológico — a passagem da certeza à possibilidade como forma de inteligibilidade —, que é transponível com plena legitimidade, porque diz respeito à forma do conhecimento e não a um mecanismo físico particular. O segundo é o dos conceitos estruturais — historicidade, dependência de trajetória, sensibilidade à flutuação, irreversibilidade da escolha —, transponíveis como heurística: geram hipóteses que precisam ser testadas pelos métodos próprios das ciências sociais, e não confirmadas por analogia. O terceiro é o do aparato técnico — representações espectrais, ressonâncias de Poincaré, semigrupos —, que não é transponível, e cujo uso fora da física é metáfora quando honesta e impostura quando não o é. Quem mantiver presente essa hierarquia poderá ler o século XXI com Prigogine sem traí-lo. E encontrará, no fim, o mesmo deslocamento que organiza toda a obra: a pergunta decisiva não é o que a inteligência artificial provocará, formulação que já contém a resposta determinista, mas o que faremos com o campo de possíveis que ela abre — pergunta que só tem sentido em um mundo cujo futuro não está dado, e que é a razão pela qual, um quarto de século depois, este livro continua a ser lido.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O percurso realizado permite algumas conclusões.

A primeira diz respeito à natureza do argumento examinado. *O fim das certezas* não é um livro sobre os limites do conhecimento humano, embora seja frequentemente lido como tal. É um livro sobre a estrutura das leis da natureza. A diferença é decisiva: a primeira leitura preserva intacto o edifício determinista e apenas registra nossa incapacidade de percorrê-lo integralmente; a segunda sustenta que o edifício é de outra natureza. Prigogine defende a segunda, e é dessa escolha que decorre a radicalidade de sua posição. Quando ele afirma que as leis exprimem possibilidades, não está dizendo que só conseguimos alcançar possibilidades; está dizendo que possibilidades é o que há.

A segunda conclusão refere-se à arquitetura do argumento, cuja economia merece registro. A tese sobre o tempo é sustentada por uma cadeia que vai da termodinâmica de não-equilíbrio aos modelos caóticos de poucos graus de liberdade, destes à não-integrabilidade de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

Poincaré, desta à extensão da dinâmica clássica, desta à mecânica quântica e, finalmente, à cosmologia. Cada elo cumpre função precisa: as estruturas dissipativas estabelecem que a irreversibilidade produz ordem; os modelos caóticos estabelecem que a irreversibilidade não decorre da ignorância; as ressonâncias estabelecem onde e por que a equivalência entre descrição individual e estatística se rompe; a cosmologia verifica a consistência do conjunto. É uma construção, e não uma coleção de intuições — o que a distingue de boa parte da literatura sobre complexidade que dela se reclama.

A terceira conclusão é de ordem crítica. O programa de Bruxelas-Austin não obteve, na comunidade de física, o consenso que sua importância filosófica poderia sugerir. As abordagens de decoerência tornaram-se dominantes no tratamento do problema da medida quântica, e a mecânica estatística tradicional continua a sustentar interpretações da irreversibilidade que Prigogine rejeitava. Quem transpõe suas teses para outros campos deve fazê-lo sabendo disso, apresentando-as como programa de pesquisa fecundo e não como resultado consolidado. Essa cautela, aliás, honra o próprio autor, que foi escrupuloso ao demarcar o que considerava demonstrado e o que considerava especulação.

A quarta conclusão diz respeito à fecundidade da obra fora da física. Ela decorre menos das teses específicas sobre operadores e representações espectrais do que de três deslocamentos conceituais de alcance geral. O primeiro é a compreensão da instabilidade como fonte de organização, e não apenas de desordem — o que reorienta o modo de pensar sistemas econômicos, ecológicos, sociais e institucionais. O segundo é a noção de que sistemas submetidos a bifurcações sucessivas adquirem história, de modo que seu estado presente carrega a memória do caminho percorrido e não é dedutível apenas de suas leis: a explicação, nesses casos, é irredutivelmente narrativa, o que aproxima as ciências da natureza de um traço que se supunha exclusivo das ciências humanas — convergência que Edgar Morin (2005) explorou por outro caminho ao formular o pensamento complexo, e que Whitehead (2010) antecipara ao fazer da criatividade uma categoria cosmológica. O terceiro é a redefinição da própria noção de lei como descrição de um campo de possíveis. Esses três deslocamentos podem ser apropriados com rigor por pesquisadores que não dominem o formalismo da mecânica estatística, desde que se mantenha presente a advertência de que se trata de analogias estruturais, e não de aplicações diretas.

