

IN SEARCH OF THE MAGIC WORLD: a brief talk on chaos and complexity for non-physicists

EM BUSCA DO MUNDO MÁGICO: uma breve conversa sobre caos e complexidade para não físicos

Abramov, Dimitri Marques¹; Gomes, Bruno Duarte².

ABSTRACT

Introduction: modern science inherited from classical determinism the hope that everything could be predicted. However, everyday phenomena such as lightning, the weather or brain activity reveal uncertainties that no model can eliminate. Objective: to present, in language accessible to non-physicists, the concepts of chaos, entropy and complexity, using the metaphor of magic to discuss how unpredictable microscopic fluctuations can give rise to large-scale patterns of order. We trace the path from classical statistical mechanics and the three-body problem to the discovery of chaos and dissipative structures; we discuss the relationship between entropy, information and self-organization; and we present nonextensive statistical mechanics, whose parameter q allows the complexity of systems whose components interact over long distances, such as neurons in the brain or people in a social network, to be quantified. We also describe other tools for measuring complexity, such as multiscale, approximate and sample entropies, algorithmic complexity and fractal dimension, with examples from cardiology and neuroscience, and show how they complement one another. Conclusion: complexity is a multifaceted property and its measurement paves the way for a more suitable understanding of the Universe, health and of the human brain. Uncertainty, however, remains irreducible: we can observe, describe and measure it, but never eliminate it. It is from uncertainty that the diversity of the Universe and of life emerges.

Keywords: Nonlinear dynamics; Entropy; Systems theory; Electroencephalography; Scientific communication and diffusion.



NEUROCIÊNCIAS & SOCIEDADE

RESUMO

Introdução: a ciência moderna herdou do determinismo clássico a esperança de que tudo pudesse ser previsto. No entanto, fenômenos cotidianos como um raio, o clima ou a atividade do cérebro revelam incertezas que nenhum modelo consegue eliminar. Objetivo: apresentar, em linguagem acessível a não físicos, os conceitos de caos, entropia e complexidade, usando a metáfora da magia para discutir como flutuações microscópicas imprevisíveis podem gerar padrões de ordem em larga escala. Percorremos a trajetória que vai da mecânica estatística clássica e do problema dos três corpos à descoberta do caos e das estruturas dissipativas; discutimos a relação entre entropia, informação e auto-organização; e apresentamos a mecânica estatística não extensiva, cujo parâmetro q permite quantificar a complexidade de sistemas em que os componentes interagem a longas distâncias, como os neurônios no cérebro ou as pessoas em uma rede social. Descrevemos ainda outras ferramentas de medida da complexidade, como as entropias multiescala, aproximada e de amostra, a complexidade algorítmica e a dimensão fractal, com exemplos da cardiologia e da neurociência, e mostramos como elas se complementam. Conclusão: a complexidade é uma propriedade multifacetada, e sua medida abre caminho para uma compreensão mais adequada do Universo, em especial da e do cérebro humano. A incerteza, porém, permanece irreduzível: podemos observá-la, descrevê-la e medi-la, mas não eliminá-la. É dela que emerge a diversidade do Universo e da vida.

Palavras-chave: Dinâmica não Linear; Entropia; Teoria de Sistemas; Eletroencefalografia.; Comunicação e divulgação científica.



O ARBITRIO DE ZEUS

Talvez nada instigue mais o homem do que a magia. Em 1973, na edição revista de *Profiles of the Future*, Arthur C. Clarke enunciou sua terceira lei: “Qualquer tecnologia suficientemente avançada é indistinguível da magia” (Clarke, 1973, tradução nossa). Ele argumentava que a “magia” é apenas ciência que ainda não entendemos. Seu aforismo pretende denunciar que o homem atribui à mágica o que ele não consegue explicar, ou talvez aquilo que jamais possa ser explicado. A partir da terceira lei de Clarke, podemos definir um significado formal para magia: *aquilo que não se pode explicar através da razão ou da observação, e, portanto não pode ser previsto através de um modelo científico*.

Ao contrário do que o cético clássico possa compreender, há muito na Natureza que jamais poderá ser explicado ou previsto através de qualquer razão ou ciência. A meteorologia é, e sempre será, uma aproximação. Onde exatamente um raio irá cair, em que momento uma ventania começará, ou qual a quantidade de água precipitada em uma tempestade são realidades incontestáveis que não podem ser objetivamente previstas por um modelo científico. Afinal, previsões meteorológicas até conseguem prever se vai chover, mas não conseguem dizer com certeza qual rua exata vai alagar ou onde a chuva será mais intensa.

Ao contrário do que o cético clássico possa compreender, há muito na Natureza que jamais poderá ser explicado ou previsto através de qualquer razão ou ciência. A meteorologia é, e sempre será, uma aproximação. Onde exatamente um raio irá cair, em que momento uma ventania começará, ou qual a quantidade

de água precipitada em uma tempestade são realidades incontestáveis que não podem ser objetivamente previstas por um modelo científico. Afinal, previsões meteorológicas até conseguem prever se vai chover, mas não conseguem dizer com certeza qual rua exata vai alagar ou onde a chuva será mais intensa.

Assim, de onde vêm esses elementos reais da Natureza, o que são?

Um dia, um antigo grego vislumbrou um raio celestial e atribuiu esse fenômeno a Zeus. Ao passar dos séculos, a ciência revelou o plasma, a ionização dos gases atmosféricos por uma corrente de elétrons induzida por um campo elétrico muito intenso, emitindo fótons que sensibilizam pigmentos da retina humana. Destrinchamos o raio de Zeus até o nível das leis quânticas, mas daí por diante, a mágica remanesce. O inexplicável (ou inexplicado) apenas mudou de escala. Ou seja, a magia se manifesta, seja nas flutuações da Natureza, nas entranhas da matéria ou mesmo no arbítrio (livre?) incrustado na consciência humana – o problema intangível mais perturbador ao intelecto humano.

Não estamos aqui para conversar sobre os mistérios fundamentais da consciência ou a natureza última da realidade. Esses são abismos que a ciência ainda está explorando. Nossa conversa é mais modesta e concreta: queremos entender por que a dinâmica das coisas, desde um raio até um cardume de peixes, revela padrões que a gente consegue reconhecer mas que resistem à previsão absoluta.

Nesse sentido, a mágica ainda vive nos raios de Zeus. Por que, quando, onde e como esse raio vai ocorrer? A incerteza sobre os atributos do raio se confunde com a incerteza sobre os atributos do homem. O que, porventura, permitiu ao grego ancestral deduzir que o raio, tão incerto quanto um homem ou uma borboleta em voo livre, seria fruto de um arbítrio. Um arbítrio astronômico e poderoso como o desejo de um deus. A mágica, que mora dentro dos atos humanos e da luz que os faz perceber o mundo, também vive nos movimentos da Natureza. E, matematicamente, a mágica pode ser reconhecida, embora jamais compreendida.

MÁGICA?

Se observarmos a dinâmica dos átomos de hélio dentro de um balão (o hélio é um gás monoatômico), veremos a agitação térmica desordenada. Os átomos vagueiam

em alta velocidade, ora se chocando, ora passando uns pelos outros. Nenhum modelo matemático é ou será capaz de prever exatamente para onde um átomo irá, embora possam modelar a probabilidade de seus comportamentos.

Podemos até estimar sua velocidade ou seu raio de alcance, dada a quantidade de energia no sistema. Porém, o seu comportamento futuro, sua direção e sentido, sempre será desconhecido desde que o gás do balão não sofra perturbações externas. Se colocarmos um ventilador dentro do balão, criamos um padrão direcional e conseguimos prever melhor para onde as moléculas vão. Mas mesmo assim, em alguma escala microscópica, a incerteza persiste.

Em suma: esta incerteza absoluta, muito expressiva em escala molecular, jamais será desvendada por um modelo matemático ou por qualquer experimento? Sim. E, portanto, sempre será mágica.

A incerteza já é velha conhecida da ciência. Desde a **mecânica estatística** de Boltzmann (Boltzmann, 1896) ao problema dos três corpos abordado por Poincaré (Poincaré, 1890). Porém, a incerteza já foi considerada um “erro” de medição, ou contingência do desconhecimento absoluto das variáveis do sistema. O matemático francês Pierre-Simon Laplace (Laplace, 1814) nos trouxe a seguinte alegoria: Imagine um ser inteligente (Laplace o chamou de “Demônio”) que soubesse a posição, velocidade e estado de cada partícula no Universo num dado momento. Segundo a física clássica, esse ser poderia calcular e prever tudo o que aconteceria depois.

