

INTRODUÇÃO À
COMPLEXIDADE
DO MOVIMENTO
HUMANO



INTRODUÇÃO À COMPLEXIDADE DO MOVIMENTO HUMANO

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Reitor

João Carlos Salles Pires da Silva

Vice-reitor

Paulo Cesar Miguez de Oliveira

Assessor do Reitor

Paulo Costa Lima



EDITORA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Diretora

Flávia Goulart Mota Garcia Rosa

Conselho Editorial

Alberto Brum Novaes

Ângelo Szaniecki Perret Serpa

Caiuby Alves da Costa

Charbel Niño El Hani

Cleise Furtado Mendes

Evelina de Carvalho Sá Hoisel

Maria do Carmo Soares de Freitas

Maria Vidal de Negreiros Camargo

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MULTI-INSTITUCIONAL
EM DIFUSÃO DO CONHECIMENTO
(DMMDC)

Coordenador Geral

Antonio Carlos dos Santos Souza

Vice-Coordenadora Geral

Maria Inês Corrêa Marques

Ana Paula Quixadá
Elaine Cristina Cambuí Barbosa
José Garcia Vivas Miranda
(Organizadores)

INTRODUÇÃO À COMPLEXIDADE DO MOVIMENTO HUMANO

Salvador
Edufba
2020

2020, Autores.
Direitos para esta edição cedidos à Edufba.
Feito o Depósito Legal.
Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua
Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

Capa
Tiago Miranda

Editoração
J. Nascimento

Revisão
Mariana dos Santos de Souza

Normalização
Kátia de Oliveira Rodrigues

Sistema de Bibliotecas – SIBI/UFBA

Introdução à complexidade do movimento humano / Ana Paula Quixadá, Elaine Cambuí, José Garcia Vivas Miranda, organizadores. – Salvador : EDUFBA, 2020.
107 p. : il. color.

Contém biografia
ISBN 978-65-5630-049-8

I. Corpo humano. 2. Fisiologia humana. 3. Anatomia humana. 4. Dança. 5. Esporte.
I. Quixadá, Ana Paula. II. Cambuí, Elaine. III. Miranda, José Garcia Vivas.

CDD – 612

Elaborada por Jamilli Quaresma
CRB-5: BA-001608/O

Editora filiada a



EDUFBA
Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Campus de Ondina,
40170-115, Salvador-BA, Brasil
Tel: +55 (71) 3283-6164
www.edufba.ufba.br | edufba@ufba.br

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo investimento na ciência e apoio à divulgação científica.

Agradecemos também ao Doutorado Multi-institucional e Multidisciplinar em Difusão do Conhecimento (DMMDC), programa de doutorado que tornou possível a organização deste livro, por acreditar que faríamos um bom trabalho.

Agradecemos ao Núcleo de Inovação Tecnológica e Reabilitação (Nitre), grupo de pesquisa que fazemos parte, pois todas as discussões que tivemos foram importantes para a construção deste conhecimento. Além disso, é muito prazeroso trabalhar com pessoas que querem avançar a ciência e fazem isso de forma leve, aproveitando os momentos do percurso. Em especial, agradecemos ao Prof. Dr. Norberto Peña, que sempre enxergou o potencial que os sistemas complexos tinham na análise do movimento.

Agradecemos a todos os patrocinadores do [I Encontro de Complexidade e Movimento Humano](#), pois sem a realização do evento não teríamos este livro! Então, muito obrigada Crefito 7, Qualitus, Extrafisio, Alkis Academy e Enactus UFBA.

Gostaríamos de agradecer também à Equipe Rocket, integrantes do Nitre que organizaram o evento. Muito obrigada pela dedicação e por investirem seu tempo na divulgação científica deste tema!

Agradecemos demais ao Prof. Dr. José Garcia Vivas Miranda, que todos os dias nos motiva e inspira a fazer ciência, mostrando a beleza da complexidade em todos os cantos da natureza, inclusive no movimento humano!

Sumário

9

Apresentação

13

Prefácio

17

Sistemas complexos: abordagem Interdisciplinar

Thiago da Cruz Figueiredo, José Garcia Vivas Miranda, Elaine Cristina Cambuí, Rosana Andrade, Raphael Rosário

29

Complexidade e as lesões no esporte

Natalia F. N. Bittencourt, Luciana D. Mendonça, Juliana M. Ocarino, Sérgio T. Fonseca

41

Entropia e criação em dança: probabilidades em movimento

Ângelo Frederico Souza de Oliveira e Torres, Cecília Bastos da Costa Accioly, José Garcia Vivas Miranda

51

**Análise biomecânica de movimentos complexos: aplicação do
*Movement Elements Decomposition (MED)***

Marina de Carvalho de Souza, José Garcia Vivas Miranda, Vitor Sotero dos Santos

67

Métodos Fractais: aplicação na análise de movimento

Ana Paula Quixadá, Denise Gomes de Castro, José Garcia Vivas Miranda

87

Expoente de Lyapunov

Ana Paula Quixadá, Denise Gomes de Castro, Jose Garcia Vivas Miranda

101

Sobre os(as) organizadores(as)

102

Sobre os(as) autores(as)

Apresentação

Em cordel apresentamos
Esse livro interessante
Surgiu de um seminário
Cheio de gente brilhante

O encontro aconteceu
Na UFBA¹ em Salvador
Complexidade e Movimento:
Tema bem inovador

Tanta aula interessante
Resultou nesse produto
Um novo olhar ao movimento
Pra quem dele faz estudo

Construímos um e-book
Coisa de gente moderna
Pra levar conhecimento
De forma leve e sincera

Nosso objetivo é claro
Discutir as referências
Em uma linguagem clara
Pra difundir essa ciência

Os capítulos estão distribuídos
De forma bastante lógica
Primeiro revisamos a teoria
Depois a parte metodológica

1 Universidade Federal da Bahia

“O que é complexidade?”
Me pergunta você
Para responder essa pergunta
O primeiro capítulo deve ler

Dando continuidade
A este tema importante
Entenda as lesões esportivas
Através da rede de determinantes

Para explicar entropia
Temos um texto que é pura elegância
Tal feito foi conquistado
Com a união da física com a dança

O quarto capítulo
O MED vai apresentar
E para falar dele
Duas estrofes vou usar

A decomposição do movimento
Das variáveis analisa a interação
Já foi usado na aprendizagem motora
E também na otimização

Fractais você vai conhecer
E depois vai me dizer
O quão correlacionadas
nossas passadas hão de ser

Para a leitura finalizar
O Lyapunov irá encontrar
Não se assuste com o nome
Há muita chance de adorar

Para entender complexidade
Não tem limite de idade
Basta estar aberto
À interdisciplinaridade

Desejamos que interaja
Com este livro baiano
Para surgir novos conceitos
Sobre o movimento humano

Ana Paula Quixadá
Bruna Improta
Elaine Cambuí
José Garcia Vivas Miranda

Prefácio

Caros(as) leitores(as), tenho uma importante função de apresentar-lhes este livro tão instigante. Mas antes disso, cabe aqui que eu comente sobre o meu local de fala: sou fisioterapeuta, formada em 1997 e desde que entrei na universidade, meus olhos brilhavam ao falar sobre o movimento humano, e desde então me considero uma entusiasta do movimento. Sou professora desde 2001, trabalhando com conteúdos que envolvem Cinesiologia, Biomecânica, Estudo e Avaliação do Movimento Humano. E foi a paixão pelo movimento humano e por tudo aquilo que não se explica, ainda, mas que vemos e vivemos quando interagimos com o ambiente, que me aproximou dos estudos sobre complexidade. Ainda engatinhando nesse meio, mas me apaixonando cada vez mais e percebendo a entropia que, ao mesmo tempo que conecta, diversifica tudo.

Como adiantei no parágrafo acima, o que você, caro(a) leitor(a), poderá encontrar nos capítulos deste livro? Posso dizer que, para os que não tem ideia do que significa sistemas complexos aplicados ao movimento humano, esse livro é para você, porque vai lhe aproximar de definições e de conteúdos que vão lhe direcionar no estudo da complexidade. Mas, se você já tem alguma ideia do que significa sistemas complexos e deseja entender e aprofundar sobre sua aplicabilidade nas diversas áreas do movimento, este livro também é para você, porque você vai saber, por exemplo, como aplicar complexidade em prevenção de lesões e na análise da marcha.

O capítulo 1, **Sistemas complexos: abordagem interdisciplinar**, traz a distinção entre o binômio reducionismo-complexidade, tenta definir complexidade, uma vez que é um fenômeno difícil de ser definido, aborda as propriedades que são relacionadas à complexidade e contextualiza a complexidade no corpo humano. Como todo primeiro capítulo, esse capítulo do livro é essencial para que você possa caminhar pelo livro de forma mais clara, pois vai lhe dar uma direção sobre o que você precisa saber para estudar sistemas complexos.

Já o segundo capítulo, **Complexidade e as lesões no esporte**, além de contextualizar as lesões esportivas na atualidade e no mundo,

comenta sobre como o paradigma reducionista, utilizado em larga escala na análise do movimento humano, não tem sido capaz de diminuir estatísticas de lesões esportivas. E de como o paradigma da complexidade pode se tornar uma forma de fazê-lo. E traz, ainda, alguns exemplos de aplicabilidade da complexidade por meio da rede de determinantes e da metodologia da árvore de classificação e regressão (*Classification and Regression Tree – CART*).

O capítulo 3, **Entropia e Improvisação: uma dança de probabilidades**, como fala o título, dança com a segunda lei da termodinâmica, que é a entropia. E preciso, nesse momento, fazer jus ao que está escrito no interior do capítulo: [esse capítulo busca] “*introduzir a entropia como forma de compreender o movimento humano dentro de uma perspectiva de complexidade, especialmente voltada para percepções da dança sobre o movimento e suas potencialidades como criação artística-movimento-poiésis*”. Esse capítulo vai longe, utilizando competição de times de futebol nos campeonatos para explicar entropia e volta para fazer um contexto histórico da dança enquanto possibilidades complexas de viver essa arte, em especial por meio da improvisação.

No quarto capítulo, **Análise biomecânica de movimentos complexos**, o(a) leitor(a) é instigado(a) com uma pergunta já de início e que vai conduzir todo o capítulo, criando no(a) leitor(a) uma curiosidade de finalizar o capítulo e chegar as mesmas conclusões que os autores. Ou não! Traz termos como isocronia e isogonia para tentar explicar o planejamento motor do movimento. Acrescenta o tempo e precisão na equação e apresenta fórmulas para explicar como esses fenômenos se relacionam. Apresenta Hoff e como seus estudos sobre função custo-tempo modificaram o entendimento sobre a análise do movimento, mas que ainda não foram suficientes para entender o todo. E, finalmente, apresenta os estudos de Miranda *et al* (2018), que desenvolveram um modelo denominado de MED – *Movement Element Decomposition*, que divide um movimento complexo em elementos de movimento para cada eixo de movimento, na tentativa de deixar a análise do movimento mais simples de compreender.

O capítulo 5, **Métodos Fractais: aplicação na análise do movimento**, você será apresentado(a) à noção de fractal, de algoritmos fractais, que são muito utilizados para criar as imagens em 3D que

vemos nos filmes de ficção científica, por exemplo, de dimensão fractal e de correlações de longo alcance (CLA). Estas duas últimas, utilizadas em análises do movimento humano, sendo a marcha o exemplo mais explorado nesse capítulo. A dimensão fractal tenta identificar o espaço ocupado pela trajetória do movimento e a CLA tenta identificar se é possível prever se um passo futuro é dependente ou não do passo que foi dado.

O sexto e último capítulo, **Expoente de Lyapunov**, se inicia discutindo o filme **Efeito Borboleta** para discutir (im)previsibilidade, faz uma pequena síntese do que foi apresentado nos capítulos anteriores, e tenta responder a questão que envolve a relação entre o acontecimento de um fenômeno e seu potencial de variabilidade. Apresenta o expoente de Lyapunov como um meio de avaliar a sensibilidade de um sistema em se manter estável diante de perturbações, com potencial impacto para determinar risco de quedas.

Esse é apenas um resumo do que esse livro pode te apresentar e espero que você tenha ficado tão curioso(a) como eu fiquei para lê-lo e descobrir as possibilidades que a complexidade pode nos dar para entender o movimento humano. Sucesso na sua leitura!

Ana Lúcia Barbosa Góes

Referências

MIRANDA, J. G. V. et al. Complex Upper-Limb Movements Are Generated by Combining Motor Primitives that Scale with the Movement Size. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 27 ago. 2018.

Sistemas complexos: abordagem Interdisciplinar

Thiago da Cruz Figueiredo
José Garcia Vivas Miranda
Elaine Cristina Cambuí
Rosana Andrade
Raphael Rosário

O que saberei responder no final do capítulo:

- Quais propriedades caracterizam um sistema complexo?
- Qual a diferença entre complicado, caótico e complexo?
- Por que o cérebro pode ser considerado um sistema complexo?



Fonte: adaptada da Wikipédia.

Reduccionismo e a noção de complexidade

Até o final do século XIX, o pensamento científico foi guiado e delimitado pela ideia do reduccionismo metodológico, defendida por filósofos, como Descartes (1937) e outros. O reduccionismo formou a base da metodologia científica e possibilitou avanços importantes nas áreas mais diversas. De forma simples, o reduccionismo estrito pode ser caracterizado por três princípios:

1. **Princípio da separabilidade:** determina que qualquer sistema, independente da sua natureza, pode ser decomposto e estudado em suas partes constituintes.
2. **Princípio da aditividade:** determina que o conhecimento sobre as partes que integram um sistema determina o conhecimento sobre o todo.
3. **Princípio da causalidade determinística:** determina que o conhecimento sobre as partes de um sistema e sua inter-relação em um determinado instante de tempo define completamente os seus estados futuros.

Uma consequência do reducionismo estrito, e especialmente da propriedade de causalidade determinística, é que o comportamento de um dado sistema estudado pode ser previsto com precisão no tempo, se todos os parâmetros relevantes forem conhecidos. É possível, por exemplo, determinar completamente a trajetória de um pêndulo simples, dados a posição, a velocidade inicial e o comprimento do fio. (TIPLER; MOSCA, 2007) Flutuações e irregularidades no comportamento destes sistemas são desconsideradas e tratadas como ruído.

A partir do início do século XX, novas formas de encarar os sistemas da natureza começaram a surgir e colocaram em xeque as premissas básicas do reducionismo metodológico. Alguns modelos exibiam a propriedade de que pequenas mudanças nas condições iniciais de simulações idênticas do problema geravam grandes divergências no seu comportamento futuro. (LORENZ, 1963) O estudo de fenômenos atmosféricos e problemas astronômicos modificou radicalmente a forma como a comunidade científica abordava diversos fenômenos na natureza. E assim, novos conceitos como caos, não linearidade, não localidade, incerteza e criticalidade começaram a surgir. Posteriormente, estes conceitos deram a origem a uma nova área de estudo interdisciplinar, o estudo da complexidade.

Essa nova metodologia de lidar com os sistemas possibilita um maior entendimento de fenômenos, como a emergência, que não poderia ser explicada analisando as componentes do sistema isoladamente como era tratado na abordagem reducionista.

O conceito de complexidade é frequentemente associado com a noção de caos. Sistemas caóticos apresentam um alto grau de não linearidade, uma vez que, pequenas mudanças nas condições iniciais do sistema levam a mudanças drásticas no comportamento do sistema ao longo de sua trajetória. Assim, apesar de apresentarem um comportamento determinístico numa escala de tempo curta, sistemas caóticos podem ser imprevisíveis quando considerados em escalas temporais mais longas. (SAVI, 2006) O pêndulo duplo, por exemplo, é um sistema simples, determinístico, que apresenta um comportamento caótico que se expressa em escalas de tempo longas, como pode ser visto [nesta simulação](#).

Em contraste, sistemas complexos apresentam algumas propriedades especiais comuns entre si, tais como:

1. Constante troca de informação e energia com o ambiente (sistemas abertos);
2. Presença de múltiplos subcomponentes;
3. Auto-organização;
4. Alta sensibilidade a variações nas condições iniciais;
5. Não extensividade e emergência.

Para ilustrar estas propriedades, é interessante considerar o exemplo da figura que ilustra o início do capítulo. O movimento de um bando de pássaros apresenta muitas propriedades de um sistema complexo: o bando é formado por um grande conjunto de milhares de indivíduos, está em constante troca de informação com o meio e se auto-organiza em resposta a este. Além disso, a configuração do bando como um todo se modifica ao longo do voo, de acordo com pequenas alterações na posição de cada animal. Por fim, o comportamento e a organização do bando não podem ser descritos diretamente pela capacidade de organização de cada animal, mas sim emerge globalmente do conjunto de interações locais entre os pássaros. (CAVAGNA et al., 2010)

Além das propriedades descritas acima, sistemas complexos possuem comportamento não determinístico, ou seja, conhecendo-se o estado do sistema em qualquer tempo anterior, não é possível determinar com certeza o seu estado em um tempo posterior. Dessa forma, este tipo de processo é descrito pela distribuição estatística a que os

seus parâmetros obedecem e é denominado *processo estocástico*. O estado de ativação de um dado neurônio no cérebro, por exemplo, não pode ser previsto com certeza. Este pode ser descrito pela probabilidade de transição entre os diferentes estados de ativação (IZHIKEVICH, 2008) e é um exemplo de fenômeno estocástico.

É possível obter informações importantes sobre um sistema deste tipo através da análise do tipo de distribuição que os seus parâmetros seguem. Apesar de distribuições gaussianas serem frequentemente observadas e muitas vezes serem associadas com a norma da natureza, nem todos os sistemas seguem uma curva normal. Algumas propriedades de certos sistemas não possuem um tamanho de escala característico, devido à ocorrência tanto de valores pequenos, como de valores relacionados a eventos extremos. Tamanhos de cidades (GABAIX, 1999), avalanches de areia (BAK; TANG; WIESENFELD, 1987), intervalo de tempo entre terremotos (BAK et al., 2002) e outros fenômenos são então descritos por distribuições do tipo lei de potência.