A quinta conclusão diz respeito à atualidade do argumento. A seção 9 procurou mostrar que a inteligência artificial constitui, para o programa examinado, mais do que um campo de aplicação oportuno: constitui um teste de sua fecundidade e de seus limites. Fecundidade, porque a sociedade que se organiza em torno dessa tecnologia exibe as duas condições que a obra associa à emergência de estruturas dissipativas — distância do equilíbrio e etapas autocatalíticas —, e porque a categoria de bifurcação permite formular com precisão o que os discursos correntes obscurecem: que o presente é um ponto crítico no qual decisões de pequena amplitude têm efeito desproporcional, e que essa condição é transitória. Limites, porque nada disso é demonstração, e porque o probabilismo dos sistemas generativos não é o probabilismo irredutível que a obra estabelece para os sistemas dinâmicos instáveis. A distinção entre os três

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

níveis de transposição legítima — o deslocamento epistemológico, os conceitos estruturais e o aparato técnico — é a salvaguarda que permite mobilizar a obra no debate contemporâneo sem convertê-la em ornamento.

A sexta e última conclusão retoma o eixo ético. O que Prigogine denomina caminho estreito é uma exigência simultaneamente epistemológica e política: recusar tanto o mundo em que tudo está decidido quanto o mundo em que nada pode ser dito. As duas alternativas dispensam o esforço de conhecer — a primeira porque tudo já está contido nas condições iniciais, a segunda porque nada se deixa apreender. Entre elas, a posição que a obra sustenta é a mais exigente: a de que há legalidade e há novidade, e de que compreender consiste precisamente em articular as duas. Se há uma lição que atravessa a fronteira entre a física e o restante do trabalho intelectual, é esta. O futuro não é dado; é construído — e essa construção, longe de tornar supérflua a ciência, é o que lhe confere sentido.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

O autor declara que utilizou ferramentas de Inteligência Artificial exclusivamente como apoio à revisão gramatical, textual e à conferência e padronização de citações e referências. Todo o conteúdo foi revisado e validado pelo autor, que assume integral responsabilidade pela versão final do artigo.

REFERÊNCIAS

Alves Correia, U., Souza, A. M. de, Santana, J. A., Alves, D. S., Conceição, M. M., & Silva, M. S. (2026). **Protocolo de padronização da governança de inteligência artificial com base em normas e regulamentações internacionais: revisão de literatura**. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218*, *7*(6), e768273. https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8273

ANDERSON, Chris. The end of theory: the data deluge makes the scientific method obsolete. **Wired**, San Francisco, 23 jun. 2008.

ARTHUR, W. Brian. **Increasing returns and path dependence in the economy**. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1994.

BENDER, Emily M.; GEBRU, Timnit; McMILLAN-MAJOR, Angelina; SHMITCHELL, Shmargaret. On the dangers of stochastic parrots: can language models be too big? In: ACM CONFERENCE ON FAIRNESS, ACCOUNTABILITY, AND TRANSPARENCY, 2021. **Proceedings**. New York: ACM, 2021. p. 610-623.

BERGSON, Henri. **O pensamento e o movente**: ensaios e conferências. Tradução de Bento Prado Neto. São Paulo: Martins Fontes, 2006.

BORGES, Jorge Luis. Nova refutação do tempo. In: BORGES, Jorge Luis. **Outras inquisições**. Tradução de Davi Arrigucci Jr. São Paulo: Companhia das Letras, 2007. p. 191-216.

BRASIL. Senado Federal. **Projeto de Lei n. 2.338, de 2023**: dispõe sobre o uso da inteligência artificial. Brasília, DF: Senado Federal, 2023.

CRAWFORD, Kate. **Atlas of AI**: power, politics, and the planetary costs of artificial intelligence. New Haven: Yale University Press, 2021.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

DUHEM, Pierre. **A teoria física**: seu objeto e sua estrutura. Tradução de Roberto Leal Ferreira. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2014.