Estatisticamente, as flutuações são compatíveis com um erro, porque a média da incerteza em alguma escala tenderá a zero em sistemas simples como o gás ideal, e não exerce efeito em escalas maiores. De fato, se somarmos todos os vetores de velocidade dos átomos de hélio contidos em um balão estático, seguramente a resultante esperada será zero. Assim, cinco litros de hélio dentro do balão, mantidas estáveis a temperatura e pressão, sempre serão os mesmos cinco litros de hélio.

Assim, ninguém se preocupou com esses erros, ou os considerou contingência da imprecisão dos métodos de medição, ou da nossa ignorância sobre todas as variáveis do sistema. Mas quando se descobriu que, em muitos sistemas, esse “erro” microscópico influencia o seu comportamento em macroescala, foi necessário repensá-lo. O problema dos três corpos (Poincaré, 1890), advindo da escala astronômica, sem dúvidas

materializou o “problema” do erro na mente dos cientistas mecanicistas da época.

No entanto, nos anos 1960, Edward Lorenz puxou o véu e descobriu o **Caos** (Lorenz, 1963) quando propôs que esses fenômenos são flutuações emergentes na Natureza que têm efeito macroscópico e cumulativo em muitos sistemas, como o clima ou a evolução de uma colônia de microrganismos. Em 1976, May revolucionou a matemática dos sistemas dinâmicos com a simples equação de diferenças (o **mapa logístico**) $x(t+1) = a \cdot x(t) \cdot (1-x(t))$ (May, 1976), que assume um comportamento completamente não linear com valores de $a > 3,5699$ — o ponto de acumulação de Feigenbaum, onde se dá a transição para o caos. Isso significa que o sistema muda de um comportamento previsível e monótono para um comportamento errático e imprevisível. É a magia emergindo da matemática.

No gás hélio, as flutuações microscópicas não representam muito. Mas em sistemas complexos, elas são a sua alma mágica.

Aqui iniciamos a definir **entropia**. Ela é uma medida fundamental relacionada ao número de configurações microscópicas compatíveis com um estado macroscópico observado. Para um gás de hélio, essa quantidade quantifica essencialmente a “desordem molecular”. Ou seja, a variedade de estados que os átomos podem ocupar dado um volume, temperatura e energia específicos.

Há aqui um ponto crucial frequentemente mal compreendido: a terceira lei da termodinâmica estabelece que a entropia de um cristal perfeito tende a zero quando a temperatura se aproxima do zero absoluto, mas o zero absoluto é uma idealização matemática nunca atingida experimentalmente. De fato, alcançar o zero absoluto exigiria um número infinito de etapas de resfriamento, e as flutuações quânticas de ponto zero sempre permanecem. A própria Mecânica Quântica nos diz que existe uma “entropia residual” de ponto zero mesmo em cristais, refletindo estados quânticos degenerados inelimináveis.

Para o hélio em particular, aproximando a temperatura do zero absoluto, os átomos diminuem sua energia cinética e ocupam configurações progressivamente mais restritas. A entropia diminui porque há menos estados microscópicos acessíveis — a incerteza sobre onde exatamente os átomos podem estar reduz-se. Contudo, em temperaturas criogênicas, o hélio líquido exhibe fenômenos quânticos sofisticados (como a superfluidez), onde a entropia não segue simplesmente

um padrão clássico.

À temperatura ambiente, um gás de hélio apresenta altíssima entropia: os átomos distribuem-se sobre um vasto número de configurações possíveis, multiplicadas pelo volume disponível. Quando comprimimos o gás em um balão, reduzimos o volume, restringindo os estados acessíveis e reduzindo a entropia. Mas observe: nunca alcançamos “entropia zero” – essa seria uma afirmação de ordem perfeita absoluta, que a Natureza nunca realiza completamente.

Essa incerteza microscópica, essa entropia que persiste em qualquer escala real e atingível, é precisamente aquilo que torna a magia possível. Não é o zero absoluto que nos interessa, mas a persistência da incerteza mesmo quando tentamos eliminá-la. É nessa lacuna entre o determinismo clássico (a certeza absoluta que Laplace imaginava) e a realidade quântica-estatística que a complexidade e a imprevisibilidade emergem como propriedades fundamentais.

Todavia, a relação entre entropia e energia no Universo não é simples: enquanto a energia total permanece constante, a entropia continuamente aumenta, distribuindo-se cada vez mais uniformemente. Segundo os modelos cosmológicos atuais, se a expansão continuar indefinidamente, o Universo evoluiria para um estado de entropia máxima. Sem estrelas, planetas, galáxias ou buracos negros. Sem vida ou informação.

Um aparente paradoxo, pois a entropia em sistemas menores e abertos tem uma relação estreita com a energia nesses sistemas. Contudo em sistemas fechados (e o Universo como um todo é o único sistema isolado conhecido) a segunda lei da Termodinâmica aparece.

Mas por que existem esses sistemas menores (consideremos como “sistema” uma organização de componentes que se distingue do contexto). Como desdobramento desse paradoxo, emerge a dúvida mais instigante de todas. Dizem que o Universo surgiu do Big Bang, conhecido pelo senso comum. Então por que, desde o início, o Universo não se expandiu como um balão de gás monótono, de entropia máxima? Por que se formaram estrelas, galáxias, vida e informação se a “resultante” das incertezas deveria ser zero? Por que temos tanta diversidade no Universo?

ORDO AB CHAO

A resposta é que, de fato, nem sempre (ou quase nunca) a resultante das incertezas é zero. Assim, a magia exerce seus efeitos em uma escala

macroscópica, como no raio de Zeus. Ou como o “design inteligente” dos criacionistas que, em escalas astronômicas, esculpiu as galáxias do Cosmos. Em escalas humanas, a incerteza produziu a biodiversidade, sociedades, os cardumes de peixes e o relevo rico em paisagens.

As incertezas ganharam o nome de Caos quando se desvelou ao ser humano seus efeitos em larga escala no tempo e no espaço. A intuição decisiva veio dos computadores de previsão meteorológica do *Massachusetts Institute of Technology*, quando Edward Lorenz cometeu um pequeno engano nos dados de entrada de seu modelo matemático, e esse pequeno erro criou ressonâncias sendo amplificado e gerou previsões climáticas completamente divergentes em larga escala espacial e temporal. Então, Lorenz cunhou uma das frases mais populares da matemática: “O bater de asas de uma borboleta no Brasil desencadeia um tornado no Texas?” (Lorenz, 1972, tradução nossa). O “Efeito Borboleta” já foi tema de filmes de ficção e tirinhas de jornal, o que nos mostra a popularidade que a Teoria do Caos tomou, assim como a Mecânica Quântica. Embora, em algum nível, ambas sejam incompreendidas (incompreensíveis) pelo senso comum e também pelos cientistas da área. As pessoas simplesmente percebem a mágica que elas nos denunciam.

De alguma forma, algumas incertezas se tornam mais que flutuações locais, originando **atratores** dinâmicos, como uma turbulência em um fluido. Por analogia, podemos dizer que o coração humano ou as folhas de uma laranjeira, um sistema planetário ao redor de uma estrela ou mesmo um cristal de quartzo são atratores, ou padrões de ordem, que apareceram dessas incertezas em algum momento da evolução dos sistemas que os contém.

Energeticamente, os atratores correspondem a estados de energia relativamente baixa e estável dentro de um sistema, ou seja, um canal por onde a energia deixa as fronteiras do sistema, se dissipando no restante do cosmos na forma de calor. Com isso, a entropia também permanece domesticada. Esses atratores se caracterizam por sua estabilidade relativa no tempo e no espaço. E, fenomenologicamente, são distinguíveis do restante do Universo ao seu redor. São padrões de ordem, que emergem do caos.