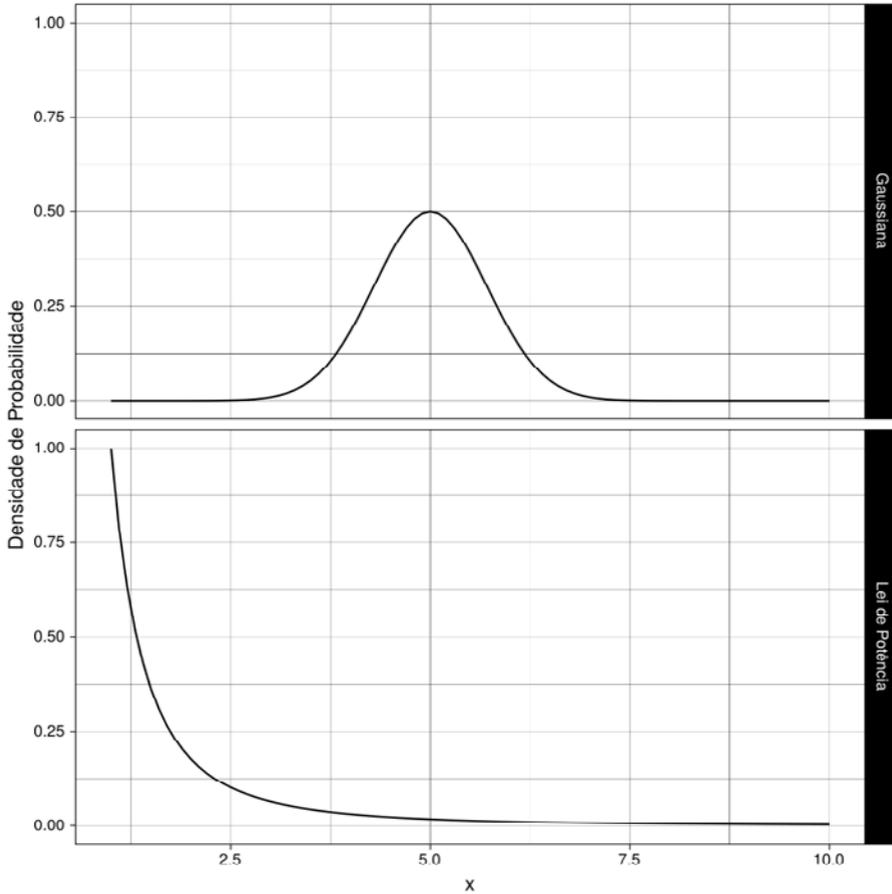
Leis de potência são expressões que relacionam o valor de uma grandeza física t com a probabilidade de ocorrência deste valor e possuem a forma (GLERIA; MATSUSHITA; SILVA, 2004)

$$p(t) = ct^{-\gamma} \text{ (Eq. 1)}$$

em que γ é um fator de decaimento. Distribuições do tipo lei de potência são encontradas nas proximidades de pontos críticos em fenômenos que apresentam transição de fase em seu comportamento. Por este motivo, a apresentação de distribuições tipo lei de potência é frequentemente associada com a noção de criticalidade. (GLERIA; MATSUSHITA; SILVA, 2004)

Distribuições do tipo lei de potência são frequentemente relacionadas com sistemas complexos auto-organizados. Avalanches de areia (BAK, 1996), padrões de ativação neuronal (BEGGS; PLENZ, 2003) e conectividade em redes cerebrais (KITZBICHLER, 2009) são exemplos de sistemas que se organizam espontaneamente em estados críticos, ou seja, sistemas criticamente auto-organizados.

Figura 1 - Densidade de probabilidade para distribuições do tipo normal e lei de potência



Fonte: elaborada pelos autores.

O organismo como um sistema complexo

Capaz de se modificar e se adaptar em diferentes ambientes e circunstâncias, o corpo humano é de fato um sistema robusto e complexo. Seu funcionamento, advindo de um processo dinâmico aberto, está sempre sujeito a diversos estímulos e interferências do ambiente à sua volta. Desta forma, a modelagem das funções e sinais do corpo humano apresenta-se como um problema complicado e de difícil solução.

A compreensão do corpo humano como um sistema complexo se deve a diversas propriedades que este possui. O fato deste ser composto por diversas partes que se organizam em estruturas funcionais de diferentes escalas é um exemplo da propriedade de emergência característica de sistemas complexos. Conjuntos de células se organizam em tecidos, que se organizam em órgãos, que se organizam em sistemas.

Outra propriedade importante está no fato dos sistemas do corpo humano funcionarem como uma rede inter-relacionada. O sistema imunológico depende do sistema circulatório, que depende também do sistema digestório, por exemplo. O que inviabiliza o estudo reducionista de suas partes separadas. Estudos sobre diversas doenças demonstraram relações de causalidade extremamente complexas, fazendo com que estas sejam entendidas como processos altamente não lineares. (CRAIG, 2008)

Por fim, pelo fato de o corpo humano ser, por si só, um sistema complexo auto-organizado, diversos mecanismos presentes no seu funcionamento apresentam distribuições do tipo lei de potência. (KAUFMANN, 1993) Dentre eles, podemos citar: as avalanches neuronais no cérebro (BEGGS, 2003), o aumento do tempo de resposta para tarefas não verbais em idosos (HALE, 1987) bem como as relações cinemáticas dos movimentos de escrita realizados pela mão. (LACQUANITI et al, 1983) Estas relações serão discutidas em detalhe no Capítulo 4.

Alguns estudos pioneiros foram feitos para avaliar o papel das flutuações estatísticas no funcionamento do sistema cardiovascular. (GOLDBERGER et al., 2002; PENG et al., 1993) Estes estudos demonstraram que as flutuações estatísticas nos batimentos cardíacos apresentam padrões de correlação bem definidos, tornando, assim, possível a distinção entre organismos saudáveis dos organismos na presença de doenças. Diversos estudos consequentes confirmaram a hipótese de que os batimentos cardíacos na presença de algumas doenças estão associados com baixa variabilidade do sistema. (ACHARYA, 2006) Esta baixa variabilidade parece estar diretamente relacionada com uma perda na capacidade de adaptação do coração às alterações em distúrbios como insuficiência cardíaca congestiva e flutter atrial. A perda de complexidade no organismo na presença de doenças apresenta o potencial de se configurar como uma hipótese geral sobre o organismo

humano, embora ainda precise ser aplicada a outros mecanismos e processos do organismo.

O movimento humano perpassa e interage com todos os sistemas presentes no corpo humano e é certamente um fenômeno complexo. Goldberger e demais autores (2002) também observaram um padrão fractal de autocorrelação na variabilidade no tempo da passada em indivíduos saudáveis, que apresenta alterações em idosos e em indivíduos com a doença de Parkinson. Apesar disso, o número de trabalhos que estudam o movimento humano sob este aspecto e propõem a avaliação do movimento humano através de medidas objetivas ainda é comparativamente pequeno. (BUCKLEY, 2019) Dessa forma, a avaliação deste fenômeno por profissionais da área de saúde é ainda uma tarefa difícil e estes profissionais encontram-se muitas vezes sem critérios objetivos de avaliação que possam auxiliar no diagnóstico e na reabilitação de desordens do movimento.

Complexidade no movimento humano

A partir dos anos 1980, foram desenvolvidos diversos trabalhos baseados na teoria da complexidade e de sistemas dinâmicos para estudar a coordenação do movimento humano em termos de estruturas dissipativas. (KELSO et al., 1980; KUGLER; KELSO; TURVEY, 1980) O modelo HKB criado por Haken, Kelso e Bunz, foi um dos principais trabalhos desenvolvidos a fim de explicar transições de fase na coordenação do movimento. (HAKEN; KELSO; BUNZ, 1985)

O modelo HKB procura descrever o comportamento do sistema em termos da diferença de fase Φ entre suas oscilações. No experimento estudado (KELSO, 1984), indivíduos foram orientados a oscilar os indicadores de cada mão simultaneamente em sentido alternado, acompanhando a frequência de um sinal luminoso. Diferença de fase, neste contexto, representa a distância em graus entre as oscilações dos indicadores da mão, por exemplo $\Phi=0^\circ$ significa uma perfeita sincronização entre os dedos e $\Phi=180^\circ$ uma perfeita dessincronização, ou seja, um dedo se movimenta sempre na direção oposta à do outro. Com o aumento gradual da frequência do sinal luminoso, o modo estável

anti-fase ($\Phi=180^\circ$) se torna instável ao se aproximar de uma frequência crítica e o movimento sofre uma transição abrupta para o modo em fase ($\Phi=0^\circ$). A frequência crítica assume um valor característico para cada pessoa, mas que se mantém constante em termos dos múltiplos da frequência de conforto individual. O mesmo fenômeno crítico já foi demonstrado para movimentos envolvendo múltiplas articulações. (BUCHANAN; KELSO, 1993)

Estudos mais recentes mostraram que a estabilidade dos modos de oscilação depende fortemente da integração de outras modalidades sensoriais (visão, tato etc.), indicando a influência do processamento cognitivo de alto nível no processo. (KELSO et al., 2001; MECHSNER et al., 2001) Deste modo, a criticalidade na coordenação do movimento parece advir de processos superiores do planejamento motor e não dos fatores biomecânicos ou músculo-esqueléticos. Para Tognoli e Kelso (2014), o mecanismo de sincronização de áreas distintas cumpre um papel fundamental na adaptabilidade natural do comportamento motor humano.

De forma complementar, Torre e colaboradores discutem a presença de autocorrelações de longo alcance na fase relativa Φ entre oscilações das duas mãos no experimento anterior de coordenação bimanual. (TORRE; DELIGNIÈRES; LEMOINE, 2007; TORRE; WAGENMAKERS, 2009) Os autores concluem que os modelos atuais de coordenação bimanual, apesar de descreverem o comportamento da transição de fase, não são capazes de descrever a origem das correlações de longo alcance de forma satisfatória. Especificamente, o modelo HKB só consegue descrever as correlações de longo alcance do modo fora de fase e não do modo em fase, também observadas experimentalmente.

Os estudos discutidos anteriormente apontam para uma visão do controle motor humano como sistema criticamente auto-organizado em resposta à interação com o ambiente. De forma que, suas propriedades complexas exercem um papel decisivo tanto no controle do movimento humano como no aprendizado de novas tarefas motoras.

Assim, como será discutido nos próximos capítulos, a interface entre sistemas complexos e movimento humano é uma área ativa de pesquisa e que pode oferecer respostas a perguntas de ambas as áreas, bem como indicar novos caminhos no estudo da reabilitação.

Referências

- ACHARYA, U. R. *et al.* Heart rate variability: a review. *Medical and Biological Engineering and Computing*, Stevenage, v. 44, p. 1031-1051, 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11517-006-0119-0.pdf>. Acesso em: 9 jan. 2019
- BAK, P. *How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality*. New York: Copernicus Book, 1996.
- BAK, P. *et al.* Unified scaling law for Earthquakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [S. l.], v. 99, p. 2509-2513, 2002. Suppl 1.
- BAK, P.; TANG, C.; WIESENFELD, K. Self-Organized Criticality: An Explanation of the 1/f noise. *Physical review letters*, New York, v. 59, n. 4, p. 381, 1987. Disponível em: https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.59.381?casa_token=qcjzjKvo08YAAAAA%3APIfoAmZh84n4W9-hacwCSUn-UTXkN4B9CqQPbzLGINbgKR3NijSjr8DObNclqMroLNjPYlrJEqpKMg. Acesso em: 20 jan. 2019
- BEGGS, J. M.; PLENZ, D. Neuronal Avalanches in Neocortical Circuits. *Journal of neuroscience*, Washington, v. 23, n. 35, p. 11167-11177, Dec. 2003. Disponível em: https://www.jneurosci.org/content/jneuro/23/35/11167.full.pdf?__hstc=13887208.80e04c8546b95c084f29020f784e9ff0.1472169600048.1472169600050.1472169600051.2&__hssc=13887208.1.1472169600051&__hsfp=1773666937. Acesso em: 25 nov. 2018
- BUCHANAN J. J.; KELSO, J. A. S. Posturally induced transitions in rhythmic multijoint limb movements. *Experimental Brain Research*, Berlin, v. 94, p. 131-142, 1993. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF00230476.pdf>. Acesso em: 13 out. 2018
- BUCKLEY, C. *et al.* The role of movement analysis in diagnosing and monitoring neurodegenerative conditions: insights from gait and postural control. *Brain sciences*, Basel, v. 9, n. 34, p. 1-21, 2019.
- CAVAGNA, A., *et al.* Scale-free correlations in starling flocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [S. l.], v. 107, n. 26, p. 11865-11870, 2010. Disponível em: <https://www.pnas.org/content/pnas/107/26/11865.full.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2019
- CRAIG, J. Complex Diseases: Research and Applications. *Nature Education*, [S. l.], v. 1, n. 1, 2008.

DESCARTES, R. *Discours de la méthode. Oeuvres de Descartes*. Scotts Valley: [s. n.], 1937.

THE DOUBLE pendulum. [S. l.], 16 July 2017. Disponível em: <https://scipython.com/blog/the-double-pendulum/> Acesso em: 30 set. 2020

GABAIX, X. Zipf's law for cities: an explanation. *The Quarterly journal of economics*, Cambridge, v. 114, n. 3, p. 739-767, 1999. Disponível em: https://scholar.harvard.edu/files/xgabaix/files/zipfs_law.pdf. Acesso em: 17 dez. 2018

GLERIA, I.; MATSUSHITA, R.; SILVA, S. da Sistemas complexos, criticalidade e leis de potência. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 99-108, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v26n2/a04v26n2.pdf>. Acesso em: 30 set. 2019

GOLDBERGER, A. L. *et al.* Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, [S. l.], v. 99, p. 2466-2472, Feb. 2002. Suppl 1. Disponível em: https://www.pnas.org/content/pnas/99/suppl_1/2466.full.pdf. Acesso em: 30 jun. 2018.

HAKEN, H.; KELSO, S.; BUNZ, H. A Theoretical Model of Phase Transitions in Human Hand Movements. *Biological Cybernetics: Advances in Computational Neuroscience*, New York, v. 51, n. 5, p. 347-356, Feb. 1985.

HALE, S.; MYERSON, J.; WAGSTAFF, D. General slowing of nonverbal information processing: Evidence for a power law. *Journal of Gerontology*, Washington, v. 42, n. 2, p. 131-136, Mar. 1987.

IZHIKEVICH, E. M. *Dynamical Systems in Neuroscience: The geometry of excitability and bursting*. Cambridge: MIT Press, 2008.

KAUFMANN, S. A. *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. New York: Oxford University Press, 1993.

KELSO, J. A. S. Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, Bethesda, v. 246, n. 6, p. 87-95, June 1984.

KELSO, J. A. S. *et al.* Haptic information stabilizes and destabilizes coordination dynamics. *Proceedings of the Royal Society of London*, London, v. 268, B, p. 1207-1213, 2001. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rspb.2001.1620>. Acesso em: 27 nov. 2018

- KELSO, J. A. S. *et al.* 2 On the Concept of Coordinative Structures as Dissipative Structures: II. Empirical Lines of Convergence. *Advances in Psychology*, Amsterdam, v. 1, p. 49-70, 1980.
- KITZBICHLER, M. G. *et al.* Broadband Criticality of Human Brain Network Synchronization. *PLoS Computational Biology*, [S. l.], v. 5, n. 3, e1000314, Mar. 2009. Disponível em: <https://journals.plos.org/ploscompbiol/article/file?id=10.1371/journal.pcbi.1000314&type=printabl>. Acesso em: 20 dez. 2018
- KUGLER, P. N.; KELSO, J. A. S.; TURVEY, M. T. 1 On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. *Advances in Psychology*, Amsterdam, v. 1, p. 3-47, 1980.
- LACQUANITI, F.; TERZUOLO, C.; VIVIANI, P. The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, Amsterdam, v. 54, n. 1-3, p. 115-130, Oct. 1983.
- LORENZ, E. N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Boston, v. 20, p. 130-141, 1963.
- MECHSNER, F *et al.* Perceptual basis of bimanual coordination. *Nature*, [S. l.], v. 414, p. 69-73, nov. 2001. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/35102060.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2018
- PENG, C. K. *et al.* Long-range anticorrelations and non-Gaussian behavior of the heartbeat. *Physical Review Letters*, New York, v. 70, n. 9, p. 1343-1346, 1993.
- SAVI, M. A. *Dinâmica não-linear e caos*. [S. l.]: E-papers, 2006.
- TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Physics for scientists and engineers*. New York: Macmillan, 2007.
- TOGNOLI, E.; KELSO, J. A. S. The Metastable Brain. *Neuron*, Cambridge, v. 81, n. 1, p. 35-48, 2014. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3997258/pdf/nihms551854.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2018
- TORRE, K.; DELIGNIÈRES, D.; LEMOINE, L. $1/f^\alpha$ fluctuations in bimanual coordination: an additional challenge for modeling. *Experimental Brain Research*, Berlin, v. 183, n. 2, p. 225-234, 2007.
- TORRE, K.; WAGENMAKERS, E.-J. Theories and models for $1/f^\alpha$ noise in human movement science. *Human Movement Science*, Amsterdam, v. 28, p. 297-318, 2009. Disponível em: <https://www.ejwagenmakers.com/2009/TorreWagenmakers2009.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2018

Complexidade e as lesões no esporte

Natalia F. N. Bittencourt
Luciana D. Mendonça
Juliana M. Ocarino
Sérgio T. Fonseca

O que saberei responder no final deste capítulo:

- Quais as principais características da complexidade aplicada às lesões esportivas?
- Como diferentes perfis de risco podem levar a mesma lesão?
- Como a rede de determinantes pode ajudar no entendimento das lesões?



Fonte: elaboração dos autores.