FLORIDI, Luciano. **The fourth revolution**: how the infosphere is reshaping human reality. Oxford: Oxford University Press, 2014.

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

HAWKING, Stephen. **Uma breve história do tempo**: do Big Bang aos buracos negros. Tradução de Maria Helena Torres. Rio de Janeiro: Rocco, 1988.

JUMPER, John et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. **Nature**, London, v. 596, n. 7873, p. 583-589, 2021.

MITCHELL, Melanie. **Artificial intelligence**: a guide for thinking humans. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2019.

MORIN, Edgar. **Introdução ao pensamento complexo**. Tradução de Eliane Lisboa. Porto Alegre: Sulina, 2005.

NICOLIS, Grégoire; PRIGOGINE, Ilya. **Exploring complexity**: an introduction. New York: W. H. Freeman, 1989.

NICOLIS, Grégoire; PRIGOGINE, Ilya. **Self-organization in nonequilibrium systems**: from dissipative structures to order through fluctuations. New York: John Wiley & Sons, 1977.

PENROSE, Roger. **A mente nova do rei**: computadores, mentes e as leis da física. Tradução de Waltensir Dutra. Rio de Janeiro: Campus, 1991.

POINCARÉ, Henri. **O valor da ciência**. Tradução de Maria Helena Franco Martins. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

POPPER, Karl R. **O universo aberto**: argumentos a favor do indeterminismo. Tradução de Nuno Ferreira da Fonseca. Lisboa: Dom Quixote, 1988.

PRIGOGINE, Ilya. **As leis do caos**. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora UNESP, 2002.

PRIGOGINE, Ilya. **Do ser ao devir**. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora UNESP, 2011.

PRIGOGINE, Ilya. **O fim das certezas**: tempo, caos e as leis da natureza. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: Editora da Universidade Estadual Paulista, 1996.

PRIGOGINE, Ilya. **O nascimento do tempo**. Tradução de João Duarte. Lisboa: Edições 70, 1991.

PRIGOGINE, Ilya; STENGERS, Isabelle. **A nova aliança**: metamorfose da ciência. Tradução de Miguel Faria e Maria Joaquina Machado Trincheira. 3. ed. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1997.

PRIGOGINE, Ilya; STENGERS, Isabelle. **Entre o tempo e a eternidade**. Tradução de Fátima Fernandes e Roberto Fernandes. Lisboa: Gradiva, 1990.

RUSSELL, Stuart. **Human compatible**: artificial intelligence and the problem of control. New York: Viking, 2019.

SCHRÖDINGER, Erwin. **O que é vida?**: o aspecto físico da célula viva, seguido de Mente e matéria e Fragmentos autobiográficos. Tradução de Jesus de Paula Assis e Vera Yukie Kuwajima de Paula Assis. São Paulo: Editora UNESP, 1997.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org

SHANNON, Claude E. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**, New York, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948.

STENGERS, Isabelle. **A invenção das ciências modernas**. Tradução de Max Altman. São Paulo: Editora 34, 2002.

TOULMIN, Stephen. **Cosmopolis**: the hidden agenda of modernity. Chicago: University of Chicago Press, 1990.

TURING, Alan M. Computing machinery and intelligence. **Mind**, Oxford, v. 59, n. 236, p. 433-460, 1950.

TURING, Alan M. The chemical basis of morphogenesis. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences**, London, v. 237, n. 641, p. 37-72, 1952.

UNESCO. **Recomendação sobre a ética da inteligência artificial**. Paris: UNESCO, 2021.

UNIÃO EUROPEIA. **Regulamento (UE) 2024/1689 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de junho de 2024**, que estabelece regras harmonizadas em matéria de inteligência artificial. Jornal Oficial da União Europeia, L, 12 jul. 2024.

WHITEHEAD, Alfred North. **Processo e realidade**: ensaio de cosmologia. Tradução de Maria Teresa Teixeira. Lisboa: Húmus, 2010.

WIENER, Norbert. **Cybernetics**: or control and communication in the animal and the machine. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 1961.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados. https://rcpef.org