O corpo humano que sedia um coração, ou a árvore de onde brota a folha precisam ser abertos para “escoar” energia, domesticar a entropia, e manter estáveis seus padrões de ordem. Uma vez formado no peito de um homem, o coração humano mantém sua estabilidade

por décadas. Embora um dia a entropia aumente, esse coração perca seu ritmo, sofra um infarto e perca suas características que fazem dele um coração. Com a morte, esse coração se dissolve no solo de seu sepulcro e, em poucos anos, não há mais o que distinga coração e solo fértil. Em um recorte tão pequeno, ocorre nesse túmulo o que há de ser o destino do Universo: equilíbrio.

Os sistemas que manifestam esses padrões precisam manter a estabilidade da entropia ao longo do tempo e do espaço através de processos de dissipação de energia. Por isso, Prigogine os chamou de **estruturas dissipativas** (Nicolis; Prigogine, 1977). E provavelmente eis a definição mais adequada e sintética para um ser vivo: um sistema aberto que mantém ordem através da dissipação contínua de energia (na forma de calor) para o ambiente, permanecendo longe do equilíbrio termodinâmico. O meio nuvem-ar-solo de onde emergiu um fluxo de plasma que revelou o arbítrio de Zeus ao nosso ancestral grego, que se destacou e distinguiu no espaço-tempo enquanto um atrator de dissipação de energia, nos faz pensar que provavelmente nem todos os sistemas dissipativos são vivos. Ou não. Mas o que define um sistema dissipativo explicando por que tantos padrões emergem na Natureza?

Toda magia tem suas palavras mágicas (o feitiço), que são as incertezas, as flutuações microscópicas. Porém, também tem uma varinha mágica que faz o encanto acontecer.

A COMPLEXIDADE É A VARINHA MÁGICA

Vamos entender aqui as incertezas microscópicas como as palavras de um encantamento (o feitiço), aquilo que define a natureza da mágica. A **Complexidade** é o meio que vai permitir que a palavra se torne realidade. A Complexidade é o poder da magia que traz ao mundo macroscópico as flutuações microscópicas. É a propriedade que confere a sistemas a possibilidade de manifestar, por auto-organização, padrões de ordem.

No formalismo científico, a Complexidade é um conceito abstrato, assim como entropia e energia. E como essas duas últimas, talvez possamos entender a complexidade como uma propriedade quantificável da natureza, que vá dos limites do zero nos gases ideais, a quantidades muito grandes nas redes neurais do cérebro. Enquanto a formalização matemática da complexidade emergiu de trabalhos em lógica e computação, a natureza holística e filosófica do conceito foi profundamente articulada por pensadores como Edgar Morin (Morin, 1990), que nos lembra a etimologia da palavra “complexo”: *complexus*, o que é tecido junto. Ele é, talvez, o maior filósofo da Complexidade que já existiu.

A complexidade sabidamente é notável em seres vivos, e diminui tanto no envelhecimento quanto em patologias (Goldberger et al., 2002), quando a estabilidade interna desses sistemas é comprometida, quando a entropia escapa do controle. A relação entre estabilidade interna, auto-organização de atratores, controle de entropia manifestas nos seres vivos está diretamente relacionada à complexidade. Diferente do que sonhavam os velhos cientistas do Positivismo mecanicista, toda a fisiologia que determina a vida é um processo emergente, caótico, de manifestação de estados dinâmicos de ordem.

Como sabemos, sistemas em geral tendem a obedecer à segunda lei da Termodinâmica: a entropia sempre aumenta com o passar do tempo. A complexidade, e por conseguinte a vida, podem ser também entendidas como o controle da entropia em um sistema distinto de seu entorno.

Seres vivos precisam continuamente se alimentar. Do alimento extraem energia que será usada para diminuir a entropia local. Ou seja, para manter a imensa e complexa organização biológica, energia precisa ser gasta.

A entropia local, a do ser vivo, é diminuída, mas às custas do aumento de entropia do ambiente. É por isso que não se consegue esconder de uma câmera térmica à noite. O calor que seu corpo emite é justamente o aumento obrigatório de entropia do ambiente, decorrente da diminuição de entropia do seu corpo após o gasto energético. É a dissipação de energia, já citada no tópico anterior. Aqui uma questão central se coloca – como a complexidade diminui em seres vivos em situações de alterações fisiológicas devido a doenças ou senilidade, se nessas situações a entropia está aumentada? Conforme um sistema vivo envelhece ou adocece, ele perde a capacidade de manter correlações ordenadas entre seus componentes (complexidade diminui), enquanto simultaneamente sua desorganização interna aumenta (entropia local cresce).

Evitando aparentes contradições, salientamos que complexidade fisiológica e entropia termodinâmica são conceitos distintos que operam em escalas e contextos diferentes nos sistemas biológicos. Complexidade Fisiológica refere-se à capacidade adaptativa dos sistemas biológicos, caracterizada por parâmetros como variabilidade dinâmica rica em informação, que corresponde à capacidade de um sistema biológico de exibir flutuações temporais complexas, multifacetadas e imprevisíveis, que refletem a presença de múltiplos mecanismos de regulação e adaptação funcionando de modo coordenado em diferentes escalas de tempo e

Notavelmente, caos e ordem coexistem no complexo.

espaço.

Como já aludimos, em indivíduos saudáveis, a variabilidade da frequência cardíaca exibe padrões complexos, refletindo a integração de múltiplos sistemas de regulação autonômica (Goldberger et al., 2002). Em idosos ou pacientes com doenças cardíacas, essa variabilidade diminui, tornando-se mais regular e previsível. Outro exemplo, a resposta de áreas do cérebro em indivíduos saudáveis, tal como as respostas medidas por eletroencefalografia (EEG), mostram flutuações complexas e ricas em informação, enquanto doenças neurodegenerativas levam à simplificação desses padrões, seja aumentando a regularidade, seja aumentando a irregularidade do sinal (Stam, 2005).

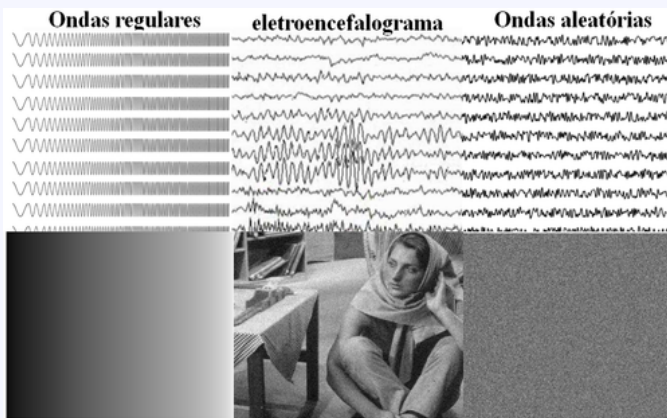


Figura 1 - Complexidade: sistemas superorganizados, complexos e desorganizados. Fonte: elaborada pelos autores. Internet (Sem direitos autorais). Nota: à esquerda e à direita, exemplos de sistemas superorganizados e desorganizados, respectivamente. No meio, a imagem da complexidade, seja no conjunto bidimensional de pontos cinzas (abaixo), constituindo uma cena altamente informativa e repleta de padrões, seja nas ondas de eletroencefalograma (acima).

A Figura 1 ilustra de forma abrangente o que é complexidade. Na linha inferior vemos três imagens que são compostas por exatamente os mesmos pontos cinzas, porém dispostos de forma diferente: à esquerda, absolutamente organizados do negro ao branco; à direita, aleatoriamente dispostos. E, no meio, distribuídos de modo a formar um cenário altamente informativo com diversos padrões identificáveis, onde esses pontos estão obviamente correlacionados uns com os outros – não são independentes, como à direita.

Na linha superior, vemos análogos das imagens respectivas, porém são oscilações de frequências diferentes. No meio, destaca-se um fragmento de um **eletroencefalograma** real, onde podemos observar as mesmas propriedades da foto correspondente: padrões e flutuações, ordem e caos coexistindo. Da mesma forma que a foto abaixo é altamente informativa, o sinal de EEG também o é, descrevendo em um nível macroscópico a dinâmica do cérebro humano em sua “complexidade”. O sinal de EEG mostra regularidades, que correspondem a correlações intrínsecas entre os componentes funcionais do cérebro, embora não sejam estereotipicamente regulares como o conjunto de ondas à esquerda.

Notavelmente, caos e ordem coexistem no complexo.