Introdução

As lesões no esporte causam grandes prejuízos financeiros e táticos para os times e interferem na saúde dos atletas. (HÄGGLUND et al., 2013) Por exemplo, no futebol, o custo anual de lesões foi de 74 milhões de libras para a liga inglesa. Além disso, a taxa de incidência de lesão muscular permaneceu inalterada durante sete temporadas de futebol na Europa. (EKSTRAND; HÄGGLUND; WALDÉN, 2011) Esses dados sugerem que as intervenções voltadas para reabilitação e prevenção podem não estar sendo eficazes. Essa menor eficácia poderia ser justificada pela inconsistência existente na literatura referente à identificação dos fatores de risco (MENDIGUCHIA; ALENTORN-GELI;

BRUGHELLI, 2012), pois a forma como as lesões esportivas têm sido estudadas e, conseqüentemente, as análises empregadas, estão pautadas em um paradigma reducionista. (MENDIGUCHIA; ALENTORN-GELI; BRUGHELLI, 2012) De acordo com esse paradigma, o fenômeno pode ser retirado do contexto, pois assume-se que o sistema é a soma das suas partes. (QUATMAN; QUATMAN; HEWETT, 2009)

Além disso, o processo de causalidade é visto de forma linear e unidirecional, permitindo análises de associação, que podem ser úteis para algumas perguntas científicas. Entretanto, para o entendimento das relações não lineares entre os fatores de risco e para uma melhor definição da etiologia das lesões e, por consequência, da predição, torna-se necessário uma nova abordagem. Dessa forma, em 2016, Bittencourt e demais autores propuseram que a lesão fosse analisada através da abordagem dos sistemas complexos. Neste capítulo, iremos abordá-la aplicando seus conhecimentos no universo das lesões esportivas, mas, antes disso, iremos brevemente descrever e contrapor o paradigma reducionista.

O paradigma reducionista

Tradicionalmente, o paradigma reducionista tem sido a referência para a ciência moderna e grandes avanços no conhecimento foram conquistados devido aos princípios de redução e simplificação de uma ampla variedade de fenômenos. (BERTALANFLY, 2008) A abordagem reducionista tem como pressuposto que os fenômenos são derivados de sistemas simples, os quais são caracterizados por um número pequeno de partes que podem ser decompostas e depois reunidas, sem alterar as características do sistema (BERTALANFLY, 2008), ou seja, o todo é igual à soma das partes. Um exemplo de sistema simples seria o brinquedo lego ou um quebra-cabeça.

A limitação do paradigma reducionista não se refere ao paradigma em si, mas sim ao seu uso ilimitado para explicar todos os tipos de fenômenos. (MORIN, 2007) Uma vez considerando os limites do paradigma reducionista, ele conserva sua validade e utilidade na ciência moderna. Neste sentido, outras abordagens podem ser mais apropriadas para compreender fenômenos que são analisados de forma restrita

pelo olhar reducionista e podem complementar o entendimento de fenômenos complexos. (MORIN, 2007)

Seguindo essa proposta, o paradigma da complexidade vem sendo utilizado por diversas áreas do conhecimento (ciências sociais, medicina, mercado financeiro e engenharia ambiental) como alternativa para o entendimento de fenômenos mais complexos, nos quais é necessário compreender as relações entre o todo e as partes. (MORIN, 2007; RICKLES; HAWE; SHIELL, 2007) Mais especificamente, as partes de um sistema se interagem de certa forma que o comportamento do sistema como um todo não pode ser predito apenas pelo comportamento de suas partes (HIGGINS, 2002), ou seja, o todo é maior (ou diferente) que a soma das partes. (MORIN, 2007) Portanto, a natureza multifatorial de um fenômeno pode ser melhor compreendida utilizando uma abordagem que considere a relação complexa entre os fatores (partes) e o desfecho.

O paradigma da complexidade aplicado as ciências biológicas define que o organismo é um sistema complexo constituído de processos interativos, em contraste com a visão reducionista que o reconhece como uma máquina composta de partes. (MORIN, 2007) Entretanto, o entendimento do comportamento de sistemas biológicos, sob o ponto de vista da complexidade apresenta grande dificuldade, mesmo quando uma descrição acurada dos seus componentes está disponível. Esta dificuldade reside em três questões:

1. existe uma complexidade inerente ao sistema e seus componentes;
2. os processos envolvendo esses componentes operam em diferentes escalas e estruturas;
3. as interações funcionais nos sistemas biológicos são não lineares, ou seja, pequenas mudanças em alguns parâmetros do sistema complexo podem levar a mudanças qualitativas e quantitativas em larga escala de todo o comportamento do sistema. (HIGGINS, 2002)

Tendo em vista que o paradigma da complexidade tem como base a análise de sistemas complexos, as principais características desses sistemas seguem descritas abaixo:

Principais características dos sistemas complexos relacionadas à lesão esportiva

Bertalanfly define sistema como um todo constituído de partes em interação. Ou seja, se, no conjunto de elementos, não há interação, então, este é apenas um aglomerado e não um sistema. (BERTALANFLY, 2008) A compreensão de interação é fundamental no pensamento complexo, uma vez que, se dois elementos, A e B, estão em interação, o comportamento de A interagindo com B é diferente comparado ao seu comportamento em uma outra relação. (BERTALANFLY, 2008) Neste sentido, os sistemas complexos são sistemas dinâmicos, abertos, com elementos em interação, nos quais novos comportamentos surgem, e não podem ser entendidos pelas propriedades dos elementos, mas sim pelas interações estabelecidas entre eles. (RICKLES; HAWE; SHIELL, 2007)

Sistemas Abertos

Os sistemas complexos são considerados sistemas abertos e estes são caracterizados por manter uma contínua troca de energia e matéria com o ambiente, ao contrário dos sistemas fechados (trocam apenas energia) e dos sistemas isolados (não trocam nem matéria e energia com o ambiente). (BERTALANFLY, 2008) Além disso, os sistemas abertos conservam sua estrutura mesmo mediante a construção e decomposição de seus componentes. Finalmente, outra característica dos sistemas abertos é a equifinalidade, ou seja, o mesmo estado final pode ser alcançado partindo de diferentes condições iniciais e depois de perturbações do processo, diferente do que acontece nos sistemas fechados. (BERTALANFLY, 2008)

Não linearidade

A não linearidade é uma característica inerente aos sistemas complexos, os quais, diferentemente de sistemas lineares, não apresentam proporcionalidade e superposição. (HIGGINS, 2002) Proporcionalidade significa uma linearidade no comportamento do estímulo com o da resposta. A superposição infere que o comportamento final do sistema é dado pelo somatório de suas partes constituintes. (HIGGINS, 2002) Entretanto, nos sistemas complexos, a proporcionalidade não se aplica,

pois uma pequena mudança nos parâmetros iniciais pode resultar em efeitos amplos e imprevisíveis no comportamento do sistema como um todo. Somado a isso, há a interação entre os componentes dos sistemas complexos e muitas vezes esta interação é através de traços de realimentação. A realimentação é um arranjo circular de elementos ligados entre si, no qual o valor da resposta de uma determinada equação não linear é usado como valor para próxima solução. Dessa forma, a realimentação associada à não linearidade confere uma dinâmica ao sistema, uma vez que existe uma interdependência entre os elementos, o qual gera um comportamento diferente daquele em que há proporção e somatórios dos elementos. (HIGGINS, 2002)

Auto-organização

A estabilidade afastada do equilíbrio, através da dissipação de energia, confere aos sistemas complexos a possibilidade de auto-organização. Segundo Prigogine, a auto-organização é a emergência espontânea de novas estruturas e de novas formas de comportamento em sistemas abertos, caracterizado por laços de realimentação internos descritos matematicamente por meio de equações não lineares. (PRIGOGINE, 1989) Essa auto-organização do sistema é dinâmica e permite adaptações a mudanças internas e externas (COFFEY, 1998), ou seja, uma nova forma de organização emerge, a partir do ponto de bifurcação, no qual o sistema irá se ramificar em um novo estado. (PRIGOGINE, 1989) Por exemplo, após uma entorse de tornozelo, pode ocorrer uma limitação de mobilidade da dorsiflexão e gerar aumento de absorção de energia mecânica no joelho, por via compensatória. Dessa forma, uma nova configuração na cadeia cinética irá aumentar a demanda no joelho e elevar a chance de lesão nessa região.

No ponto de bifurcação, o sistema irá seguir uma nova ramificação dentre as várias disponíveis, pois, nos sistemas não lineares, as condições iniciais não são esquecidas e a história do sistema conta. (PRIGOGINE, 1989; RICKLES; HAWE; SHIELL, 2007; STERN; HEGEDUS; LAI, 2020) Nesse sentido, o caminho que o sistema irá seguir depende também de sua história e de várias condições externas. Portanto, há uma indeterminação em cada ponto de bifurcação (saúde x lesão) e por isso o comportamento do sistema só pode ser previsto em curto espaço de tempo. (STERN; HEGEDUS; LAI, 2020)

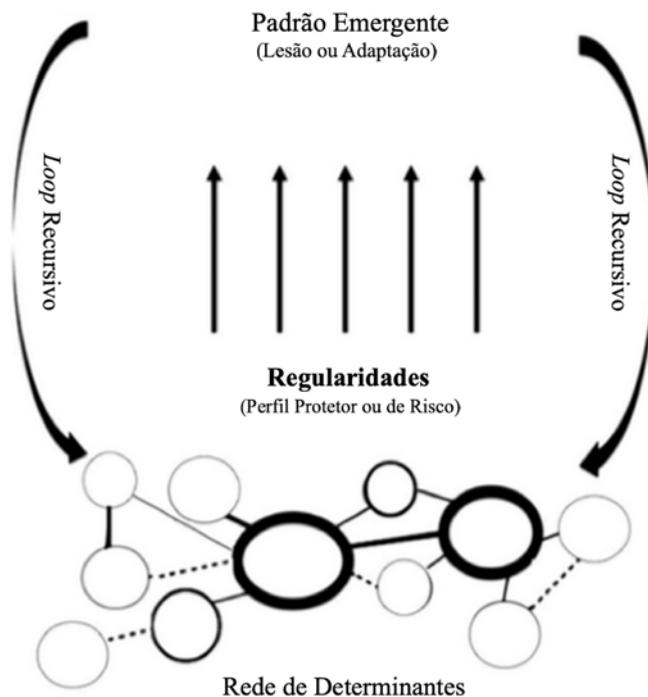
Aplicabilidade da complexidade nas lesões esportivas

O paradigma da complexidade sugere a complementariedade dos métodos qualitativo com o quantitativo e da análise local com a global. (MORIN, 2007) Dessa forma, o estudo da lesão esportiva sob o paradigma da complexidade necessita que o atleta seja analisado como um sistema complexo. (BITTENCOURT et al., 2016) Por exemplo, durante uma pré-temporada, um atleta pode apresentar uma fraqueza acentuada e comprimento diminuído de flexores de joelho, não ter história progressiva de estiramento nesta musculatura e, na semana da lesão, classificar como ótima a recuperação na escala subjetiva de Borg (percepção de esforço do indivíduo ao exercício).

O estiramento de isquiossurais pode ocorrer devido à interação entre a fraqueza dos isquiossurais com o tipo de treinamento físico na temporada. Apesar da informação de boa recuperação muscular dada pelo atleta, a força pode estar num limiar abaixo do adequado para o atleta realizar o treinamento de corridas curtas de alta velocidade, por exemplo. Além disso, se o atleta tem um perfil psicológico de grande motivação e disciplina, o estímulo deste tipo de treinamento pode ser o gatilho para esta lesão, uma vez que um atleta desmotivado não iria realizar os exercícios com tanta intensidade. Dessa forma, este exemplo considera a circularidade das interações entre os fatores preditores de diferentes escalas, ao contrário de uma causalidade unidirecional e linear classicamente analisadas nos estudos.

Nesse sentido, ao invés de analisar causas, nós devemos encontrar relações que formam as regularidades referentes ao perfil de risco para lesões no esporte. Esse perfil pode ser analisado através da rede de determinantes (Figura 2).

Figura 2 - Modelo de complexidade para lesões esportivas. A rede de determinantes é composta por fatores de diferentes níveis e pesos. As linhas escuras são interações fortes e as pontilhadas as interações fracas. As setas mostram as regularidades que levam ao perfil de risco/proteção para emergência da lesão ou adaptação



Fonte: adaptado de Bittencourt e demais autores (2016).

Existem duas formas diferentes de abordar um fenômeno complexo. Em um nível mais global e topográfico, é necessário identificar a variável (ou as variáveis) que melhor representa o estado do sistema e caracteriza sua dinâmica. Essa abordagem não revela quais fatores estão relacionados com a lesão, ou seja, a rede de determinantes, mas permite prever (*forecasting*) a emergência de uma lesão. Neste caso, a abordagem de sistemas complexos irá identificar as mudanças globais do comportamento do atleta, que pode refletir as mudanças do seu estado interno. Essas mudanças, no último caso, podem ser informativas da possibilidade de uma lesão eminente. Infelizmente, essa abordagem ainda requer estudos para identificar as variáveis que podem ser candidatas a representar a dinâmica do sistema. De forma diferente, outra abordagem compatível com a complexidade pode identificar os padrões de interações entre os fatores que podem estar associados ao aumento do

risco de lesão no esporte. Nesta segunda abordagem, o desafio é achar os padrões de interações entre fatores já reconhecidos na literatura.

Recentemente, o clube de futebol espanhol Barcelona, publicou um *Guideline* de lesão muscular (PRUNA et al., 2019) e os autores montaram uma rede de determinantes teóricas, usando os principais fatores de risco publicados na literatura. Os nodos mais relevantes da rede (círculos fortes) foram: 1) lesão prévia; 2) fadiga e 3) força muscular. A fadiga é o resultado da carga externa e interna, que por sua vez é influenciada pelo nível de *fitness* do atleta. A lesão prévia pode interagir com as qualidades de força e aumentar os desequilíbrios, que então podem ser potencializados pelas alterações de mobilidade e idade. (PRUNA et al., 2019) Dessa forma, a lesão pode ocorrer não pela ação direta de um dos três fatores isoladamente, mas sim pela interação entre eles, que são modulados pelos demais itens, mas com peso menor. (PRUNA et al., 2019)

Implicações metodológicas

Para visualizar as possíveis redes de determinantes, podemos usar as análises feitas pelas árvores de decisão, como a Classification and Regression Tree (CART). A árvore de classificação e regressão é um modelo de classificação (regressão) multivariado, não paramétrico, que desenvolve uma árvore de decisão utilizando algoritmos. (BREINAM et al., 1984). A CART foi desenvolvida em 1984 por Breiman e demais autores e tem sido usada com sucesso, na área da saúde, em análise de dados clínicos para verificar interações não lineares entre preditores e o desfecho. (CHESTER et al., 2019; MENDONÇA et al., 2018) Além disso, a disposição dos resultados gerados pela CART na forma de regras de decisão é de fácil entendimento e muito similar às conclusões heurísticas para um problema da prática clínica. Tendo em vista essas características, a CART é um método estatístico indicado para as análises de problemas complexos. (BREINAM et al., 1984)

Essa árvore de decisão é criada por meio de algoritmos que geram divisões binárias sucessivas do conjunto inicial de dados que ocorrem até que futuras divisões não sejam possíveis ou que critérios pré-estabelecidos para o crescimento da árvore sejam alcançados. (BREINAM et al., 1984) Para cada uma dessas divisões, todas as variáveis preditoras

(que podem explicar o fenômeno) são consideradas e todos os possíveis pontos de corte são considerados para se estabelecer aquele preditor e seu respectivo ponto de corte que melhor divide os dados em subgrupos (nodos) cada vez mais internamente homogêneos e heterogêneos entre si. (VENKATASUBRANIAM et al., 2017)

A ordem de entrada das variáveis preditoras no modelo ilustra, hierarquicamente, a força de associação entre cada preditor e a variável desfecho, e as divisões subsequentes à divisão inicial identificam as interações entre preditores. A escolha da CART para análise de interação de dados é baseada no fato dessa ser uma análise robusta, que consegue capturar relações não lineares entre preditores e por produzir resultados de fácil interpretação/aplicação por meio de regras de tomada de decisão clínica. (MENDIGUCHIA; ALENTORN-GELI; BRUGHELLI, 2012; VENKATASUBRANIAM et al., 2017)

Através da CART, Mendonça e demais autores (2018) demonstraram a relação não linear entre fatores associados com a Tendinopatia Patelar (TP). A contribuição do alinhamento varo do antepé-perna e a amplitude de movimento passiva de rotação medial de quadril para a ocorrência da TP dependeu de um ponto de corte específico do torque dos músculos rotadores laterais do quadril, no qual valores $< 0.31\text{Nm/kg}$ foram associados com TP. De forma oposta, o mesmo ponto de corte do alinhamento do pé e amplitude de movimento passiva de rotação medial do quadril, mas com interação com o torque dos músculos rotadores laterais $> 0.31\text{Nm/kg}$ não foi associado com TP (perfil de proteção).

Esse exemplo de árvore de decisão identificou o perfil de risco que engloba a complexidade no sentido de que decisões clínicas podem ser feitas no ambiente esportivo. Nesse sentido, é necessário expandir esses resultados da TP para analisar e entender as relações complexas entre fatores biomecânicos, comportamentais, fisiológicos e psicológicos relacionados com a emergência de outras lesões no esporte, como LCA e lesão muscular. Dessa forma, o processo de tomada de decisão em relação ao manejo do risco de lesões pode ser facilitado usando árvores de decisões para visualizar as interações complexas entre diferentes determinantes.

Considerações finais

O entendimento das lesões esportivas sob a ótica da complexidade promove um avanço metodológico e clínico. Neste sentido, novos métodos podem aumentar nosso poder explicativo e nos ajudar a identificar os atletas com alto risco de lesão, que por sua vez pode fomentar informações para a prevenção efetiva das lesões. Além disso, na prática clínica, a tomada de decisão é baseada em elementos individuais, levando o contexto e o passado do paciente em consideração. Dessa forma, como uma mesma lesão pode ser causada por diferentes caminhos, a avaliação individual aplicada ao contexto do paciente é vital para a reabilitação mais assertiva das lesões.

Referências

BERTALANFLY, L. von. Teoria geral dos sistemas: fundamentos, desenvolvimento e aplicações. 6. ed. Petrópolis: Vozes, 2008.

BITTENCOURT, N. F. N. *et al.* Complex systems approach for sports injuries: moving from risk factor identification to injury pattern recognition-narrative review and new concept. *British Journal of Sports Medicine*, Loughborough, v. 50, p. 1309-1314, 2016. Disponível em: <https://bjsm.bmj.com/content/50/21/1309.citation-tools> Acesso em: 10 nov. 2019.

BREIMAN, L. *et al.* Classification and Regression Trees. Belmont: Wadsworth International, 1984.

CHESTER, R. *et al.* Self-efficacy and risk of persistent shoulder pain: results of a Classification and Regression Tree (CART) analysis. *British Journal of Sports Medicine*, Loughborough, v. 53, p. 852-834, 2019. Disponível em: https://bjsm.bmj.com/content/bjsports/53/13/825.full.pdf?casa_token=mkcWb59ibr0AAAAA:FWul51A115T1RalbRLQtVVBQCteqJl oSzNTZNTxev3MK1SnX3ehuIoQmASGWvirHO3JEqN6T0Wo. Acesso em: 13 nov. 2019.

COFFEY, D. S. Self-organization, complexity and chaos: The new biology for medicine. *Nature Medicine*, New York, v. 4, n. 8, p. 882-885, 1998. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nm0898-882.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2019.

EKSTRAND, J.; HÄGGLUND, M.; WALDÉN, M. Injury incidence and injury patterns in professional football: the UEFA injury study. *British Journal of Sports Medicine*, Loughborough, v. 45, p. 553–558, 2011. Disponível em: https://bjsm.bmj.com/content/bjsports/45/7/553.full.pdf?45%2F7%2F553%3B45%2F7%2F553=&casa_token=TM95aaFpszwAAAAA:IXJ-IX7PrxfaiZw1iOEJ4V97eyhSU7KuRMjS40MExM4VSReaL4XxJcFwsmJ-ryiMzQsqQk4964D. Acesso em: 2 nov. 2019.

HÄGGLUND, M. *et al.* Injuries affect team performance negatively in professional football: an 11-year follow-up of the UEFA Champions League injury study. *British Journal of Sports Medicine*, Loughborough, v. 47, p. 738-742, 2013. Disponível em: <https://bjsm.bmj.com/content/bjsports/47/12/738.full.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2019.

HIGGINS, J. P. Nonlinear Systems in Medicine. *Yale Journal of Biology and Medicine*, New Haven, v. 75, p. 247-260, 2002. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2588816/pdf/yjbm00009-0010.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2019.

MENDIGUCHIA, J.; ALENTORN-GELI, E.; BRUGHELLI, M. Hamstring strain injuries: are we heading in the right direction? *British Journal of Sports Medicine*, Loughborough, v. 46, n. 2, p. 81-85, Feb 2012. Disponível em: https://bjsm.bmj.com/content/bjsports/46/2/81.full.pdf?casa_token=_Tkwp27sASYAAAAA:RnReHQyLGtmNiNXilyDqIywE7_-mcQ3N6VMfucKAHHHEzS88gbr3IjyseXWvdxMgltybpBQ7hKG. Acesso em: 2 nov. 2019.

MENDONÇA, L. D. *et al.* Association of Hip and Foot Factors with Patellar Tendinopathy (Jumper's Knee) in Athletes. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, Alexandrina, v. 48, n. 9, p. 676-684, 2018.

MORIN, E. *A inteligência da complexidade*. Lisboa: Instituto Piaget, 2007.

PRIGOGINE, I. The philosophy of instability. *Futures*, [S. l.], v. 21, n. 4, p. 396-400, 1989.

PRUNA, R. *et al.* *Muscle Injury Guide: Preventing and Treating Muscle Injuries in Footballers'*. Barcelona, 2019. Disponível em: <https://barcainnovationhub.com/pt/muscle-injury-guide-preventing-and-treating-muscle-injuries-in-football/>. Acesso em: 9 nov. 2019.

QUATMAN, C. E.; QUATMAN, C. C.; HEWETT, T. E. Prediction and prevention of

musculoskeletal injury: a paradigm shift in methodology. *British Journal of Sports Medicine*, Loughborough, v. 43, n. 14, p. 1100-1107, Dec. 2009. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4034276/pdf/nihms575676.pdf>. Acesso em: 7 nov. 2019.

RICKLES, D.; HAWE, P.; SHIELL, A. A simple guide to chaos and complexity. *Journal of Epidemiol and Community Health*, London, v. 61, n. 11, p. 933-37, 2007. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2465602/pdf/933.pdf>. Acesso em: 7 nov. 2019.

STERN, B. D.; HEGEDUS, E. J.; LAI, Y.-C. Injury prediction as a non-linear system. *Physical Therapy in Sports*, v. 41, p. 43-48, 2020. Disponível em: http://chaos1.la.asu.edu/~yclai/papers/PTS_2020_SHL.pdf. Acesso em: 7 nov. 2019.

VENKATASUBRAMANIAM, A. *et al.* Decision Trees in Epidemiological Research. *Emerging Themes in Epidemiology*, [S. l.], v. 14, n. 11, p. 1-13, 2017. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5607590/pdf/12982_2017_Article_64.pdf. Acesso em: 12 nov. 2019.

Entropia e criação em dança: probabilidades em movimento

Ângelo Frederico Souza de Oliveira e Torres
Cecília Bastos da Costa Accioly
José Garcia Vivas Miranda

O que saberei responder no final deste capítulo:

- O que é entropia?
- Como posso percebê-la em meu cotidiano?
- Qual a relação entre dança e entropia?



Fonte: PEAKPX ([20--]).

Introdução

A segunda lei da termodinâmica é um dos mais robustos princípios da física. Ela estabelece que a energia térmica jamais flui de um corpo frio para um corpo quente. Em outras palavras, ao colocar cubos de gelo num copo de refrigerante, o observador jamais irá perceber, a qualquer tempo, gelo mais gelado e líquido mais quente. (HEWITT, 2015) Uma das consequências mais interessantes e mais gerais da segunda lei é a entropia. A entropia é uma medida que depende exclusivamente do estado em que o sistema se encontra e pode ser interpretada de várias formas a depender do sistema que se está observando. (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2011) É importante frisar que há uma imensidão de sistemas que podem ser analisados através dessa medida, dado seu

grau de generalidade, tornando muito difícil uma definição fechada do que seja entropia. Este texto não tem por objetivo explicar seja as origens ou todas as aplicações da segunda lei da termodinâmica, mas propor um olhar sobre os aspectos da improvisação em dança, à luz dessa ferramenta. Mais especificamente, este artigo procura introduzir a entropia como forma de compreender o movimento humano dentro de uma perspectiva de complexidade, especialmente voltada para percepções da dança sobre o movimento e suas potencialidades como criação artística-movimento-poiésis.

Sobre entropia

Como já foi dito, não é uma tarefa trivial definir entropia para todo e qualquer sistema. Costumeiramente, quando se usa a segunda lei da termodinâmica, ou a entropia como medida para estudar sistemas, o resultado depende das variáveis observadas e entropia pode ser usada para medir a diversidade de um bioma (SHIPLEY; VILE; GARNIER, 2006) ou a fragmentação de uma paisagem (JOSHI; LELE; AGARWAL, 2006).

De todo modo, entropia sempre é uma medida relacionada com as probabilidades de um sistema (NUSSENSZWEIG, 1999), mais especificamente, quanto maior é a entropia de um determinado estado desse sistema, maior é a chance daquele sistema se encontrar naquele estado.

Por essa definição, é preciso dar um passo atrás e compreender um pouco mais o que é sistema e estado e, também, como se dão as probabilidades de cada estado. O sistema é normalmente delineado no momento em que a pesquisa é idealizada, então ele pode ser o conjunto de escolas de um estado ou país, um grupo de dança de uma determinada academia, o conjunto de músculos, tendões e ossos que compõem um membro do corpo como uma perna ou um conjunto de dados. Definir o sistema determina, portanto, as variáveis associadas a ele, ou seja, determina o que se vai observar, medir e/ou avaliar.

Já os estados, representam um observável efetivo daquilo que se tem como objetivo da investigação. Ele pode ser a média das notas de todas as escolas, o grau de satisfação estética com um espetáculo de dança, a velocidade com que a bola viaja – ou se aquele chute resultou num gol – ou o resultado final de uma parada de um conjunto de

dados, somadas as faces viradas para cima. Seja o que for, o estado é um parâmetro observável da investigação e representa um resultado compreensível do que se quer obter, é, em última análise, um efeito ou consequência da articulação das variáveis do sistema.

Entretanto, os estados por si só, ou a sua análise, não envolvem entropia, para isso, temos que definir um novo parâmetro que chamaremos de “microestado”. Ele será como uma fotografia de um evento específico que resulta um determinado estado. Uma média escolar de oito (numa escala de zero a dez), pode ser resultado de diversos arranjos; 5000 notas 8; 2500 notas 10 e 2500 notas 6; mil notas 6, mil notas 7, mil notas 8, mil notas 9 e mil notas 10; e muitos outros.

A satisfação com um espetáculo pode ser avaliado pelas opiniões dos presentes que devem ter opiniões diferentes sobre ele a depender da posição que ocupam na audiência, então cada mapa de ocupação do teatro seria um microestado pareado com as observações dos espectadores, que poderiam ser agrupados gerando um índice de satisfação geral, o estado.

No caso da atleta, a posição relativa das articulações, o nível de fadiga e o volume muscular poderiam ser comparados aos eventos de gol (ou determinadas faixas de velocidade), assim as tríades de dados que resultam em gols seriam, portanto, os microestado do sistema gol, e os outros, os microestados do sistema não gol.

Finalmente, um conjunto de dados arremessados pode ter paradas diferentes (microestados) que resultam num mesmo somatório (estado). Por exemplo, para obter a soma total de cinco (estado), lançando dois dados de seis faces, haveria quatro resultados (microestados) possíveis (1 e 4; 2 e 3; 3 e 2; 4 e 1). O microestado é, portanto, um evento (potencialmente entre muitos) mensurável do sistema que resulta em um estado observável. Portanto, quanto mais numerosos forem os microestados associados a um determinado estado, maiores serão as chances do sistema repousar naquele estado.

A entropia, por fim, está relacionada com a quantidade relativa de microestados do sistema, que resultam num determinado estado. Quanto maior o número de microestados relacionados a um determinado estado, maior a probabilidade dele acontecer. Isso significa que estados de maior entropia são estados mais prováveis. Esse entendimento de

entropia é apenas uma forma didática de introduzir essa medida tão complicada. Existem outras formas mais práticas (e diversas) que serão descritas a seguir.

Silva, Matsushita e Silveira (2013) mostrou com ajuda da entropia um número que representava a competitividade de alguns campeonatos europeus de futebol. Ele determinou que seu microestado seria o número de triunfos dos clubes e seu estado a distribuição relativa desses triunfos entre as posições finais dos clubes na tabela de classificação, observando o quão desigual eram as competições a partir da medida de entropia.

A entropia, nesse caso, é uma adaptação da entropia de Shannon (1948), e estaria relacionada com a incerteza, que, neste caso, seria a incerteza de alguém específico sagrar-se campeão. Portanto, se observarmos uma lei de potência, raros times com muitos triunfos e muitos com poucos, esse campeonato seria pouco competitivo, no sentido de que a incerteza sobre quem seria o campeão é pequena, menor competitividade. Se, por outro lado, se observar pouca disparidade entre os triunfos dos times, poder-se-ia afirmar que esse campeonato fora muito disputado, com muitos clubes mantendo vivo o sonho do título, já que a incerteza seria grande.

Nesse exemplo, entropia mede, pela incerteza, o nível de competitividade do campeonato, que está relacionado com a distribuição de triunfos pelos clubes. Nesse caso, quanto maior a competitividade, maior a entropia, portanto mais difícil prever quem sairá vencedor num dado campeonato. Por outro lado, se a entropia for pequena, há uma grande chance de se saber o campeão antes do campeonato começar, ou que os campeões usuais pertençam a um subgrupo reduzido, contendo dois ou três pretendentes. Isso acontece com alguns campeonatos europeus de futebol, em que há hegemonia de um ou dois clubes. Campeonatos sul-americanos apresentam grande rotatividade entre seus campeões, se comparados aos europeus, sinalizando uma entropia relativamente alta.

Nos casos acima, vimos que, para campeonatos de menor entropia, há maior previsibilidade. Isso revela uma desigualdade, a priori, dos sistemas que tem um a quatro equipes com poder econômico significativamente superior aos demais, enquanto campeonatos com mais igualdade, a priori, seriam mais competitivos, menos previsíveis.

A dança e a (r)evolução estética

A dança é parte fundamental da cultura humana. Sendo reconhecida como área de conhecimento, a partir de estudos de complexidade e cognição, assume um papel importante na forma como nós, humanos, conhecemos o mundo/ambiente, os outros e nós mesmos.

A dança enquanto arte foi hegemonzada no ocidente pelo balé clássico e seus parâmetros colonialistas de corpo. Quando falamos em dança cênica, muito frequentemente há uma memória coletiva de pessoas longilíneas, brancas, reproduzindo determinados movimentos em sincronia, criando formas geométricas num palco, a partir de determinadas músicas, com determinados figurinos, músicas e cenário.

Essa perspectiva reducionista não dá conta de toda a poíesis do corpo, da poética da obra, das possibilidades de criação em dança, de todas as configurações artísticas que se colocam em cena – isso fazendo o recorte bastante específico da dança cênica – quando os sujeitos da dança criam seus discursos em movimento.

Quando falamos aqui de poética, ressaltamos um todo da obra de arte, como enfatiza Louppe (2012, p. 27),

A poética procura circunscrever o que, numa obra de arte, nos pode tocar, estimular a nossa sensibilidade e ressoar no imaginário, ou seja, o conjunto das condutas criadoras que dão vida e sentido à obra. O seu objecto não é somente a observação do campo onde o sentir domina o conjunto das experiências, mas as próprias transformações desse campo. O seu objecto, como o da própria arte, engloba simultaneamente o saber, o afectivo e a acção. Contudo a poética tem uma missão ainda mais singular: ela não diz somente o que a obra de arte nos faz, ela ensina-nos como o faz.

Atualmente, após as diversas revoluções na compreensão do que é/pode ser dança e o que é/pode ser cena – movimentos de danças modernas e pós-modernas no Ocidente, atrelados também aos estudos pós/des/de-colonialistas, da performance, etnocenológicos, *queer*, de gênero, de deficiência... – a perspectiva do se pôr em cena para dançar permite uma gama enorme de possibilidades de configurações estéticas, que não nos permite mais sermos reducionistas e nos possibilita um olhar mais ampliado para o que é/pode ser dança.

Essa abertura de compreensão da arte não ocorreu isoladamente, ela fez parte de movimentos sociais, econômicos, políticos, de transformações de nossas compreensões de mundo. Como sujeitos de arte, reinventamos o mundo e a nós mesmos em cena. Há uma elaboração do mundo para espelhamento e compreensão de si como agente de criação deste mesmo mundo – e isso demanda essa multiplicidade de danças (e das demais artes), de acordo com a nossa própria multiplicidade.

Com as revoluções das décadas de 1960 e 1970 no Ocidente, houve um movimento que ganhou força nos Estados Unidos e foi amplamente difundido por sua vinculação com os conhecimentos emergentes nas áreas das neurociências e da física, bem como por possibilitar a quebra das hierarquias na criação artística, da hegemonia dos espaços de apresentação cênica e da relação com o público.

O movimento de improvisação em dança que emergiu do encontro de diversos artistas na *Judson Church* em Nova York trouxe a máxima ampliação do conceito de probabilidade na dança: todos podem dançar, tudo pode ser dança, qualquer local pode ser o espaço da cena, todas as músicas, sons, e o silêncio podem ser dançados. Todos podemos ser coreógrafos e dançarinos ao mesmo tempo – posições que se fundem, num amálgama criativo que possibilita a cena num aqui-agora de emergências criativas. Não precisa mais haver uma narrativa, um sentimento, um sentido e um movimento pré-estabelecido. Há possibilidades, vontades, desejos, estudos, curiosidades, materiais, movimentos próprios, desafios, criação. A significação e a narrativa passaram a ser fluidas, compreendidas por estudos de semiótica, não mais atreladas à dramaturgia aristotélica, a plateia agora também passa a ser implicada na criação, criando suas próprias significações, narrativas e confrontando a cena com suas próprias referências, desejos, curiosidades... Numa busca por revolucionar a dança e reduzi-la a seus elementos essenciais, como invoca a artista *Yvonne Rainer*¹ em seu manifesto de 1965, acaba-se por se possibilitar a diversidade. A dança ganha contornos completamente

1 “Não ao espetáculo, não ao virtuosismo, não às transformações e à magia e ao uso de truques, não ao ‘glamour’ e à transcendência da imagem da star, não ao heroísmo, não ao anti-heroísmo, não às imaginárias de pechisbeque, não ao comprometimento do bailarino ou do espectador, não ao estilo, não às maneiras afetadas, não à sedução do espectador graças aos estratégias do bailarino, não à excentricidade, não ao fato de alguém se mover ou se fazer mover”. (GIL, 2001, p. 188)

borrados, extravasa-se para outras áreas, arranca as certezas, explode as determinações.

Improvisação e entropia

A construção historiográfica e não linear deste processo de concepção da improvisação na dança pode ser vista como uma sucessão de quebras de estruturas, permitindo maior criatividade e convidando o espectador a participar enquanto elemento significante.

De certa forma, só o fato de as concepções de dança cênica terem sido exponencialmente ampliadas a partir dos diversos movimentos dos séculos XX e XXI, já se pode interpretar esta historiografia como um processo evolutivo, não linear, complexo e rizomático, em que, com o passar do tempo se percebe um acréscimo de entropia dado o aumento de possibilidades acessíveis ao sistema.

Entretanto, não é só a pluralidade enquanto universo de possibilidades de danças que nos permite advogar pelo acréscimo de entropia no sistema dança como arte, mas as concepções propostas incluem dentro de si essa mesma multiplicidade de possibilidades. A quebra do sincronismo promove o olhar focado não no coletivo, mas nos indivíduos. A escolha de olhar do sujeito espectador vai compor sua percepção estética do processo.