Complexidade e q-Estatística

Entendemos que a complexidade seja determinada pela capacidade inerente de algumas flutuações microscópicas gerarem ressonâncias (estatisticamente, correlações) em larga escala relativamente estáveis no espaço e no tempo. Entendendo complexidade como a dinâmica das correlações em larga escala estáveis no espaço-tempo, podemos dizer que um gás ideal não produz essas correlações, pois suas moléculas produzem interações relativamente locais. Como bolas de bilhar, a interação entre as moléculas do gás é máxima no contato direto, essa interação rapidamente se dispersa com os contatos sucessivos entre as bolas de bilhar. Podemos dizer que, de certa forma, essas bolas de bilhar são independentes entre si, não mantêm qualquer relação intrínseca entre si. Os efeitos das interações na mesa de bilhar, partindo do taco sobre a primeira bola decaem numa função exponencial. Em um sistema com centenas de bolas, com atrito desprezível, a distribuição de energia cinética transferida para as bolas subsequentes pode ser vista conforme a Figura 2:

Se integrarmos a área sobre a curva no valor adimensional igual a 1, transformamos esta distribuição em uma função de probabilidades. Ou seja, a probabilidade de encontrarmos uma bola com energia cinética igual ou maior que um valor X decai exponencialmente com a distância da interação inicial. Em outras palavras, o efeito do comportamento de um átomo de gás hélio sobre os demais átomos dentro do balão decaem exponencialmente. Este modelo matemático é a base das funções de probabilidades utilizadas na inferência estatística, os quais pressupõem a independência entre os eventos ou casos.

Em um sistema complexo, as interações não são locais,

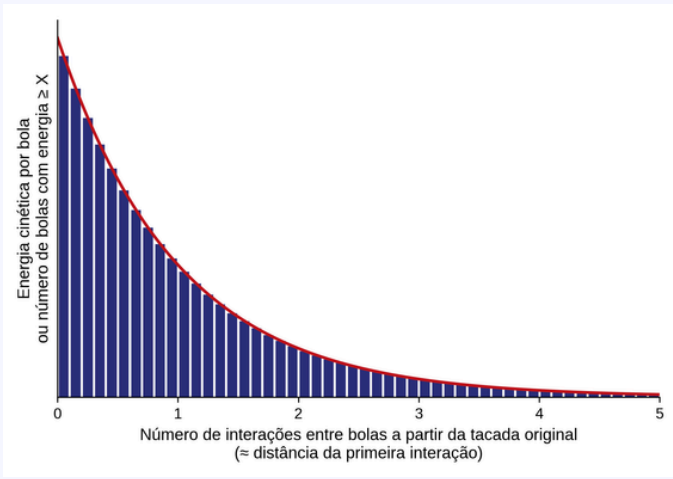


Figura 2 - Distribuição de energia em função da distância da primeira interação em um sistema não complexo. Fonte: elaborada pelos autores. Nota: a distribuição obedece à Mecânica Estatística de Boltzmann-Gibbs, válida para sistemas não complexos.

como na mesa de bilhar ou no balão de gás hélio. Enquanto as moléculas ou bolas de bilhar são praticamente independentes entre si, os neurônios do cérebro ou as pessoas em uma rede social não o são. De fato, a atividade de um neurônio depende da atividade dos que se conectam a ele. O comportamento de uma pessoa, em algum nível depende dos seus relacionamentos. E conexões a distâncias relativamente grandes podem ter o mesmo ou até mais poder do que as conexões com o neurônio vizinho. Da mesma forma que uma conversa pelo telefone ou Internet com alguém da Coreia do Sul pode ter mais efeito sobre uma pessoa do que o morador do quarto ao lado. O comportamento das árvores na Amazônia determina a taxa de crescimento da soja no sul do Brasil através do clima (Leite-Filho et al., 2021). A propagação de uma epidemia ou a oscilação das ações na bolsa de valores NASDAQ podem ser efeito direto de eventos ocorrendo do outro lado do mundo. E desses eventos singulares pode emergir um comportamento de enxame, como o que forma os cardumes de peixes (Couzin et al., 2002) ou que deflagrou a Primavera Árabe nos países do norte da África (Tufekci; Wilson, 2012). Através da complexidade o caos microscópico produz a mágica das transformações criativas e imprevisíveis em macro-escala.

Por corolário, a interdependência inerente aos componentes de um sistema complexo limita a liberdade individual de cada componente. Estatisticamente, os graus de liberdade em micro-escala seriam relativamente menores enquanto os graus de liberdade em macro-escala (padrões de ordem emergentes prováveis) seriam maiores. À temperatura ambiente é extremamente improvável (mas não impossível) o gás contido no balão se auto-organizar em

um cristal. Pois as moléculas, independentes que são, têm tantos graus de liberdade que seria praticamente impossível todas manifestarem um comportamento coerente para que um cristal emergja, por mínimo tempo que seja. Diferente de uma molécula de gás, uma pessoa qualquer não caminha em direção a um precipício. Seus graus de liberdade estatísticos são menores. Embora, de centenas, milhares ou milhões de pessoas possam emergir organizações diversas.

Diferente de energia ou entropia, a complexidade ainda é uma ideia que deriva de uma percepção intuitiva, que ainda não tem uma definição conceitual formal universalmente aceita. Talvez a definição formal de complexidade mais adequada venha do trabalho de Constantino Tsallis, originalmente publicado em 1988 (Tsallis, 1988; para uma síntese, ver Tsallis, 2023), onde a complexidade é a propriedade da natureza denunciada pela generalização da Teoria da Mecânica Estatística de Boltzmann-Gibbs (MEBG). A MEBG modela de forma ideal apenas a dinâmica de gases homogêneos, ou a distribuição de energias entre as bolas de bilhar, como mostra a Figura 2. Esses sistemas são, de fato, apenas um caso particular da Natureza. À medida que os componentes do sistema mantém relações de longo alcance, a MEBG começa a falhar.

Através da complexidade o caos microscópico produz a mágica das transformações criativas e imprevisíveis em macro-escala.

Por outro lado, a Teoria de Tsallis prevê que as interações entre componentes de muitos sistemas podem se dar a longo alcance, diminuindo o decaimento de energia (ou do efeito de interações) em função do tempo ou da distância (ver Figura 3). O modelo matemático da Teoria de Tsallis segue a **lei de potências**, da qual as funções exponenciais são um caso particular. Assim, são infinitos os modos de evolução que um sistema pode se organizar, embora um sistema não complexo tenha apenas um caminho a seguir, que é expresso pela função exponencial da Figura 2. A medida da complexidade pode ser denotada pelo parâmetro “q” das funções. Esse parâmetro determina a velocidade de decaimento da função. Enquanto uma função de probabilidade (integral igual a 1), a distribuição prevê menor energia relativa ou estados possíveis a curtas distâncias. Essas funções de probabilidade que podem prever ou modelar o comportamento de sistemas complexos constituem a

q-Estatística em escala humana (Figura 3), e a δ -Estatística na escala das dimensões astronômicas (Tsallis; Cirto, 2013).

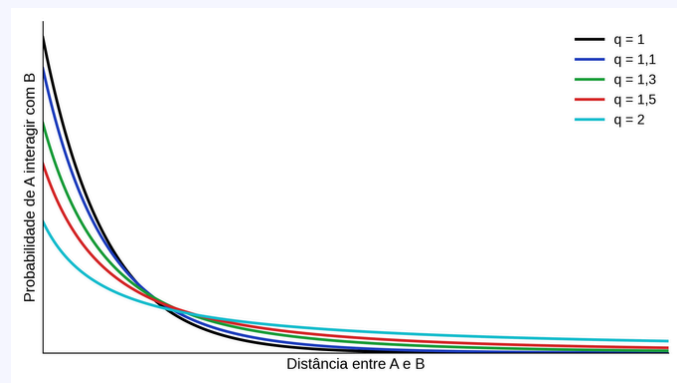


Figura 3 - Distribuições da q-Estatística. Fonte: elaborada pelos autores. Nota: o parâmetro q determina o grau de decaimento das curvas e quantifica a complexidade do sistema que originou a distribuição; $q = 1$ corresponde à exponencial da Figura 2.