Portanto, em uma improvisação em dança, além de um espetáculo para cada dançarino, há um espetáculo para cada sujeito espectador, que compõe sua experiência a partir de recortes feitos por sucessivas escolhas de para onde/o que voltar a sua atenção. Isso potencializa ainda mais a compreensão da coreografia como um sistema complexo, como afirma Ivar Hagendoorn (2002, p. 2)

Ficará evidente que uma coreografia emergente [...] pode ser considerada um sistema complexo no sentido de que consiste em vários componentes interagindo (dançarinos), cujas propriedades não são totalmente descritas pelos componentes individuais (dançarinos). Analisar os movimentos isolados de um dançarino individual não nos levará mais perto de uma compreensão da coreografia.²

2 It will be clear that an emergent choreography [...] can be regarded as a complex system in the sense that it consists of multiple interacting components (dancers), the properties of which are not fully described by those of the individual components (dancers). Analyzing

Isso redundava num sistema efetivamente maior, que inclui o espectador ou a plateia como elementos causadores da obra. Num paradigma clássico, haveria pouca diversidade de opiniões sobre os movimentos, o tema ou a história retratada em um dado espetáculo – ou mesmo sobre o que viria a ser dança –, mas, em uma produção dentro do paradigma pós-moderno da improvisação, quanto mais espectadores, mais diversas serão as interpretações, a priori.

Outra forma de ver é que, se um grupo de pessoas aprendesse de modo aleatório todos os movimentos do balé de repertório “O Lago dos Cisnes” apresentado pela primeira vez em 1877, por exemplo, e fosse colocado para apresentar a obra utilizando os movimentos distribuídos ao acaso, qual a probabilidade de que essa apresentação remeta, em qualquer grau, ao espetáculo original? Mesmo que eles repetissem o experimento tantas vezes quanto necessárias, sem coordenação e direcionamento, esse grupo jamais apresentaria o espetáculo como o original. O que mostra que olhar para a dança enquanto construção coletiva, espectador-diretor-dançarino, permite compor uma abundância de espetáculos no que antes era apenas um, expandindo um sistema para um de maior entropia, de maiores possibilidades. Como afirma Louppe (2012, p. 361), na perspectiva da dança contemporânea,

O ‘espetáculo’: momento em que o ‘trabalho da dança’ acede a uma dimensão pública, em que uma ‘obra’ ou, pelo menos, uma proposta artística encontra não somente o olhar do outro (o que pode ocorrer em outros momentos), mas o momento em que o bailarino estabelece, de forma singular e concertada as condições desse encontro.

A criação em dança dentro de aspectos coreográficos em técnicas que se utilizam de uma determinada cartela de movimentos pré-estabelecidos permite uma emergência limitada dos padrões de movimento em rearranjos possibilitados pelas configurações de espaço e tempo de execução. Os limites de probabilidade de arranjos criativos de movimentos na improvisação em dança, entretanto, são tantos quantas as possibilidades de construção do movimento humano – cada corpo, cada história, cada fator de movimento, tempo, espaço, fluência, peso –, considerando inclusive as probabilidades de interação com os corpos

the isolated movements of an individual dancer will not bring us closer to an understanding of the choreography.

não humanos atrelados à criação pela relação direta da dança com a iluminação, os materiais concretos, a robótica, o cinema e o audiovisual, a telemática e demais tecnologias digitais.

Na análise da entropia num processo de improvisação em dança, pode-se perceber os padrões emergentes nas variáveis implicadas na proposta: no movimento de cada sujeito, na sua interação com o espaço, com o outro, com objetos, com os sons, música e silêncio, a criação de imagens, narrativas e significados para cada espectador. Sendo, então, um processo constante de acréscimo de possibilidades, redundando em sistemas progressivamente mais entrópicos.

Referências

- FEYNMAN, R.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *The Feynman Lectures on Physics*. New York: Basic Books, 2011. v. 1
- GIL, J. *Movimento total: o corpo e a dança*. Tradução de Miguel Serras Pereira. Lisboa: Relógio D'Água Editores, 2001.
- HAGENDOORN, I. G. Emergent patterns in dance improvisation and choreography. In: BAR-YAM, Y. (ed.). *Unifying Themes in Complex Systems*. [S. l.]: CRC Press, 2002. v. 1, p. 183-195.
- HEWITT, P. G. *Física conceitual*. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- JOSHI, P. K.; LELE, N.; AGARWAL, S. P. Entropy as an Indicator of Fragmented Landscape. *Current Science*, [S. l.], v. 91, n. 3, p. 276–278, 2006. Disponível em: <http://www.iisc.ernet.in/~currsci/aug102006/276.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- LABAN, R. *O domínio do movimento*. Tradução de Anna Maria Barros De Vecchi e Maria Sílvia Mourão Netto, São Paulo: Summus, 1978.
- LOUPPE, L. *Poética da dança contemporânea*. Tradução de Rute Costa. Lisboa: Orfeu Negro, 2012.
- NUSENZWEIG, H. M. *Curso de física básica*. São Paulo: Blucher, 1999. v. 2.
- PEAKPX. Water Drip Dance Drop Of Water. [20--]. Disponível em: <https://pixabay.com/photos/water-drip-dance-drop-of-water-1757781/>. Acesso em: 10 out. 2020.

SHANNON, C. E, A Mathematical Theory of Communication. *The Bell System Technical Journal*, New York, v. 27, p. 379-423, 623–656, July/Oct. 1948. Disponível em: <http://people.math.harvard.edu/~ctm/home/text/others/shannon/entropy/entropy.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2019.

SHIPLEY, B.; VILE, D.; GARNIER, E. From Plant Traits to Plant Communities: A Statistical Mechanistic Approach to Biodiversity. *Science*, [S. l.], v. 314, n. 5800, p. 812-814, 2006

SILVA, H. L. da. *Poética da oportunidade: tomada de decisão em estruturas coreográficas abertas à improvisação*. 2008. Dissertação (Mestrado em Dança) – Escola de Dança, Universidade Federal da Bahia, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/8236/1/dissertacao%2520seg.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2019.

SILVA, S. da; MATSUSHITA, R.; SILVEIRA, E. Hidden power law patterns in the top European football leagues. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, [S. l.], v. 392, n. 21, p. 5376–5386, 2013.

SUQUET, A. O corpo dançante: um laboratório da percepção. In: CORBIN, A.; COURTINE, J.-J.; VIGARELLO, G. (org.). *História do corpo*. Petrópolis: Vozes, 2008. v. 3, p. 509-540.

Análise biomecânica de movimentos complexos: aplicação do *Movement Elements Decomposition* (MED)

Marina de Carvalho de Souza
José Garcia Vivas Miranda
Vitor Sotero dos Santos

O que saberei responder no final deste capítulo:

- Quais são os princípios do planejamento do movimento?
- Qual é a influência de sistemas complexos na análise do movimento?
- Como segmentar movimentos complexos e analisá-los?



Fonte: Mondragon (2016).

Modelos biomecânicos anteriores

Imagine que alguém está sentado em uma mesa, prestes a fazer uma avaliação muito importante. Segundo as instruções, deve-se escrever o próprio nome no papel duas vezes: uma vez no cabeçalho (em escala menor) e outra vez na última folha em branco, usando todo o espaço disponível (em escala maior).

Figura 1 - Caligrafia



Fonte: (HYLAND, [20--]).

O rodapé da folha de instruções sugere escrever com muito cuidado porque a caligrafia será avaliada também. Como já aprendemos a escrever e exercitamos essa prática ao longo dos anos, a tarefa acima pode parecer simples, mas imagine se tivéssemos de pensar nas incontáveis possibilidades de desenvolver essa tarefa. Existe diferença, no que se refere ao planejamento motor, em escrever o mesmo nome em duas escalas diferentes? Quais fatores devem ser levados em consideração e podem ser manipulados para que executemos ela da melhor forma possível?

Segundo o princípio da isocronia (VIVIANI; FLASH, 1995), o sistema motor tende a escrever o mesmo nome (tarefa) em um mesmo intervalo de duração. Logo, o intervalo de tempo para escrever o nome no cabeçalho teria a mesma duração de quando escrevemos usando todo espaço da última folha. Se assim fosse, tenderíamos a escrever o nome na folha em branco rápido demais, sem o cuidado necessário para manter uma boa grafia ou então escreveríamos o nome no cabeçalho muito

devagar para que houvesse tempo suficiente para manter a qualidade da caligrafia ao escrever em maior escala.

Como consequência, de acordo com o princípio da isocronia, a velocidade escalar instantânea deveria aumentar linearmente com a extensão linear do movimento. Se assim fosse, ao escrever o nome em uma parede, a pessoa alcançaria altas velocidades, o que não acontece na prática.

Sabemos que tempo é um fator importante, visto que a prova deve ser feita em um intervalo limitado, mas não é suficiente para explicar o controle motor. Segundo o princípio da isogonia, ângulos iguais são descritos em intervalos de tempos iguais. (VIVIANI; MCCOLLUM, 1983) Assim, a intensidade da velocidade angular deve ser o mesmo para arcos de mesmo ângulo, independente do raio, de acordo com esse princípio. O exemplo a seguir deve ajudar a entender como o princípio da isogonia funciona em aspectos práticos.

Por exemplo, vamos supor que o nome possui a vogal “o”. Muitas pessoas escrevem essa letra usando uma curva que lembra uma circunferência. Lembrando que uma circunferência sempre tem 360° e, segundo o princípio da isogonia, independente do raio dessa circunferência, o módulo da velocidade angular é o mesmo. Logo, obedecendo o princípio da isogonia, o intervalo de tempo para escrever a letra “o” deve ser o mesmo, por mais que no cabeçalho escrevemos a letra “o” com um raio menor e na folha em branco com um raio maior. Mas, velocidade angular nem sempre é tão fácil de se perceber na vida prática, então vamos pensar em termos de velocidade linear (instantânea). Vamos supor que, no cabeçalho, o raio da circunferência para escrever a letra “o” seja de 0.125 cm (um oitavo). Já na folha em branco, vamos supor que a letra “o” seja descrita com um raio de 1 cm. Qual seria a intensidade da velocidade linear necessária para que essas circunferências fossem descritas com velocidade angular de mesma intensidade, obedecendo ao princípio da isogonia?

Para responder essa pergunta, consideramos que a letra “o” seja, em sua maior parte, um círculo. Assim, a intensidade da velocidade linear pode ser calculada pelo perímetro ($2\pi R$) dividido pelo tempo, que a título de simplificação vamos considerar um segundo. Neste caso, a intensidade da velocidade linear seria aproximadamente 0.008

m/s para a letra menor e 0.06 m/s para a letra maior, ou seja, 8x maior. Não parece muito, mas se fossemos escrever em uma parede a letra “o” com um raio de 1m, a intensidade da velocidade seria de 6,3 m/s (ou 22km/h)! O que está muito acima de uma velocidade razoável de conforto para escrita.

Para tentar resolver essa incongruência, Lacquaniti, Terzuolo e Viviani (1983) fizeram observações experimentais e propuseram uma equação em que a velocidade linear é proporcional ao raio da curvatura elevado a 1/3:

$$v(t) \cong k_v r(t)^{1/3} v(t) \cong k_v r(t)^{1/3} \quad (1)$$

em que $v(t)$ é a velocidade instantânea em função do tempo, k_v é uma constante que depende da característica do movimento – com tamanho, por exemplo – e $r(t)$ é a curvatura da trajetória em função do tempo. Essa lei é chamada de “lei de 1/3”.

Vamos, então, usar essa relação para comparar a velocidade instantânea no exemplo em questão. No caso do cabeçalho:

$$v_1(t) \cong k_v (1/8)^{1/3} v_1(t) \cong k_v (1/8)^{1/3} \quad (2)$$

$$v_1(t) \cong k_v^{1/2} v_1(t) \cong k_v^{1/2} \quad (3)$$

ao escrever na folha em branco, a velocidade instantânea para letra “a” será:

$$v_2(t) \cong k_v (1)^{1/3} v_2(t) \cong k_v (1)^{1/3} \quad (4)$$

$$v_2(t) \cong k_v v_2(t) \cong k_v \quad (5)$$

quando comparamos a velocidade instantânea nas duas situações, temos:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{k_v^{1/2} v_1}{k_v v_2} = \frac{k_v^{1/2}}{k_v} \quad (6)$$

considerando que a constante k_v é aproximadamente igual nas duas situações, temos:

$$v_1 = v_2^{1/2} v_1 = v_2^{1/2} \quad \text{ou} \quad v_2 = 2v_1 v_2 = 2v_1 \quad (7)$$

Desse modo, a velocidade linear para escrever a letra “o” no cabeçalho seria duas vezes menor que a velocidade para escrever na folha em branco. O que é muito mais razoável do que as 8x estimada pelo modelo da isogonia.

Contudo, o modelo de Lacquaniti, Terzuolo e Viviani (1983) não considerava variações individuais típicas do comportamento. De acordo com os dois princípios anteriores, essa tarefa deveria ser feita com a mesma velocidade para todos as pessoas em todas as situações. Alterações desses modelos eram apenas erros aleatórios e não frutos do planejamento motor. Além disso, a precisão necessária para realizar essas tarefas também não tinha sido considerada.

Esses princípios têm como base apenas critérios geométricos, não incluindo informações explícitas sobre fatores de escolha físicos e humanos. O princípio do mínimo arranque, proposto por Flash e Hogan (1985), tenta incluir fatores gerais que possam estar relacionados com a cognição. O princípio leva em consideração o “custo” da suavidade do movimento. A proposta consiste em que o movimento humano tende a ser o mais suave possível e qualquer movimento que não seja suave implica em um custo humano. Suavidade pode ser expressa como a taxa de variação da aceleração – em outras palavras, a derivada em relação ao tempo. Isso significa que, no movimento ideal, a aceleração deveria variar o mínimo possível com o tempo.

Voltando ao nosso exemplo, imagine que, ao saber que o tempo de duração da escrita deve ser o mesmo, no meio da escrita, a pessoa percebe que já passou tempo demais e acelera muito para completar a tarefa no tempo requerido. Nesse caso, houve uma variação da aceleração e certamente a caligrafia deve ter sido prejudicada.

A importância de Hoff na análise do movimento

Assim, podemos perceber que os princípios anteriores não são suficientes para explicar o planejamento motor. Então, como escolhemos uma determinada forma para realizar o movimento? Apenas a duração do movimento importa? Ou o conforto para realizar a tarefa seria mais importante?

Se apenas a duração do movimento importasse, realizaríamos qualquer movimento como se estivéssemos em uma disputa clássica do gatilho mais rápido num filme do Velho Oeste (Figura 3). Neste tipo de situação, se a duração não for a prioridade, podemos ser gravemente prejudicados. Mas, para as atividades do dia a dia, não utilizamos essa estratégia de movimento.

Figura 2 - Disputa clássica do gatilho mais rápido do Oeste



Fonte: Public Domain Vectors (2015).

Por outro lado, se nos movêssemos visando o máximo conforto possível, gastaríamos muito tempo e energia para uma simples atividade como, por exemplo, comer uma folha (Figura 4).

Figura 3 - Preguiça alimentando-se



Fonte: Mehlführer (2007).

O máximo conforto ou máxima rapidez também não explicam o planejamento motor dos movimentos que executamos. Voltando ao exemplo do início do capítulo, escrever é uma tarefa em que conforto e eficiência precisam ser devidamente balanceadas. Se escrevermos rápido demais, corre o risco da letra estar ilegível, mas, se consideramos apenas o conforto, podemos demorar tanto tempo para escrever que não haveria tempo suficiente para terminar a prova.

Propondo um modelo em que houvesse um equilíbrio entre a eficiência do movimento e o conforto para realizá-lo, Hoff (1994) incluiu uma função custo-tempo para a análise do movimento humano:

$$I = t_f + K \int_{t=t_0}^{t=t_f} (u_x^2 + u_y^2) dt = t_f + K \int_{t=t_0}^{t=t_f} (u_x^2 + u_y^2) dt \quad (8)$$

em que t_f é o tempo de duração do movimento, u_x e u_y são as componentes no eixo x e eixo y, respectivamente, do arranque (taxa de variação da aceleração em relação ao tempo), que representa o conforto, e K é uma constante. Perceba que, nesta função custo, o tempo de duração do movimento (t_f) é um valor de uma variável de entrada.

Este valor corresponde com a duração previamente observada do movimento em questão.

O interessante dessa função custo é que podemos obter informações sobre a trajetória e tempo, nos dando mais detalhes sobre o planejamento do movimento. Ao considerar as condições de contorno estáticas, após um manejo matemático, temos:

$$t_f = (60D)^{1/3} K^{1/6} t_f = (60D)^{1/3} K^{1/6} \quad (9)$$

em que D é o deslocamento. Logo, a duração do movimento é diretamente proporcional à raiz cúbica do deslocamento.

Hoff também mostrou que os movimentos unidimensionais, ponto a ponto, são marcados por um perfil de velocidade obedecendo a equação abaixo:

$$v(t) = D \left[\frac{30}{t_f^5} t^4 - \frac{60}{t_f^4} t^3 + \frac{30}{t_f^3} t^2 \right] v(t) = D \left[\frac{30}{t_f^5} t^4 - \frac{60}{t_f^4} t^3 + \frac{30}{t_f^3} t^2 \right] \quad (10)$$

O modelo foi testado para diferentes dados de movimentos, porém com um fator em comum: apenas movimentos de alcance (linear).

O que ninguém viu?

Miranda e demais autores (2018), 24 anos após a publicação de Hoff, observaram que as duas últimas equações estão relacionadas, e obtiveram uma equação relacionando velocidade média, \bar{v} , e deslocamento, D :

$$\bar{v} = \frac{D^{2/3}}{60^{1/3} K^{1/6}} \bar{v} = \frac{D^{2/3}}{60^{1/3} K^{1/6}} \quad (11)$$

Essa observação é muito importante, pois mostra que a relação entre a velocidade média e o deslocamento para a tarefa de alcance estão associadas por uma lei de potência. Que, de forma geral, podemos dizer que

$$\bar{v} \propto D^a \bar{v} \propto D^a \quad (11)$$

Onde $a=2/3$ para o modelo de Hoff e D representa a escala do movimento.