O ENCANTAMENTO DEVE SER INFORMAÇÃO (NÃO É ALEATÓRIO)

Já está claro que a complexidade depende da entropia. Contudo, não é unicamente determinada pela quantidade de entropia mas também, pela “qualidade” da entropia. Para tanto vamos considerar as letras E, L, O, e V. Por permutação, essas quatro letras podem produzir vinte e quatro anagramas (que é $4!$). Todos os anagramas são estados equiprováveis da combinação dessas letras, têm uma probabilidade de aproximadamente 0,042 de ocorrer. A entropia é a mesma em qualquer um deles. Porém, apenas dois dos anagramas possíveis formam palavras informativas: LOVE (um sentimento) e VOLE (um roedor). A informação nesses dois anagramas é fruto da **correlação** entre as letras possíveis, que, de fato, não são independentes umas das outras em apenas essas duas configurações. Essas duas combinações não são aleatórias porque resultam em um nível de organização suprajacente graças às suas correlações, que conferem uma informação no conjunto (significado da palavra) que transcende a informação singular das componentes (significado de cada letra).

Podemos entender informação (uma entidade abstrata) como a emergência de padrões de ordem em um sistema complexo. Metafísica à parte, a relação entre emergência de padrões e informação na consciência é a mágica acontecendo. E para ser mágica, não pode ser aleatório. De um ponto de vista da complexidade, o aleatório é o estado equiprovável do sistema, sem informação contida nele.

E esses padrões são composições não-aleatórias porque emergem devido à correlação entre os componentes do sistema. Assim, eles seriam de fato mais prováveis (mas ainda incertezas). Quer dizer, anagramas como LOVE e VOLE teriam maior probabilidade de “aparecer espontaneamente” na Natureza que OLEV ou LVEO, apesar do número de permutações possíveis. Enquanto a Entropia de Shannon (Shannon, 1948) é um cálculo baseado na mera combinação das componentes de um sistema quando se ignora as correlações possíveis, a q-Entropia, através do parâmetro q , revela a entropia de sistemas onde algumas configurações (microestados) seriam mais prováveis, e, portanto, formariam padrões. As distribuições de probabilidade se comportam em função do q , como descrito na Figura 3. Quando q tende a 1, assume-se quase independência entre as componentes e aleatoriedade das configurações de microestados: o sistema se comporta como Shannon e Boltzmann previram.

Conhecendo a q-Entropia, fica possível entender que uma propriedade dos sistemas complexos é a não-aditividade de suas entropias parciais. Se repartirmos em N partes um sistema simples, onde os componentes são independentes e os estados aleatórios, a soma da quantidade de entropia de cada uma de suas partes é igual a quantidade de entropia no sistema como um todo, seguindo a regra de Shannon e Boltzmann e Gibbs. Esta aditividade é bem intuitiva, uma vez que sistemas onde os estados são equiprováveis (aleatórios) são macroscopicamente uniformes. Não há qualquer informação em um litro de hélio dentro de um balão.

No entanto, com as interações a longa distância, a soma da quantidade de entropia das partes de um sistema complexo é, em geral, maior que a quantidade de entropia medida no sistema como um todo, enquanto a complexidade do sistema como um todo é maior do que a soma das complexidades das suas partes. A não aditividade é uma evidência da não-extensividade de muitos sistemas naturais. Ou seja, sistemas complexos não são uniformes, as características de uma parte não poderiam ser generalizadas para o todo, ao contrário do gás ideal, onde um mililitro tem as mesmas características de um decalitro de gás. A evidência da não-extensividade, demonstrada empiricamente pela não-aditividade, justificou a necessidade de uma nova física, a qual a Teoria de Tsallis satisfaz quando generalizou a MEBG: a *Mecânica Estatística (ou Termodinâmica) Não Extensiva*.

Os segmentos de reta que formam um triângulo são

menos informativos quando desintegrados. Juntos, inúmeras novas informações surgem em razão da composição do triângulo (Figura 4). Sistemas complexos não podem ser dissociados em suas partes para serem compreendidos, desafiando assim o método científico tradicional, que é reducionista, e colocando em xeque interpretações sobre a dinâmica de sistemas naturais, dos quânticos às redes neurais do cérebro. Ao se estudar isoladamente um neurônio, pouco saberemos sobre seu comportamento dentro da coletividade neural. Por isso, as neurociências ainda são uma ciência nascente, com um universo infindável a ser descoberto. E, para isso, novas ferramentas são necessárias, sob a luz do paradigma da Complexidade.

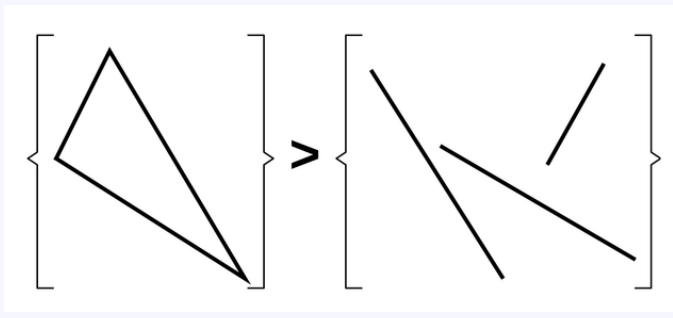


Figura 4 - Não extensividade e não aditividade: o todo é maior que a soma das partes. Fonte: elaborada pelos autores.

Sistemas com componentes absolutamente correlacionados se tornam absolutamente organizados, como cristais. Esses sistemas também têm baixa complexidade. Por desdobramento, nesses sistemas a entropia também é muito baixa. Reveja a Figura 1. Esse paradoxo demonstra a não linearidade entre entropia, conectividade e complexidade.

MEDIR (E COMPREENDER) A COMPLEXIDADE É UMA TAREFA COMPLEXA

Estruturas e processos complexos são, naturalmente, complexos de estudar. Diferente da gravidade, que tem uma explicação objetiva, cartesiana e reducionista, a complexidade tem várias formas de se observar e, portanto, formas de se interpretar, por diversas perspectivas como a entropia ou a informação.

A beleza da q-estatística de Tsallis está em seu formalismo físico e matemático que a revelou como uma generalização da Mecânica Estatística tradicional. Logo, a q-Estatística é uma teoria física que extrapola o entendimento clássico de entropia, cujas equações podem nos revelar a complexidade da Natureza da

mesma forma, por analogia, as equações da gravitação podem prever movimentos de corpos celestes.

A q-Estatística de Tsallis tem se mostrado mais adequada para descrever a dinâmica da maior parte dos sistemas da Natureza, em comparação com a Mecânica Estatística Tradicional. Sistemas quânticos (Lutz; Renzoni, 2013), materiais cimentícios e estruturas de concreto (Loukidis; Triantis; Stavrakas, 2021), epidemias (Tsallis; Tirnakli, 2020), mercado financeiro (Borland, 2002), tráfego aéreo (Mitsokapas et al., 2021), o cérebro humano (Abramov; Tsallis; Lima, 2023; Abramov et al., 2025; Abramov, 2026) e muitos outros sistemas têm sido adequadamente descritos e sua complexidade inferida através da q-Estatística.

Porém, para além da q-Estatística, existem inúmeras outras estratégias de inferir e estudar complexidade a partir das leis da mecânica estatística tradicional e da matemática utilizada para estudá-la. Os cientistas de sistemas complexos desenvolveram um verdadeiro arsenal de “ferramentas mágicas” para medir e compreender a complexidade. Mas aqui reside uma fascinante descoberta: não existe uma única medida universal de complexidade, assim como não existe uma única forma de definir o que é “beleza” ou “inteligência”. A complexidade é um fenômeno multifacetado que se manifesta através de diferentes lentes, cada uma revelando aspectos distintos da mesma realidade.

Imagine tentar descrever completamente uma pessoa usando apenas sua altura. Você perderia informações cruciais sobre sua personalidade, seus talentos, sua história. Da mesma forma, medir a complexidade de um sistema usando apenas uma métrica seria como tentar compreender uma sinfonia ouvindo apenas um instrumento. É por isso que os pesquisadores desenvolveram uma rica família de quantificadores, cada um sensível a diferentes aspectos da complexidade. Alguns capturam a irregularidade temporal, outros a diversidade estrutural, e ainda outros a capacidade de processamento de informação.