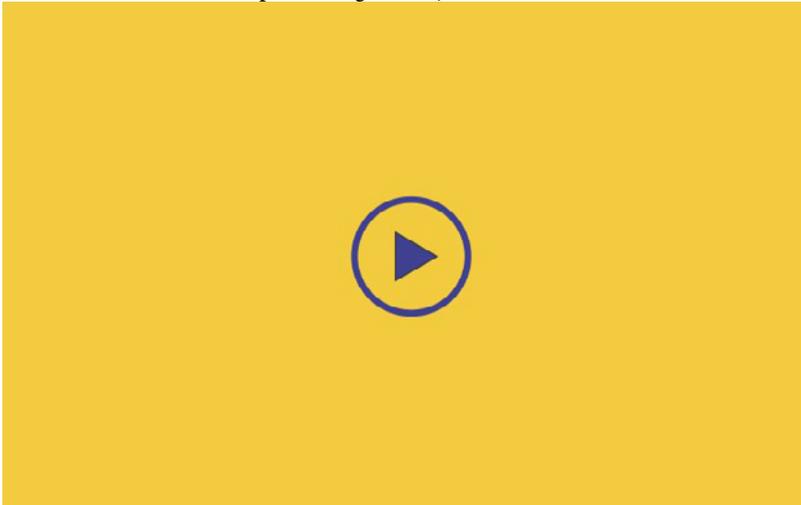
Voltando ao exemplo do começo, sabemos agora que a estratégia motora para escrever o nome no cabeçalho (menor escala) e na folha em branco (maior escala) é a mesma. Já que a relação entre velocidade média e deslocamento é invariante de escala.

Contudo, o modelo da equação (11) seria aplicado apenas ao movimento de alcance. Miranda e demais autores (2018) perceberam que dificilmente o cérebro teria uma dinâmica de planejamento motor apenas para uma tarefa e que provavelmente a mesma estratégia de planejamento deveria ser utilizada para movimentos mais complicados. Será que poderíamos decompor movimentos complicados em pequenos movimentos de alcance?

Utilizando como base o modelo de Hoff, Miranda e demais autores (2018) desenvolveram um novo modelo, o Movement Element Decomposition (MED). Este divide o movimento em elementos de movimento equivalentes ao movimento de alcance, para, posteriormente, analisá-lo. Um elemento de movimento é contabilizado cada vez que a velocidade sai de zero e retorna a zero, para cada eixo do movimento separadamente (x, y e z).

O Vídeo 1 demonstra um exemplo de análise de movimento, separando os elementos de movimento em cada eixo. Neste exemplo, um círculo é desenhado à mão. Vamos observar primeiramente o eixo x (horizontal, neste caso): o movimento inicia-se à esquerda e segue em direção à direita, para depois retornar ao ponto de partida. O indivíduo, então, utilizou um elemento de movimento (vermelho) para ir e outro para retornar (verde). Já no eixo y (vertical), primeiramente o movimento “sobe” (azul escuro), seguido de uma descida (azul claro), e finalizando em mais uma subida (lilás).

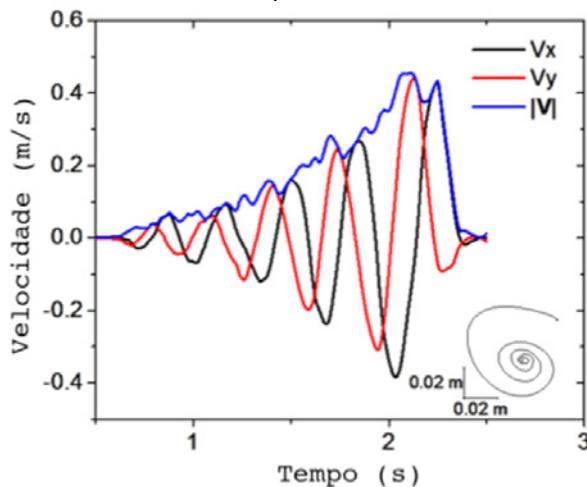
Vídeo 1 - Exemplo de segmentação ao desenhar um círculo



Fonte: elaborada pelos autores.

Esta abordagem difere de modelos anteriores que utilizavam a velocidade resultante para considerar um elemento de movimento, e não a velocidade de cada eixo. Na Figura 4 podemos observar a diferença entre separar os elementos de movimento de um indivíduo ao desenhar uma espiral utilizando a velocidade resultante e as velocidades no plano cartesiano (x , y e z).

Figura 4 - Velocidade resultante (azul) *versus* velocidade nos eixos em vermelho e preto.



Fonte: adaptado pelos autores com base em Miranda e demais autores (2018).

Para entender melhor a divisão de elementos de movimento, faça a seguinte experiência:

1. Coloque sua mão apoiada em uma superfície;
2. Toque em linha reta, com a mão, um ponto mais alto (pode ser a câmera do notebook, se for o caso);
3. Retorne a mão para a posição inicial.
4. Quantos elementos de movimento você utilizou neste experimento?

Obs: tente, ao máximo, parar a mão apenas no ponto mais alto e na superfície ao retornar. Considere este movimento apenas em duas dimensões (2D). Continue a leitura apenas após a finalização do experimento!

Se o experimento ficou parecido com a Figura 5, então você deve ter utilizado dois elementos de movimento em cada eixo, totalizando quatro elementos de movimento.

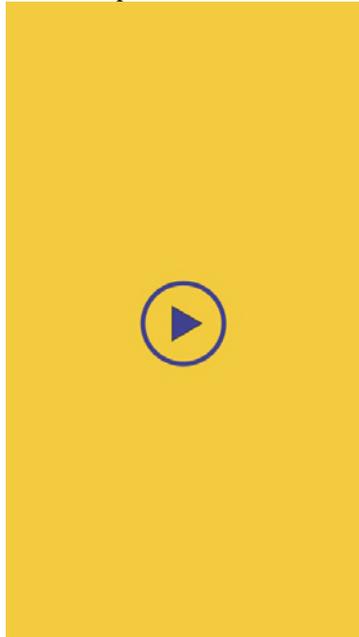
Figura 5 - Experimento de alcance em duas dimensões (2D)



Fonte: adaptado pelos autores com base em Peakpx (2017).

Agora imagine uma pessoa caminhando. Pense que você está olhando para o maléolo lateral da mesma. Quantos elementos de movimento um passo contém? Para facilitar, observe a Vídeo 2.

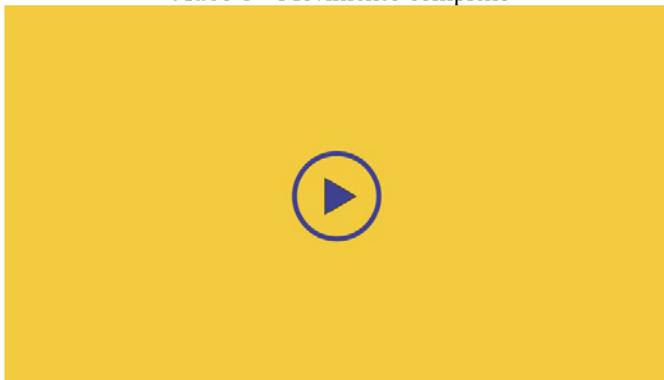
Vídeo 2 - Exemplo de indivíduo caminhando



Fonte: JJKUTCH (2013).

Se você respondeu dois elementos, talvez não tenha percebido que o pé, após subir, precisa parar o movimento para poder descer de novo. Então, a resposta correta seria: três elementos de movimento. Um para frente, um subindo e outro descendo. Por fim, tente responder quantos elementos de movimento o atleta utiliza ao realizar o movimento da Vídeo 3.

Vídeo 3 - Movimento complexo



Fonte: Guthrie (2017).

Obviamente, este último teste foi uma brincadeira. Para movimentos mais complexos ou com mais componentes, fica difícil analisar sem ajuda de ferramentas. Para isto, podemos utilizar a gravação de vídeo para, posteriormente, analisar o movimento através do *software CvMob*, ferramenta gratuita para análise do movimento. (PEÑA et al., 2013) Para utilização do mesmo, apenas são necessários uma câmera (podendo utilizar câmeras de *smartphones* ou profissionais) e marcadores adesivos. Após a captura do vídeo, o usuário realiza a análise do movimento no CvMob e tem acesso a resultados como: velocidade, deslocamento, aceleração, ângulo e espaço de fase.

MED na prática

Fonseca e demais autores (2020) utilizaram o MED para analisar a aquisição de novas habilidades motoras na seguinte tarefa: o indivíduo controlava, através do movimento em cima de uma plataforma WiiBoard, um alvo responsável por capturar as flechas (Figura 6).

Figura 6 - Representação de um indivíduo jogando na plataforma WiiBoard

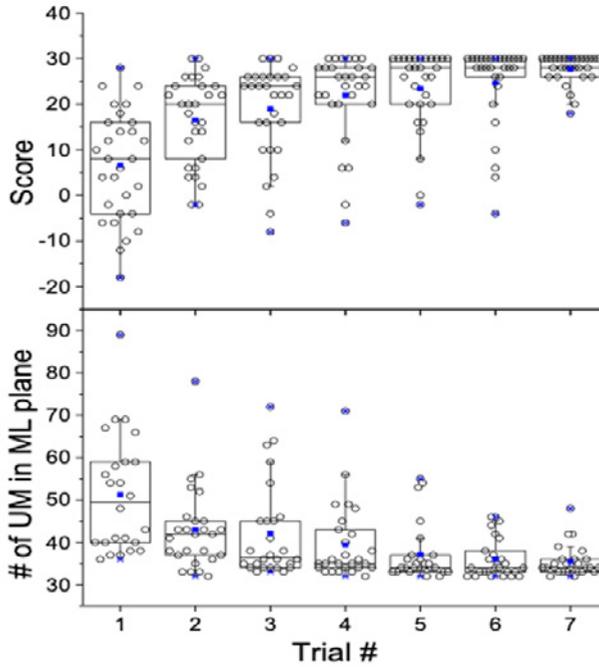


Fonte: Fonseca e demais autores (2020)

No total, foram sete blocos de 30 flechas cada. A pontuação máxima de cada bloco era de 30 pontos, e a mínima -30, já que cada vez que o indivíduo errava a flecha, perdia um ponto. A Figura 7 demonstra que, à medida que os indivíduos aprendiam, a pontuação aumentava e o número de unidades de movimento diminuía. Ou seja, para uma

mesma tarefa, os participantes passaram a utilizar uma estratégia motora mais eficaz.

Figura 7 - Relação entre a pontuação (acima) e número de elementos de movimento (abaixo) nos sete blocos



Fonte: Fonseca e demais colaboradores (2020).

Outras aplicações do MED

Além da análise biomecânica do movimento, o MED pode ser utilizado nas seguintes áreas:

- Robótica: para implementação de movimentos mais realistas em robôs humanoides;
- Animação: a capacidade de reprodução do movimento traz a possibilidade de deixar as animações mais realistas;
- Esporte: o MED pode ser uma ferramenta diferencial na avaliação do desempenho de atletas;

- Segurança: através do MED, há a possibilidade de verificação do movimento do indivíduo, como uma espécie de “assinatura biomecânica”.

Considerações finais

Nesse capítulo tivemos a oportunidade de ver que análises precisas do movimento humano podem ser facilmente realizadas utilizando ferramentas matemáticas e computacionais de livre acesso e fácil utilização.

O método MED viabiliza uma compreensão geral das estratégias de planejamento motor, assim como uma abordagem do movimento enquadrada no marco da teoria dos sistemas complexos. E você, como usaria o MED para estudar o movimento? Ainda há muito para ser explorado!

Referências

FLASH, T., & HOGAN, N. (1985). The coordination of arm movements: An experimentally confirmed mathematical model. *Journal of Neuroscience*, v.5, p.1688-1703.

FONSECA, M. de L. *et al.* Motor Skill Acquisition during a Balance Task as a Process of Optimization of Motor Primitives. *The European Journal of Neuroscience*, Oxford, v. 51, p. 2082-2094, 2020. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/ejn.14649?casa_token=iPURdURtee0AAAAA:zUb_FWT44tEH36FNjpH99vHa-3rINnohWKivNBwO5rLpALtAs7WgOfYAW7ITtd-OCmrZifqfXOk98dhkg. Acesso em: 28 set 2020.

GUTHRIE, M. *Tricking Combo*. *Wikimedia Commons*. 2017. [https://en.wikipedia.org/wiki/Tricking_\(martial_arts\)#/media/File:MichaelGuthrie.gif](https://en.wikipedia.org/wiki/Tricking_(martial_arts)#/media/File:MichaelGuthrie.gif). Acesso em: 10 out. 2020.

HOFF, B. A model of duration in normal and perturbed reaching movement. *Biological Cybernetics*, New York, v. 71, p. 481-488, 1994. Disponível em: <http://e.guigon.free.fr/rsc/article/Hoff94.pdf>. Acesso em: 28 set 2020.

HYLAND, M.; SY, A. *Hand Lettering A to Z*. [S. l., 20--]. Disponível em: <https://meaganhyland.com/hand-lettering-a-to-z>. Acesso em: 28 set 2020.

- JJKUTCH. Animated sequence of a human male walking. *Wikimedia Commons*. 2013. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Muybridge_human_male_walking_animated.gif. Acesso em: 10 out. 2020.
- LACQUANITI, F.; TERZUOLO, C.; VIVIANI, P. The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, Amsterdam, v. 54, n. 1-3, p. 115-488, out. 1983.
- MEHLFÜHRER, C. Three-toed-sloth. *Wikimedia Commons*. 2007. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MC_Drei-Finger-Faultier.jpg. Acesso em: 10 out. 2020.
- MIRANDA, J. G. V. *et al.* Complex Upper-Limb Movements Are Generated by Combining Motor Primitives that Scale with the Movement Size. *Scientific Reports*, [S. l.], v. 8, Aug. 2018. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-018-29470-y>. Acesso em: 28 set. 2020
- PEAKPX. No Title. 2017. Disponível em: <https://www.peakpx.com/402082/man-working-on-computer-with-mobile-phone-and-sunglasses-on-table>. Acesso em: 1 out. 2020.
- PEÑA, N. *et al.* Instrumento livre para medidas de movimento. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 3, 3505-1-3505-5. 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbef/v35n3/a24v35n3.pdf>. Acesso em: 1 out 2020.
- PUBLIC DOMAIN VECTORS. High noon western showdown vector graphics. 2015.
<https://publicdomainvectors.org/en/free-clipart/High-noon-western-showdown-vector-graphics/24922.html>. Acesso em: 10 out. 2020.
- TODOROV, E. Optimality principles in sensorimotor control. *Nature Neuroscience*, New York, v. 7, n. 9, p. 907-915, Sept. 2004. Disponível em: <http://www.linguistics.berkeley.edu/~kjohnson/ling290e/ETodorov04a.pdf>. Acesso em: 1 out 2020.
- VIVIANI, P.; FLASH, T. Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, Arlington, v. 21, n. 1, p. 32-53, 1995.
- VIVIANI, P.; MCCOLLUM, G. The relation between linear extent and velocity in drawing movements. *Neuroscience*, Oxford, v. 10, n. 1, p. 211-218, Sept. 1983.

Métodos Fractais: aplicação na análise de movimento

Ana Paula Quixadá
Denise Gomes de Castro
José Garcia Vivas Miranda

A obra do pintor japonês Kanagawa Hokusai, mostra que a crista das ondas é feita por pequenas ondas, revelando um padrão de autosimilaridade nas diferentes escalas.

O que saberei responder no final deste capítulo:

- O que são os fractais?
- O tempo da passada da marcha humana é aleatório?
- O padrão fractal da marcha muda em diferentes populações?

Figura 1 - A grande onda



Fonte: Hokusai (1830).

Conceitos básicos

Quando falamos em formas geométricas, pensamos em quadrados, retângulos, triângulos, losangos... Então, qual forma geométrica você escolheria para desenhar uma nuvem? Foi entre os séculos XIX e XX que matemáticos como Peano, Von Koch, Sierpinski e Cantor começaram a ver a natureza de uma ótica geométrica diferente: formas extremamente complexas, irregulares e ásperas (FUZZO; SANTOS; FERREIRA, 2011; NASCIMENTO; SILVA; MACIEL, 2012; VALIM; COLUCCI, 2008), que os fizeram criar figuras geométricas com características diferentes daquelas conhecidas nos últimos milênios. (CORTÊS, 2014; VALIM; COLUCCI, 2008) Afinal, “nuvens não são esferas [...]”. (MANDELBROT, 1983)

Essa nova visão trouxe avanços em diversas áreas e criação de diversas teorias como a Teoria da Relatividade de Einstein. Porém, a classificação dessa nova geometria só foi alcunhada em 1983 pelo matemático Benoit Mandelbrot com a palavra “fractal” de origem etimológica advinda do latim *fractus*, que significa “roto”, “fraturado”. (CORRÊA, 2014; SOUZA, 2014; VARGAS et al., 2014) Como exemplo, podemos ver essa planta (Figura 2), note que a planta, o galho e a folha se parecem em forma, como se fosse um padrão. Como se, para “criar” essa planta fosse preciso apenas repetir esse padrão, apenas diminuindo seu tamanho.

Figura 2 - Planta com propriedades fractais



Fonte: produzida pelos autores.

Mas o que são fractais?

Como muitos matemáticos os estudaram, há muitas definições diferentes. (VARGAS et al., 2014) Dentre esses matemáticos, Sallum diz que um fractal “é uma figura que pode ser quebrada em pequenos pedaços, sendo cada um desses pedaços uma reprodução do todo”. (SALLUM, 2005 apud VARGAS et al., 2014, p. 767) Desse modo, podemos considerar um fractal como uma figura limite, uma forma geométrica composta de padrões de muitas repetições, podendo ser

de três, quatro, ou infinito (VARGAS et al., 2014) e que apresentam como características:

- Autossemelhança: os fractais apresentam cópias de si mesmos, cópias essas exatas ou aproximadas em diferentes escalas. Quando as mudanças de escalas são iguais em todas as direções, são chamados de autossimilares, e quando são diferentes, de autoafins;
- Dimensionalidade: o grau de detalhamento de um fractal não diminui se examinarmos porções pequenas do mesmo (NUNES, 2006; VALIM; COLUCCI, 2008);
- Complexidade infinita: quanto mais nos aproximamos dos detalhes de um fractal, mais detalhes sobre ele são evidenciados, e com isso descobriremos reentrâncias e saliências cada vez menores, não conseguindo nunca chegar a conhecer o primeiro termo ou escala característica do fractal. (CORTÊS, 2014) Por esse motivo, é dito que os fractais são objetos livres de escala.