O que torna essas ferramentas verdadeiramente mágicas é sua capacidade de transformar o invisível em visível, o intangível em mensurável. Elas nos permitem quantificar fenômenos que anteriormente só podíamos descrever qualitativamente: a “irregularidade” de um batimento cardíaco, a “complexidade” de uma rede social, a “desordem” de um sistema econômico. Através delas, conseguimos detectar transições críticas antes que se tornem evidentes, prever comportamentos emergentes e compreender os mecanismos ocultos que governam a dinâmica dos sistemas complexos.

A beleza deste arsenal reside não apenas na diversidade de suas ferramentas, mas na complementaridade entre elas. Assim como um médico usa diferentes exames para diagnosticar completamente um paciente, os cientistas da complexidade combinam múltiplas métricas para obter uma visão holística dos sistemas que estudam. Cada medida ilumina uma faceta diferente da complexidade, e é na intersecção dessas múltiplas perspectivas que emerge a verdadeira compreensão dos fenômenos complexos.

Cada ferramenta nos oferece uma “janela” diferente para observar os mistérios dos sistemas complexos. E é exatamente essa multiplicidade de perspectivas que torna a ciência da complexidade tão fascinante. Estamos como exploradores com diferentes tipos de telescópios, cada um revelando aspectos únicos da “mágica” que permeia o universo, desde o batimento do nosso coração até a formação das galáxias.

A seguir, mergulharemos mais profundamente em algumas dessas ferramentas, explorando como elas funcionam e como podem ser aplicadas para desvendar os mistérios dos sistemas complexos.

Entropias multiescala: ouvindo a sinfonia em todas as escalas

Imagine que você está ouvindo uma orquestra sinfônica. Se você se concentrar apenas nos instrumentos de percussão, perderá a melodia dos violinos. Se focar somente nas notas rápidas, não perceberá a estrutura harmônica lenta que sustenta toda a música. A **entropia multiescala** funciona como um ouvido musical treinado que consegue “escutar” a complexidade em múltiplas escalas temporais simultaneamente (Bar-Yam, 2004).

Esta ferramenta tem se mostrado particularmente valiosa para analisar sinais do coração humano. Um coração saudável não bate como um metrônomo, ele possui uma variabilidade rica e complexa que se manifesta em diferentes escalas de tempo. Com o envelhecimento ou doenças, essa “música cardíaca” se torna mais simples e previsível (Wu, 2024).

Complexidade algorítmica: o código secreto da natureza

A **complexidade de Lempel-Ziv** pergunta algo fascinante: “Qual seria o menor programa de computador necessário para gerar exatamente um dado padrão?”. É como descobrir o “código secreto” por trás

de cada fenômeno natural. Imagine que você quer explicar para alguém como reproduzir exatamente uma música que você ouviu. Se a música tem um padrão muito regular, como uma simples sequência de notas que se repete, você pode dar instruções bem curtas: “toque as notas dó-ré-mi três vezes, depois fá-sol-lá duas vezes”. Mas se a música é totalmente caótica, sem padrão algum, você teria que especificar cada nota individualmente. A complexidade de Lempel-Ziv mede justamente isso: o tamanho das “instruções” necessárias para reproduzir um padrão.

Essa medida tem aplicações surpreendentes na neurociência. Quando estamos acordados e conscientes, nosso cérebro produz padrões de atividade elétrica ricos em novidade. Os sinais captados por eletroencefalogramas mostram uma complexidade alta, indicando que diferentes regiões cerebrais estão se comunicando de formas variadas e criativas (Ibáñez-Molina et al., 2015). Já durante o sono profundo ou sob anestesia, os padrões se tornam mais repetitivos e previsíveis, resultando em uma complexidade de Lempel-Ziv menor. É como se o cérebro mudasse de uma orquestra tocando uma sinfonia complexa para um metrônomo batendo o mesmo ritmo constantemente (Ibáñez-Molina et al., 2015).

Dimensões fractais: a geometria da complexidade

Nem toda complexidade acontece no tempo. Algumas se revelam na própria forma dos objetos. A forma de algo, seja um ser vivo ou artefato feito por seres humanos, determina sua função. Na verdade, forma e função estão intimamente relacionados. A **dimensão fractal** é a lupa matemática que compara “quanto espaço” um traço irregular consegue ocupar. Quando ela é inteira (1, 2, 3) estamos na geometria clássica; quando surge um número fracionário, entramos no território dos fractais, onde o contorno de um relâmpago pode ter dimensão 1,5 e uma linha costeira ultrapassar 1,2, indicando que a figura preenche “mais que uma linha, mas menos que uma superfície”.

Para estimar esse número basta sobrepor grades cada vez menores ao desenho e contar quantos quadrados, ou “caixas”, ainda contêm parte da figura. Se dobramos a resolução e o número de caixas ocupadas cresce quatro vezes, diz-se que o objeto tem dimensão 2; se cresce menos que isso, há uma dimensão fracionária escondida ali. É aqui que a geometria da complexidade encontra a biologia. A rede de vasos da retina humana, por exemplo, apresenta dimensão próxima de 1,7; valor

que revela um equilíbrio entre máxima cobertura de tecido e mínimo gasto de material. Galhos de árvores seguem proporções parecidas: eles bifurcam de modo quase auto-semelhante, permitindo transportar seiva e captar luz com eficiência, enquanto mantêm a robustez do tronco principal.

Medir essa dimensão virou ferramenta prática: patologistas detectam alterações precoces na vasculatura ocular ao notar pequenas quedas na sua dimensão fractal (Chen et al., 2017); engenheiros florestais usam o mesmo conceito para modelar como o fogo se espalha em copas de diferentes densidades (Wang; Lee; Li, 2014).

Entropias aproximada e de amostra: a previsibilidade do imprevisível

Para sinais biológicos como os batimentos cardíacos ou ondas cerebrais, cientistas desenvolveram medidas que fazem uma pergunta fundamental: “conhecendo os últimos pontos de um sinal, posso prever o próximo?”. Esta questão aparentemente simples esconde um dos problemas mais fascinantes da análise de sistemas biológicos: como quantificar a regularidade e previsibilidade em meio ao caos dos processos fisiológicos.

As entropias aproximada e de amostra emergiram como duas das ferramentas mais poderosas para responder a essa pergunta. Desenvolvidas especificamente para lidar com as limitações dos métodos tradicionais de análise de entropia, essas medidas foram criadas para funcionar com séries temporais curtas e ruidosas - exatamente o tipo de dados que encontramos no mundo real da medicina e da fisiologia.

A entropia aproximada (ApEn, do inglês *approximate entropy*), introduzida por Steve Pincus (Pincus, 1991) e formalizada como medida de complexidade alguns anos depois (Pincus, 1995), foi a primeira a quebrar as barreiras que limitavam a análise de complexidade a longos registros de laboratório. Ela funciona como um detector de padrões sofisticado: examina segmentos consecutivos de dados e pergunta se sequências similares tendem a permanecer similares quando expandidas por mais um ponto. Imagine que você está observando os batimentos cardíacos de uma pessoa. Se o coração bate em um padrão muito regular, conhecer os últimos dois ou três batimentos permite prever com boa precisão quando será o próximo. Essa alta previsibilidade resulta em valores baixos de entropia aproximada (Richman; Moorman, 2000).

A entropia de amostra (SampEn, do inglês *sample entropy*), desenvolvida posteriormente por Richman e Moorman em 2000, surgiu para corrigir uma limitação fundamental da ApEn. Essa métrica de complexidade elimina o problema das auto-correspondências, onde um padrão era comparado consigo mesmo, inflacionando artificialmente os resultados (Richman; Moorman, 2000). A SampEn oferece uma estimativa mais limpa da verdadeira complexidade do sistema, sendo menos sensível ao comprimento dos dados e fornecendo resultados mais consistentes.

Essas medidas de entropia capturam algo profundo sobre o funcionamento dos sistemas biológicos. Em condições saudáveis, nosso coração não bate como um metrônomo - essa regularidade excessiva seria, na verdade, um sinal de problemas. Em vez disso, um coração saudável exibe uma complexidade ótima: suficientemente regular para manter a função cardiovascular, mas suficientemente variável para se adaptar rapidamente às demandas do corpo. Quando essa complexidade diminui, indicando maior previsibilidade, frequentemente sinaliza disfunção autonômica ou doença.