Outro exemplo que podemos apresentar é o chamado triângulo de Sierpinski (Figura 3a). Criado pelo matemático Waclaw Sierpinski em 1915, essa figura nos traz a ideia de que uma estrutura de tamanho limitado pode conter várias outras estruturas interconectadas de tamanhos cada vez menores. Isso lembra algo? Como o corpo humano e seu sistema de artérias, veias, arteríolas, vênulas... como um corpo de 1,60m pode ter quilômetros de artérias, veias, arteríolas? (LASNEAUX, 2007 apud ROCON; PAIVA, 2012)

Figura 3 - a) Triângulo de Sierpinski. b) Etapas para geração do triângulo de Sierpinski

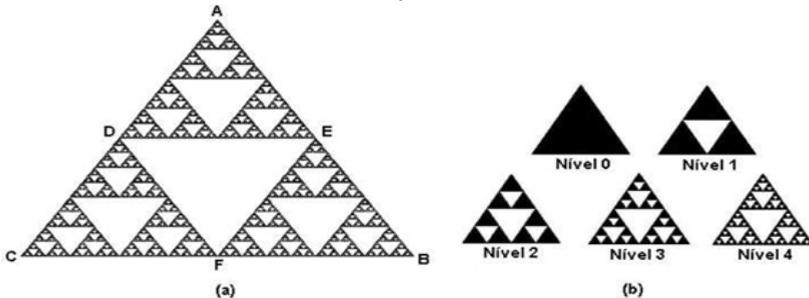


Figura 4 - (a) O triângulo ADE, com todo seu conteúdo, é uma redução exata do triângulo ABC. O mesmo se pode dizer com relação aos triângulos CDF e de BEF. (b) Os cinco primeiros níveis de construção do Triângulo de Sierpinski.

Fonte: Assis e demais autores (2008).

Desenhar o Triângulo de Sierpinski pode parecer desafiador e impossível. Contudo, se aplicarmos as seguintes etapas, podemos criar facilmente este fractal (ASSIS et al., 2008):

- Nível 0. Desenhe um triângulo equilátero totalmente preenchido.
- Nível 1. Pegue o ponto médio de cada lado do triângulo e conecte-os. Contando com o triângulo original, você terá quatro triângulos equiláteros menores.
- Nível 2. Retire o triângulo central, esse passo vai revelar três triângulos congruentes, cujos lados são metade do lado do triângulo original.
- Nível 3. Repita o segundo passo nos triângulos remanescentes

Esse passo a passo pode ser visto na Figura 3b e vai gerar o triângulo de Sierpinski, que você pode fazer sozinho, desenhando num papel ou em qualquer editor de imagem.¹

Conseguiu notar a diferença entre os dois exemplos? No primeiro, apesar de a planta se parecer com o galho e o galho com a folha, eles não eram exatamente iguais, enquanto que o padrão do segundo exemplo era exatamente o mesmo. Isso diferencia duas classes de fractais: os autossemelhantes e os aproximadamente autossemelhantes. Os fractais que têm autossemelhança, também chamados de fractais determinísticos, são estruturalmente invariantes em todas as direções, isso significa que a replicação de sua forma acontece na mesma intensidade em todas as direções, eles são exatamente iguais. Já os auto-afins, exibem fatores de escalas assimétricos com relação às direções, como discutiremos com detalhes mais adiante.

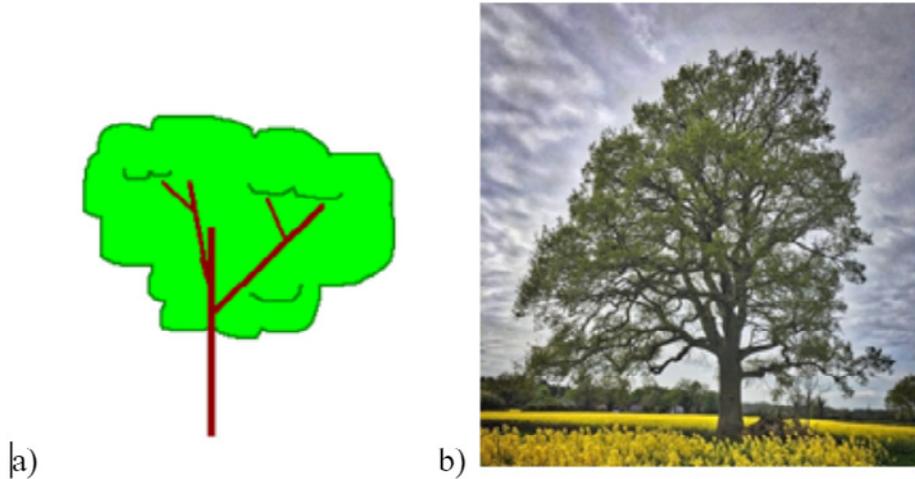
Padrões artificiais x padrões reais

Agora vamos testar suas capacidades de identificação. Entre as imagens abaixo, uma é uma foto real de uma árvore, e outra é uma representação. Observe o tronco das árvores. Uma delas é feita com

¹ O Triângulo de Sierpinski e outros fractais foram feitos no editor de imagem Paint. Veja como é interessante as relações de escala dos desenhos disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=sFEYQMrWNHU>.

replicações de figuras geométricas euclidianas e a outra é verdadeira. Você consegue identificar qual é a árvore real? Sim ou com certeza?

Figura 4 - a) Imagem de uma árvore desenhada num editor de imagem. b) Fotografia de uma árvore real

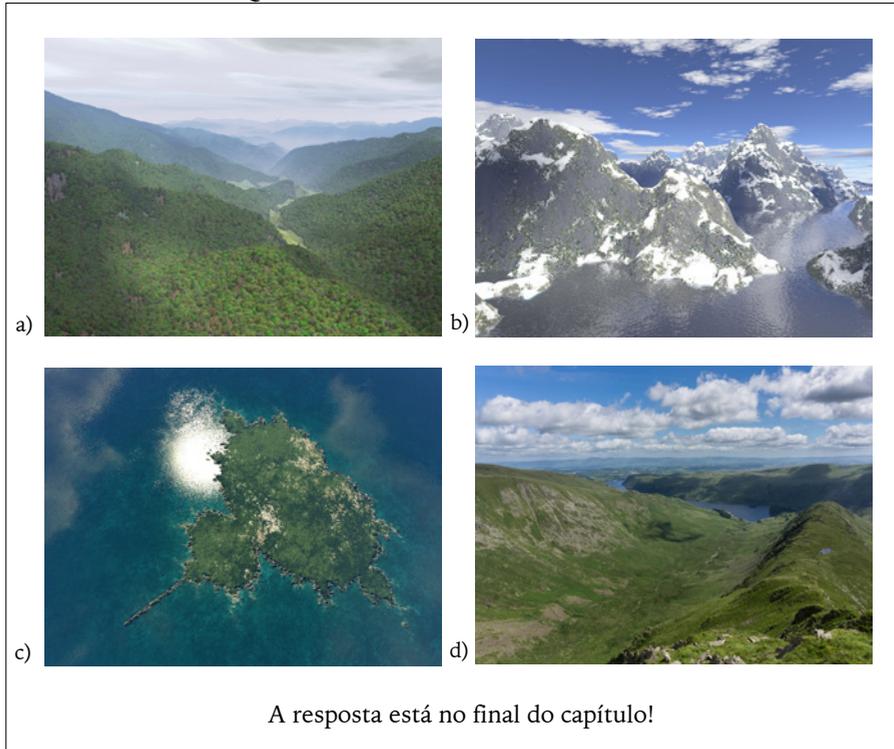


Fonte: a) elaborada pelos autores. b) Levine (2018).

Você deve ter identificado facilmente qual a figura real, isso porque a geometria euclidiana é baseada em figuras geométricas regulares e irregulares, bem definidas matematicamente – por exemplo, um quadrado é uma figura geométrica de quatro lados e quatro ângulos de 90° .

Agora veja as imagens do quadro abaixo (Quadro 1), todas representam paisagens naturais e apenas uma delas foi capturada por uma máquina fotográfica, as outras foram construídas digitalmente por intermédio de algoritmos fractais. Você saberia identificar a imagem real?

Quadro 1 - Geometria fractal x natureza



Fonte: produzida pelos autores.

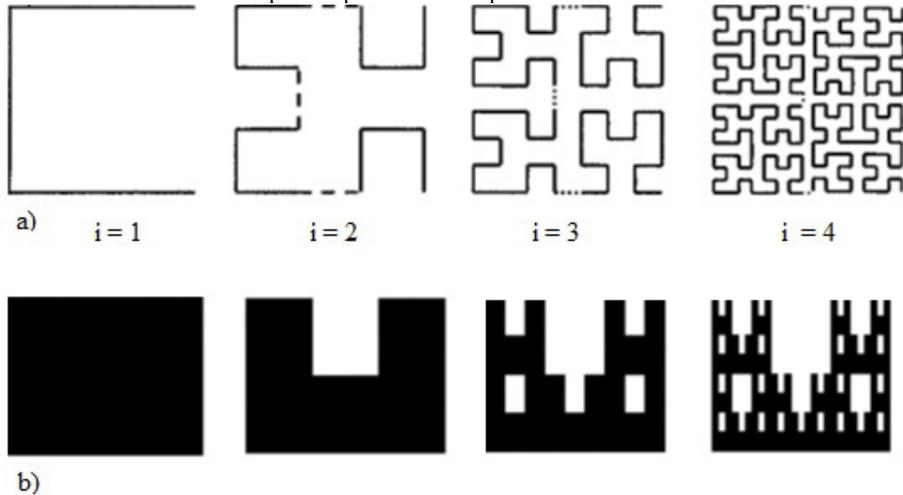
Como você pode perceber, é possível construir imagens bem realistas com os fractais, desse modo, eles podem ser encontrados desde na natureza, aos filmes de ficção científica e jogos eletrônicos. (FREITAS; GOI; GIULIANI, 2015) O filme *Star Trek II: The Wrath of Khan* [Jornada nas Estrelas II: A Ira de Khan], de 1982, foi um dos primeiros a usar algoritmos fractais para construir paisagens na indústria cinematográfica. (NORMAN, 2012)

Fractais auto-afins

Ao contrário dos fractais autossemelhantes, alguns fractais não mantêm sua estrutura uniformemente em todas as direções do espaço. Estes são chamados de auto afins. (ASSIS et al., 2008) O reescalonamento dos objetos auto afins depende da direção que está sendo analisada, portanto, o que muda na direção horizontal é diferente do que muda na

direção vertical. (KENKEL; WALKER, 1996) Como exemplo, vemos o fractal da Figura 5. Nele, o algoritmo de construção da figura envolve dividir a direção horizontal por três e a vertical por dois.

Figura 5 – exemplo de figura auto-afim. Um retângulo é dividido em seis partes (três colunas e duas linhas), a parte central da linha superior é removida. O processo é repetido para todas as partes restantes

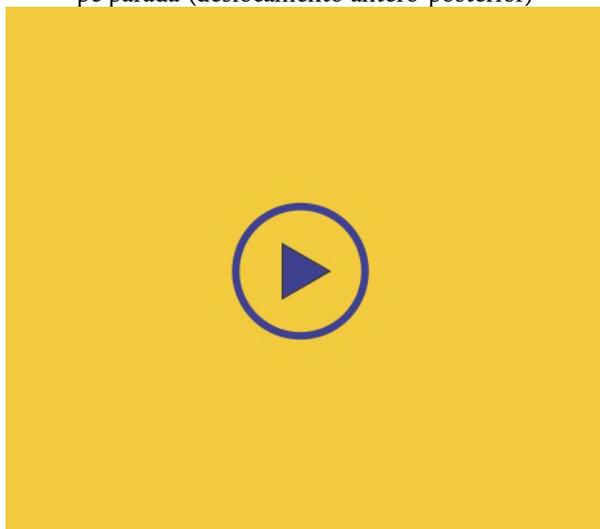


Fonte: Krzysztofik (2017).

Um outro exemplo de um objeto auto-afim é uma série temporal com flutuações irregulares. De modo simples, uma série temporal é um conjunto de observações contínuas ordenadas no tempo. Ao serem representadas numa tabela, cada linha apresenta a observação correspondente a um momento exato no tempo.

O Vídeo 1 mostra duas colunas com dados de tempo e deslocamento ântero-posterior, que compõem o gráfico na direita do vídeo com o tempo no eixo x (abscissas) e o deslocamento no eixo y (coordenadas) respectivamente. A animação mostra o ponto no gráfico que corresponde aos dados de linhas específicas da tabela. É importante observar que os valores vão modificando com o tempo, de forma que primeiro subiram e depois desceram, não o contrário. Dessa forma, podemos perceber que numa série temporal, a ordem dos dados é crucial para a sua análise.

Vídeo 1 – Demonstração de como as séries temporais são dispostas em colunas e são representadas no gráfico de linha de uma pessoa em pé parada (deslocamento ântero-posterior)



Fonte: elaborado pelos autores.

Como exemplo, temos o estudo de Duarte e Zatsiorsky (2000) que, após analisar o estabilograma de pessoas em pé numa plataforma de força, evidenciaram que o comportamento do centro de pressão é similar tanto em 10 segundos quanto em 10 minutos, mostrando que as flutuações do sinal são iguais, independentemente da escala de tempo.

Assim, quando séries temporais são medidas e analisadas, pode existir um comportamento invariante no tempo, em que variações em segundos são parecidas com as variações em horas. A essa propriedade é dada o nome de auto-afim.

Aplicações na área da saúde

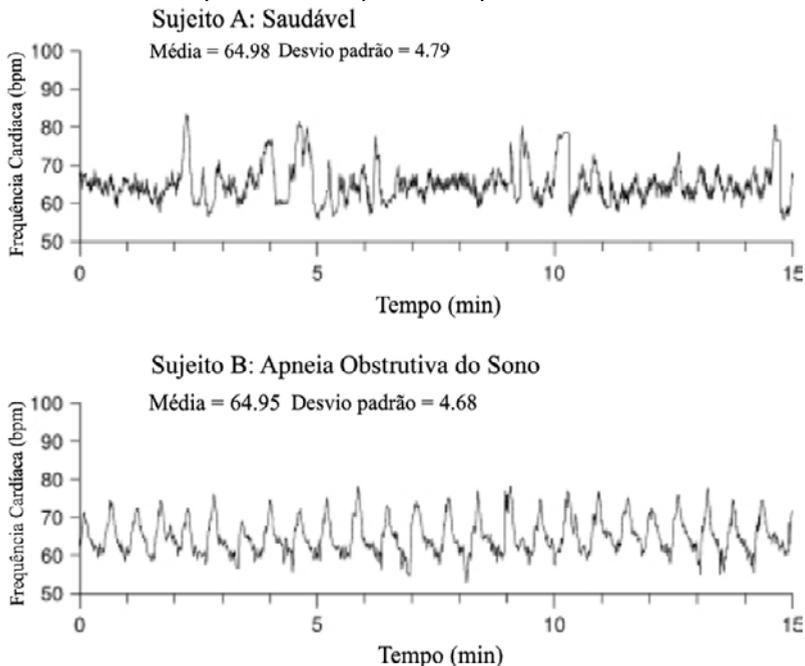
A aplicação de medidas fractais de um sinal tem sido muito usada para verificar a variabilidade cardíaca. (GOLDBERGER, 1996) Através do sinal do ECG, os pesquisadores identificam o ponto R do complexo QRS² e constroem uma série temporal do intervalo RR entre batimentos.

Apesar de serem usados como sinônimos, os termos variabilidade e complexidade são diferentes. Um sinal complexo possui variabilidade,

2 Representa a contração ventricular (batimento cardíaco). (YEH; WANG, 2008)

mas nem toda série temporal que varia é complexa. As medidas de variabilidade estão relacionadas com a variância estatística, relacionada com a distribuição do sinal em questão. Ainda que se tenha bastante informação sobre como o sinal varia, como num *boxplot*,³ essa informação representa apenas uma “fotografia” dos dados, dando uma noção do que acontece com a variabilidade geral do sistema. Contudo, *boxplot* iguais podem representar séries temporais bastante distintas. Isso acontece porque nas medidas estatísticas mais comuns (media, moda, mediana, interquartis e desvio padrão) a sequência temporal não é importante, uma vez que estas assumem que os dados são independentes, ou seja, decorrelacionados. (GOLDBERGER; MOODY; COSTA, 2012) Mas será que são mesmo?

Figura 6 - Representação gráfica de duas séries temporais da variabilidade cardíaca. A série na parte superior corresponde a um sujeito sem patologias e a série da parte inferior corresponde a um sujeito com apneia obstrutiva do sono



Fonte: adaptado de Goldberger, Moody e Costa (2012).

3 Representação gráfica dos dados que, normalmente, apresenta cinco valores: Valor mínimo, Quartil inferior (que contém 25% dos dados abaixo da mediana), Mediana (valor central), Quartil superior (que contém 25% dos dados acima da mediana) e Valor máximo. (GOLDBERGER; MOODY; COSTA, 2012)

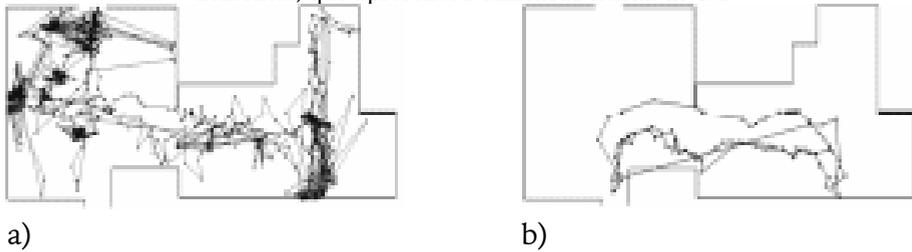
A Figura 6 mostra duas séries temporais da variabilidade cardíaca, uma de um paciente com apneia obstrutiva do sono e outro de uma pessoa sem apneia. Visualmente, o traçado do gráfico é diferente entre as duas séries e, portanto, seria interessante fazer uma medida que diferenciasses as duas séries temporais. Usualmente, a primeira ideia é calcular média e Desvio-Padrão (DP), contudo, essas duas métricas não conseguiram diferenciar as séries.