Essas ferramentas nos permitem quantificar algo que antes só podíamos descrever qualitativamente: a “regularidade” de um batimento cardíaco, a “complexidade” ou a “previsibilidade” de ondas cerebrais. Elas transformam intuições clínicas em medidas objetivas, abrindo caminho para uma medicina mais precisa e personalizada, onde a complexidade dos sinais fisiológicos serve como uma janela para a saúde e a doença.

Essas ferramentas nos permitem quantificar algo que antes só podíamos descrever qualitativamente: a “regularidade” de um batimento cardíaco, a “complexidade” ou a “previsibilidade” de ondas cerebrais. Elas transformam intuições clínicas em medidas objetivas, abrindo caminho para uma medicina mais precisa e personalizada, onde a complexidade dos sinais fisiológicos serve como uma janela para a saúde e a doença.

A sinfonia das métricas

Cada métrica de complexidade é como um instrumento diferente em uma orquestra científica, cada um com sua própria voz, timbre e capacidade expressiva. A q-estatística de Tsallis pode ser o violino solista – elegante, matematicamente sofisticada e fundamental para capturar as nuances não-extensivas dos sistemas

complexos. Mas a verdadeira sinfonia da complexidade só emerge quando todo o conjunto de instrumentos trabalha em harmonia, criando uma experiência auditiva que transcende qualquer performance individual.

Imagine uma orquestra sinfônica onde cada seção tem sua especialidade: os violinos capturam as melodias delicadas e precisas, as madeiras adicionam texturas e nuances, os metais fornecem potência e drama, enquanto a percussão marca o ritmo e a estrutura temporal. Da mesma forma, nossas métricas de complexidade formam seções especializadas em uma orquestra analítica: a entropia de Tsallis ressoa como os violinos, capturando as correlações de longo alcance e as flutuações não-gaussianas; a complexidade de Lempel-Ziv atua como a seção de madeiras, detectando padrões repetitivos e novidades algorítmicas; as dimensões fractais funcionam como os metais, revelando estruturas geométricas em múltiplas escalas; e as entropias aproximada e de amostra trabalham como a percussão, estabelecendo ritmos de previsibilidade e regularidade temporal.

Esta metáfora não é meramente poética, ela revela uma verdade profunda sobre como a complexidade se manifesta na natureza. Sistemas biológicos frequentemente mostram alta complexidade multiescala (variabilidade rica em múltiplas escalas temporais) mas baixa complexidade algorítmica em certas estruturas (padrões que seguem regras relativamente simples). Esta aparente contradição revela, na verdade, a beleza da organização emergente, como a vida consegue criar padrões complexos a partir de regras fundamentais elegantes.

Considere o sistema cardiovascular humano, quando analisado através da entropia de Tsallis, correlações de longo alcance poderiam ser reveladas na variabilidade dos batimentos cardíacos, indicando uma complexidade não-extensiva que reflete a sofisticada regulação autonômica. Simultaneamente, a complexidade de Lempel-Ziv dos mesmos dados poderia mostrar uma estrutura algorítmica relativamente simples, indicando que, apesar da aparente aleatoriedade, existem padrões subjacentes governados por mecanismos fisiológicos elegantes. A dimensão fractal da rede vascular revelaria uma organização espacial que otimiza a distribuição de oxigênio e nutrientes, enquanto as entropias aproximada e de amostra dos **intervalos RR** capturam a capacidade adaptativa do sistema.

Esta abordagem multimétrica integrada está revolucionando campos que vão desde a neurociência até a economia. Na medicina personalizada, algoritmos

combinam múltiplas métricas de complexidade para criar perfis individuais de saúde, detectando precocemente alterações que nenhuma métrica isolada conseguiria capturar. Na ecologia quantitativa, a análise multifractal de padrões de distribuição espacial revela princípios de organização que governam desde a estrutura de comunidades microbianas até a dinâmica de ecossistemas inteiros (Alados et al., 2003; Saravia, 2014). Na inteligência artificial, a compreensão de como diferentes tipos de complexidade emerge em redes neurais artificiais está informando o desenvolvimento de arquiteturas mais eficientes e robustas (Szymanski; McCane; Atkinson, 2022).

A verdadeira magia acontece quando reconhecemos que a complexidade não é um atributo único e monolítico, mas sim uma propriedade multifacetada que se manifesta simultaneamente em múltiplas dimensões. Como uma sinfonia que só pode ser plenamente apreciada quando todos os instrumentos contribuem para a experiência musical coletiva, a complexidade dos sistemas naturais só pode ser verdadeiramente compreendida através da integração harmoniosa de múltiplas perspectivas métricas.

HÁ MÁGICA, SEMPRE

Podemos explicar a forma dos continentes da terra, o fluxo das galáxias, o surgimento de vida em algum canto borbulhante da terra primitiva? Não. Isto é, simplesmente, mágica. E sempre será. O que não significa que não possamos cientificamente observá-la e conversar com ela. Através da q-Estatística e da δ -estatística podemos explicar de forma mais clara como o Universo funciona, do micro ao macro, uma vez que a Teoria da Mecânica Estatística Não Extensiva integra de forma elegante o entendimento do simples e do complexo.

Assim como a consciência nunca será objeto da investigação científica devido a sua inacessibilidade, a natureza das incertezas nunca poderá ser explicada pela racionalidade científica ou desvendada em um laboratório. Esta incerteza, que nasce do mundo infinitamente pequeno das flutuações quânticas é a semente do Caos: o feitiço do qual emerge tudo que há, graças à Complexidade. O que é emaranhado, coletivo, diverso, evolutivo e vivo é complexo. A vida, o milagre incontestável que encanta o Universo, é a epifania da magia do Cosmos que humildemente só nos resta testemunhar.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOV, Dimitri Marques. Complexity and psychopathology: from mechanistic science to a physical understanding of the mental conditions based on chaos and complexity. *Frontiers in Psychiatry*, [s. l.], v. 17, p. 1764422, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2026.1764422>.
- ABRAMOV, Dimitri Marques; TSALLIS, Constantino; LIMA, Henrique Santos. Neural complexity through a nonextensive statistical-mechanical approach of human electroencephalograms. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 10318, 26 jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37219-5>.
- ABRAMOV, Dimitri Marques et al. Neurophysiological correlates to the human brain complexity through q-statistical analysis of electroencephalogram. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 36502, 20 out. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-21156-6>.
- ALADOS, Concepción L. et al. Quantitative characterization of the regressive ecological succession by fractal analysis of plant spatial patterns. *Ecological Modelling*, [s. l.], v. 163, n. 1-2, p. 1-17, maio 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00294-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00294-1).
- BAR-YAM, Yaneer. Multiscale complexity/entropy. *Advances in Complex Systems*, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 47-63, mar. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219525904000068>.
- BOLTZMANN, Ludwig. *Vorlesungen über Gastheorie*. Leipzig: J. A. Barth, 1896.
- BORLAND, Lisa. Option pricing formulas based on a non-Gaussian stock price model. *Physical Review Letters*, [s. l.], v. 89, n. 9, p. 098701, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.098701>.
- CHEN, Qi et al. Macular vascular fractal dimension in the deep capillary layer as an early indicator of microvascular loss for retinopathy in type 2 diabetic patients. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, [s. l.], v. 58, n. 9, p. 3785-3794, 25 jul. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1167/iov.17-21461>.
- CLARKE, Arthur Charles. *Profiles of the future: an inquiry into the limits of the possible*. Ed. rev. New York: Harper & Row, 1973.
- COUZIN, Iain D. et al. Collective memory and spatial sorting in animal groups. *Journal of Theoretical Biology*, [s. l.], v. 218, n. 1, p. 1-11, set. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1006/jtbi.2002.3065>.
- GOLDBERGER, Ary L. et al. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [s. l.], v. 99, supl. 1, p. 2466-2472, 19 fev. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.012579499>.
- IBÁÑEZ-MOLINA, Antonio J. et al. Multiscale Lempel-Ziv complexity for EEG measures. *Clinical Neurophysiology*, [s. l.], v. 126, n. 3, p. 541-548, mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2014.07.012>.
- LAPLACE, Pierre-Simon. *Essai philosophique sur les probabilités*. Paris: Courcier, 1814.
- LEITE-FILHO, Argemiro Teixeira et al. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, [s. l.], v. 12, p. 2591, 10 maio 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>.
- LORENZ, Edward Norton. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Boston, v. 20, n. 2, p. 130-141, mar. 1963. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0130:DNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2).
- LORENZ, Edward Norton. Predictability: does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas? In: ANNUAL MEETING OF THE AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE, 139., 1972, Washington, DC. Comunicação oral apresentada em 29 dez. 1972.
- LOUKIDIS, Andronikos; TRIANTIS, Dimos; STAVRAKAS, Ilias. Non-extensive statistical analysis of acoustic emissions: the variability of entropic index q during loading of brittle materials until fracture. *Entropy*, [s. l.], v. 23, n. 3, p. 276, 25 fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/e23030276>.
- LUTZ, Eric; RENZONI, Ferruccio. Beyond Boltzmann-Gibbs statistical mechanics in optical lattices. *Nature Physics*, [s. l.], v. 9, n. 10, p. 615-619, out. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphys2751>.
- MAY, Robert McCredie. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, [s. l.], v. 261, n. 5560, p. 459-467, jun. 1976. DOI: <https://doi.org/10.1038/261459a0>.
- MITSOKEPAS, Evangelos et al. Statistical characterization of airplane delays. *Scientific Reports*, [s. l.], v. 11, p. 7855, 12 abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87279-8>.

MORIN, Edgar. *Introduction à la pensée complexe*. Paris: ESF Éditeur, 1990.

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

PINCUS, Steven M. Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [s. l.], v. 88, n. 6, p. 2297-2301, 15 mar. 1991. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.88.6.2297>.

PINCUS, Steven M. Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure. *Chaos: an interdisciplinary journal of nonlinear science*, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 110-117, mar. 1995. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.166092>.

POINCARÉ, Henri. Sur le problème des trois corps et les équations de la dynamique. *Acta Mathematica*, [s. l.], v. 13, p. 1-270, 1890. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02392506>.

RICHMAN, Joshua S.; MOORMAN, J. Randall. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology – Heart and Circulatory Physiology*, [s. l.], v. 278, n. 6, p. H2039-H2049, jun. 2000. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajpheart.2000.278.6.H2039>.

SARAVIA, Leonardo A. mfSBA: multifractal analysis of spatial patterns in ecological communities. *F1000Research*, [s. l.], v. 3, p. 14, 7 abr. 2014. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.3-14.v2>.

SHANNON, Claude Elwood. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 379-423, jul. 1948. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>.

STAM, Cornelis J. Nonlinear dynamical analysis of EEG and MEG: review of an emerging field. *Clinical Neurophysiology*, [s. l.], v. 116, n. 10, p. 2266-2301, out. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2005.06.011>.

SZYMANSKI, Lech; MCCANE, Brendan; ATKINSON, Craig. Conceptual complexity of neural networks. *Neurocomputing*, [s. l.], v. 469, p. 52-64, jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.10.063>.

TSALLIS, Constantino. Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics. *Journal of Statistical Physics*, [s. l.], v. 52, n. 1-2, p. 479-487, jul. 1988. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01016429>.

TSALLIS, Constantino. *Introduction to nonextensive statistical mechanics: approaching a complex world*. 2. ed. Cham: Springer, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-79569-6>.

TSALLIS, Constantino; CIRTO, Leonardo José Lima. Black hole thermodynamical entropy. *The European Physical Journal C*, [s. l.], v. 73, p. 2487, jul. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-013-2487-6>.

TSALLIS, Constantino; TIRNAKLI, Ugur. Predicting COVID-19 peaks around the world. *Frontiers in Physics*, [s. l.], v. 8, p. 217, 2 jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.00217>.

TUFEKCI, Zeynep; WILSON, Christopher. Social media and the decision to participate in political protest: observations from Tahrir Square. *Journal of Communication*, [s. l.], v. 62, n. 2, p. 363-379, abr. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.2012.01629.x>.

WANG, S.-L.; LEE, H.-I.; LI, S.-P. Fractal dimensions of wildfire spreading. *Nonlinear Processes in Geophysics*, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 815-823, 7 ago. 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/npg-21-815-2014>.

WU, H. Multiscale entropy with electrocardiograph, electromyography, electroencephalography, and photoplethysmography signals in healthcare: a twelve-year systematic review. *Biomedical Signal Processing and Control*, [s. l.], v. 93, p. 106124, jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.106124>.

FINANCIAMENTO

Programa INOVA FIOCRUZ, da Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ)

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

FAPERJ: Programa PIP-V (Programa de Incentivo a Pesquisa) do Instituto Nacional de Saúde da Mulher, da Criança e do Adolescente Fernandes Figueira (IFF/FIOCRUZ)

FAPESPA (Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará)

DECLARAÇÃO DE CONFLITO DE INTERESSES

Os autores deste artigo declaram não possuir conflitos de interesse de ordem pessoal, financeira, comercial, política ou acadêmica, relacionados a produção e elaboração dos conteúdos e pesquisas de sua autoria, aqui apresentados.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Constantino Tsallis, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), mestre generoso e interlocutor de todas as horas, cuja obra inspirou este texto e cujo entusiasmo contagiante pela ciência, somado à disponibilidade em partilhar ideias com rara gentileza. Tê-lo como mentor, companheiro de trabalho e amigo é, para nós, um privilégio.

Agradecemos também ao Programa INOVA FIOCRUZ, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Programa PIP-V do Instituto Nacional de Saúde da Mulher, da Criança e do Adolescente Fernandes Figueira (IFF/FIOCRUZ) e à FAPESPA (Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará) pelo apoio às pesquisas dos autores na área de complexidade.

AUTORES

1 Doutor em Ciências Biológicas (Fisiologia), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Tecnologista em Saúde Pública, Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ).

2 Doutor em Neurociências e Biologia Celular, Universidade Federal do Pará (UFPA). Professor Titular, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará (UFPA).

Artigo aceito em 02 de outubro de 2026.

GLOSSÁRIO

Atrator: estado ou conjunto de estados para o qual a dinâmica de um sistema tende a convergir ao longo do tempo.

Caos (determinístico): comportamento aparentemente aleatório de sistemas regidos por regras determinísticas, extremamente sensível às condições iniciais: diferenças mínimas no início produzem trajetórias muito diferentes.

Complexidade: propriedade de sistemas cujos componentes mantêm singularidade e interação de forma interdependente, gerando padrões de ordem que não podem ser reduzidos à soma das partes.

Complexidade de Lempel-Ziv: medida do tamanho da descrição mínima necessária para reproduzir uma sequência de dados.

Correlação: grau em que o estado de um componente de um sistema está associado ao estado de outro.

Dimensão fractal: número, em geral fracionário, que expressa quanto uma forma irregular preenche o espaço quando observada em escalas cada vez menores.

Distribuição de probabilidade: função que descreve a chance de ocorrência de cada valor ou estado possível de uma variável.

Eletroencefalograma: registro da atividade elétrica do cérebro, captada por eletrodos colocados no couro cabeludo.

Entropia: medida do número de configurações microscópicas compatíveis com o estado observado de um sistema; na teoria da informação, medida da incerteza associada a uma mensagem.

Entropia aproximada e entropia de amostra: medidas da regularidade de séries temporais: valores baixos indicam sinais mais regulares e previsíveis.

Entropia multiescala: cálculo da entropia de um sinal em diferentes escalas de tempo, ou resolução temporais.

Estrutura dissipativa: sistema aberto que mantém sua organização longe do equilíbrio termodinâmico dissipando energia para o ambiente.

Intervalos RR: intervalos de tempo entre batimentos cardíacos consecutivos, medidos no eletrocardiograma.

Lei de potência: relação em que uma grandeza varia como potência de outra; decai mais lentamente que a função exponencial, o que permite influências de longo alcance.

Mapa logístico: equação simples que, dependendo do valor de seu parâmetro, gera comportamentos estáveis, periódicos ou caóticos.

Mecânica estatística: ramo da física que explica propriedades macroscópicas, como temperatura e pressão, a partir do comportamento estatístico dos componentes microscópicos.

Não extensividade e não aditividade: propriedade de sistemas em que a entropia do todo não corresponde à soma das entropias das partes.

q-Estatística (mecânica estatística não extensiva): generalização da mecânica estatística de Boltzmann-Gibbs proposta por Constantino Tsallis, na qual o parâmetro q quantifica o afastamento em relação ao caso de componentes independentes ($q = 1$).

GLOSSÁRIO