Alguns autores argumentam que a variabilidade medida pelo DP caracteriza o somatório de variabilidade do sistema, ou seja, toda a variabilidade do sistema está representada por um único número. Isso é diferente da variabilidade estrutural que é vista no desenho do gráfico e representa a dinâmica de todo o sinal. (STERGIOU et al., 2004; STERGIOU; HARBOURNE; CAVANAUGH, 2006) Nesse caso, é como se a série fosse um vídeo, na qual é possível enxergar o comportamento inteiro da variável num intervalo de tempo. Outros autores identificam a variabilidade estrutural de variabilidade complexa. (GOLDBERGER; MOODY; COSTA, 2012) Neste capítulo, adotaremos o termo variabilidade estrutural.

Uma medida que é bastante utilizada na literatura é a Dimensão Fractal (DF). Essa é uma medida de auto semelhança e vai caracterizar a rugosidade da trajetória em questão, ou seja, de modo simples, a DF calcula o quanto que a trajetória percorrida por um objeto ocupa o espaço no qual está inserido. De modo que, quanto maior a área ocupada pela trajetória, maior será a DF.

Essa medida foi, inclusive, usada para identificar pessoas com diagnóstico de demência e obteve ótima acurácia. (KEARNS; FOZARD; NAMS, 2011) Num outro trabalho, de revisão, os mesmos autores mostram duas figuras representativas da trajetória de uma pessoa com demência e outra sem. (KEARNS; FOZARD; NAMS, 2017) Nesse caso, vale ressaltar que estamos analisando o quanto o sujeito se desloca em relação ao plano e, sabendo que o plano tem dimensão 2 – o que pode ser denotado como: largura e comprimento –, a dimensão fractal pode variar até 2. É perceptível que a trajetória da segunda é mais tortuosa e, portanto, ocupa mais o espaço, por isso a dimensão fractal é maior (Figura 7).

Figura 7 - a) Trajetória espacial de um sujeito sem demência, que apresentou dimensão fractal de 1.2, b) Trajetória espacial de uma pessoa diagnosticada com demência, que apresentou dimensão fractal de 1.4



Fonte: Kearns, Fozard e Nams (2017).

Na análise da marcha de pacientes com Parkinson e idosos sem disfunções motoras, a dimensão fractal dos pacientes é significativamente maior, o que, segundo os autores, significa menor suavidade do sinal (maior rugosidade). (SEKINE et al., 2004) Na ciência do movimento, o uso deste método de análise também tem sido voltado mais para análise de equilíbrio. Um estudo comparou a DF da trajetória do centro de pressão do apoio unipodal de pacientes com lesão aguda de tornozelo que falharam⁴ no teste de equilíbrio com olhos fechados, usando membro lesionado, pacientes com a mesma lesão só que usando o pé não lesionado e controles sem lesão nos tornozelos. A trajetória dos pacientes que falharam no teste tinha DF menor. Dessa forma, a medida consegue diferenciar os grupos e identificar o que tem a lesão. (DOHERTY et al., 2014)

Um método bastante usado para identificar o comportamento fractal de uma série temporal é a Detrended Fluctuation Analysis (DFA). A DFA determina a presença de correlações de longo alcance, ou seja, como flutuações futuras na série temporal estão relacionadas com flutuações passadas. Um fato bem importante é que o DFA não é afetado por séries em que as trajetórias exibam tendências gerais com o tempo, uma vez que o método tem como base o melhor ajuste linear local para estimar a flutuação em diferentes escalas. (HAUSDORFF et al., 1996)⁵

4 A falha consistia em usar o membro inferior contralateral para recuperar o equilíbrio ou prevenir a queda.

5 Para entender melhor como isso acontece, ver em: <https://www.youtube.com/watch?v=MP6C18fdE4k>.

O resultado final, a DFA, é um expoente de escalonamento (α) chamado de alfa. Este expoente pode variar de 0 a 1 e está relacionado com a dimensão fractal pela equação $DF = 2 - \alpha$. Para explicar o significado do α tomaremos como exemplo uma série temporal formada pelo *intervalo de tempo entre as passadas*⁶ de uma marcha com 500 passadas. Se o expoente for igual a 0.5 significa que o sinal é aleatório e temos a mesma chance da próxima passada ser mais rápida ou mais lenta, o que seria equivalente a jogar uma moeda para decidir o tempo que será gasto na próxima passada.⁷ Se o α for maior que 0.5 significa que passadas no futuro tem uma correlação persistente com passadas do passado. Ué, mas o que é isso? De uma forma geral, uma marcha com uma correlação de longo alcance significa que o intervalo de tempo da passada realizada num momento X depende de todas as passadas anteriores. O comportamento persistente significa dizer que se a passada 13 ficou mais lenta, a tendência é que a próxima passada fique mais lenta e assim por diante. Se o comportamento mudar e a passada ficar mais rápida, a tendência é que as próximas passadas também fiquem mais rápidas.

Outro exemplo de persistência é a chuva. Quando cai uma gota de chuva, você corre para se abrigar, pois sabe que é muito provável que mais gotas cairão em você. Quando a queda das gotas cessa, o comportamento continua persistente, pois a chuva para.

Voltando para o nosso exemplo anterior, se α for menor que 0.5, significa que as passadas também são correlacionadas, mas o comportamento é diferente, pois se torna anti-persistente. Isso significa que, se a passada 13 ficou lenta, a próxima será rápida em relação à anterior. Diferentes tarefas foram usadas no estudo das características fractais do movimento humano, mas, por questão de tempo, espaço e abundância de trabalhos publicados, vamos focar na análise da marcha, que já vai exigir bastante do nosso raciocínio!

Os primeiros trabalhos com marcha foram feitos com indivíduos saudáveis, para identificar se existia uma Correlação de Longo Alcance

6 Corresponde ao intervalo de tempo entre o contato inicial de um pé até o outro contato inicial do mesmo pé.

7 Também conhecido como o caminhar do bêbado. Em termos de direção, o caminhar do bêbado é aleatório, ou seja, a probabilidade que ele vá para frente, para trás, esquerda ou direita, é a mesma. (MLODINOW, 2011)

(CLA) ou se o nosso caminhar era aleatório. Hausdorff e demais autores (1995) construíram a série temporal usando a variável *tempo da passada* e usaram o método DFA para analisar o sinal. Para verificar se o sinal era mesmo aleatório ou não, os autores pegaram a série original da marcha e embaralharam ela – misturaram aleatoriamente os valores da série de forma que todos os valores tinham a mesma chance de estar em qualquer posição da série.⁸ Hausdorff e demais autores (1995) mostraram a presença da CLA na série original (alfa=0.83) e a quebra da correlação após o embaralhamento (alfa=0.50). (HAUSDORFF et al., 1995)

Uau! Então quer dizer que o tempo da passada executada no final da marcha depende do tempo da passada realizada no início da marcha? Sim! A hipótese era de que: se este sinal não é aleatório, é porque existe um mecanismo de controle originando-o. E os autores chamaram este comportamento de fractal porque ele acontece independentemente da escala. Não importa se você analisa 500 passadas ou 50, o comportamento é o mesmo.

A partir deste primeiro estudo, surgiram diversos outros para tentar entender a origem dessas correlações, responder novas perguntas de investigação e ver se esta seria uma medida interessante de compreensão do movimento humano. Nesses estudos, evidenciou-se que as correlações se mantem em diferentes velocidades, mas somem quando a marcha é feita seguindo um metrônomo (HAUSDORFF et al., 1996; JORDAN; CHALLIS; NEWELL, 2007b), estão presentes na corrida e possuem comportamento peculiar nas diferentes velocidades dessa atividade (JORDAN; CHALLIS; NEWELL, 2006, 2007a), estão reduzidas (valores menores de α) em idosos e pacientes com doença da Huntington (inclusive o α diminui mais com a gravidade da doença) (HAUSDORFF et al., 1997), reduzidas em pacientes com Parkinson (FRENKEL-TOLEDO et al., 2005; HAUSDORFF et al., 2000) e são iguais à de sujeitos controles num estudo feito com pacientes diabéticos. (GATES; DINGWELL, 2007) As CLAs foram encontradas também na marcha usando outras variáveis e métodos diferentes do usado por Hausdorff e colaboradores (GATES; DINGWELL, 2007; JORDAN; CHALLIS; NEWELL, 2007a, 2007b; KHANDOKER et al.,

8 Essa análise é, normalmente, descrita como *surrogate analysis*.

2008; TERRIER; TURNER; SCHUTZ, 2005), mostrando a versatilidade deste método.

A origem fisiológica da estrutura fractal na marcha ainda é controversa (MOON et al., 2016). Contudo, uma hipótese é de que está no sistema nervoso central, pois está reduzida em pacientes com distúrbios motores de origem central (Parkinson e Huntington) e idosos. (HAUSDORFF et al., 1997) Outra evidência que endossa essa hipótese é o fato de a estrutura fractal da marcha de pacientes diabéticos ser igual à de sujeitos controles, pois a neuropatia diabética atinge o sistema nervoso periférico e não o central. (GATES; DINGWELL, 2007) Discute-se também a possibilidade destas flutuações refletirem a automaticidade e fluidez da marcha, uma vez que as correlações somem na presença de um metrônomo (HAUSDORFF et al., 1996) e reduzem com o uso da esteira, que poderia ser uma pista sensorial externa. (FRENKEL-TOLEDO et al., 2005)

Esse raciocínio é também apoiado pelos resultados dos trabalhos com pacientes com Parkinson, pois ainda que o valor absoluto do α varie entre estudos (de 0.72 a 0.81 em jovens adultos sem disfunções motoras), este é sistematicamente menor em pacientes com Parkinson em relação aos controles dos estudos. (SIRAGY; NANTEL, 2018) Dessa forma, cada passo da marcha destes pacientes é mais independente dos passos anteriores, tornando o caminhar menos fluido. (HAUSDORFF, 2009)

É importante ressaltar que, em alguns trabalhos, as medidas tradicionais, de somatório da variabilidade, não conseguiam diferenciar os grupos estudados. Um estudo feito com idosos que tinham “alto nível” de desordens na marcha mostrou que esta era menos correlacionada que a dos controles. O curioso foi notar que, dentro do grupo de pacientes, as medidas clínicas (medo de queda, força muscular dos membros inferiores, *Pull test*) e de somatório de variabilidade da marcha (calculada através do coeficiente de variação)⁹ não conseguiram diferenciar os grupos que tinham histórico de queda dos que não tinham. Apenas a medida de estrutura de variabilidade (DFA) conseguiu separar os grupos, sendo que os que tinham histórico de queda tinham a marcha com

⁹ Coeficiente de Variação (CV) = Desvio padrão/média. O CV mede o quanto a medida se distancia da média.

alfa significativamente menor, ou seja, mais aleatória e desorganizada temporalmente. (HERMAN et al., 2005)

Resultados como este último reforçam a ideia que precisamos adicionar ferramentas que avaliem não apenas o somatório da variabilidade, mas também a estrutura da variabilidade do sinal. Os métodos fractais geram novas informações e complementam a avaliação do movimento. Ainda que precisemos compreender mais a origem deste comportamento fractal e como ele se comporta em diferentes tarefas, variáveis e populações, a presença das CLAs na marcha humana é bem fundamentada e abre um novo campo de possibilidades para a compreensão da natureza do movimento humano, que é extremamente complexo. A citação abaixo resume bem a beleza e a complexidade do controle motor humano:

Perturbações fisiológicas, como a respiração e os batimentos cardíacos (os quais também apresentam correlações de longo alcance), perturbam continuamente o equilíbrio. Cada uma dessas características pode ser responsável pelo processo de correlação de longo alcance. Neste cenário é improvável que um único fator neurológico ou fisiológico possa ser identificado como a fonte do comportamento fractal. Ao contrário disso, esse comportamento é o resultado de um sistema não linear complexo envolvendo vários sistemas diferentes em distintas escalas de tempo e espaço do corpo humano. (DUARTE; ZATSIORSKY, 2000, p. 176, tradução nossa)¹⁰

Conclusão

Concluimos este capítulo com a esperança de ter convencido você, leitor e leitora, de que este tipo de análise é interessante e vale a pena ser aplicada como uma medida complementar do movimento humano. Além disso, fica aqui o convite para novas pesquisas, pois o que não falta é pergunta para respondermos!

A resposta da pergunta do Quadro 1 é letra D

10 “Physiological perturbations, e.g. breathing and heartbeats (which also present long-range correlations), continuously perturb the equilibrium. Each of these characteristics can be responsible for the long-range correlation process. Within this scenario, it is unlikely that a single neurological or physiological factor can be identified as the source of the fractal behavior. Rather, this behavior is the outcome of a complex non-linear system involving a number of different systems on different time and length scales of the human body”. (DUARTE; ZATSIORSKY, 2000, p. 176)

Referências

- ASSIS, T. A. de *et al.* Geometria fractal: propriedades e características de fractais ideais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 2304-1-2304-10, 2008. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/302304.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2019.
- CORRÊA, A. de O. *Geometria fractal no ensino médio*. 2014. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Centro de Ciência Exata e Tecnologia, Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2014.
- CORTÊS, I. R. da C. *Geometria fractal no ensino médio: teoria e prática*. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Matemática) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: http://www.biblioteca.unirio.br/ccet/profmat/tcc/TCC_IVANA.pdf. Acesso em: 15 jul. 2019.
- DOHERTY, C. *et al.* Balance failure in single limb stance due to ankle sprain injury: An analysis of center of pressure using the fractal dimension method. *Gait & Posture*, Oxford, v. 40, n. 1, p. 172-176, 2014.
- DUARTE, M.; ZATSIORSKY, V. M. On the fractal properties of natural human standing. *Neuroscience Letters*, Limerick, v. 283, p. 173-176, 2000. Disponível em: <http://pesquisa.ufabc.edu.br/bmclab/pubs/nl00.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2019.
- FREITAS, J. Q. P. de; GOI, M. E. J.; GIULIANI, O. F. *Resolução de problemas no ensino da matemática: uma introdução à geometria fractal no ensino fundamental*. 2015. Monografia (Licenciatura em Ciências Exatas) – Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2015. Disponível em: <http://cursos.unipampa.edu.br/cursos/cienciasexatas/files/2014/06/TCC-Jeruzza-Petrarca.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- FRENKEL-TOLEDO, S. *et al.* Treadmill walking as an external pacemaker to improve gait rhythm and stability in Parkinson's disease. *Movement Disorders*, New York, v. 20, n. 9, p. 1109-1114, Sept. 2005.
- FUZZO, R. A.; SANTOS, T. S. dos; FERREIRA, L. Fractais e Geogebra: Construindo a Curva de Koch. In: CONFERÊNCIA INTERAMERICANA DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, 13., 2011, Recife. *Anais [...]*. Recife: [s. n.], 2011. p. 1-6. Disponível em: https://xiii.ciaem-redumate.org/index.php/xiii_ciaem/xiii_ciaem/paper/viewFile/1791/992. Acesso em: 9 ago. 2019.

GATES, D. H.; DINGWELL, J. B. Peripheral neuropathy does not alter the fractal dynamics of stride intervals of gait. *Journal of Applied Physiology*, Washington, v. 102, n. 3, p. 965-971, Mar. 2007. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2827357/pdf/nihms177656.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2019.

GOLDBERGER, A. L. Complex Systems. *Proceedings of the American Thoracic Society*, New York, v. 3, p. 467-472, 2006. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2647633/pdf/PROCATS36467.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2019.

GOLDBERGER, A. L. Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractals, and complexity at the bedside. *Lancet*, [s. n.], v. 347, n. 9011, p. 1312-1314, 1996.

GOLDBERGER, A. L.; MOODY, G. B.; COSTA, M. D. Variability vs. Complexity. 2012. Disponível em: <https://archive.physionet.org/tutorials/cv/#answers/>. Acesso em: 16 jul. 2019.

HAUSDORFF, J. M. Gait dynamics in Parkinson's disease: Common and distinct behavior among stride length, gait variability, and fractal-like scaling. *Chaos*, Woodbury, v. 19, p. 026113-1-026113-14, 2009. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2719464/pdf/CHAOEH-000019-026113_1.pdf. Acesso em: 2 jul. 2019.

HAUSDORFF, J. M. *et al.* Altered fractal dynamics of gait: reduced stride-interval correlations with aging and Huntington's disease. *American Physiological Society*, [s. n.], v. 82, n. 1, p. 262-269, jan. 1997. Disponível em: <https://journals.physiology.org/doi/pdf/10.1152/jappl.1997.82.1.262>. Acesso em: 2 jul. 2019.

HAUSDORFF, J. M. *et al.* Dynamic markers of altered gait rhythm in amyotrophic lateral sclerosis. *Journal of Applied Physiology*, Washington, v. 88, n. 6, p. 2045-2053, 2000.

HAUSDORFF, J. M. *et al.* Fractal dynamics of human gait: stability of long-range correlations in stride interval fluctuations. *Journal of Applied Physiology*, Washington, v. 80, n. 5, p. 1448-1457, 1996.

HAUSDORFF, J. M. *et al.* Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait. *Journal of Applied Physiology*, Washington, v. 78, n. 1, p. 349-358, jan. 1995.

HERMAN, T. *et al.* Gait instability and fractal dynamics of older adults with a “cautious” gait: why do certain older adults walk fearfully? *Gait & Posture*, Oxford, v. 21, n. 2, p. 178-185, Feb. 2005.

HOKUSAI, K. *A grande onda*. 1830. 1 gravura.

JORDAN, K.; CHALLIS, J. H.; NEWELL, K. M. Long range correlations in the stride interval of running. *Gait & Posture*, Oxford, v. 24, n. 1, p. 120-125, Aug. 2006.

JORDAN, K.; CHALLIS, J. H.; NEWELL, K. M. Speed influences on the scaling behavior of gait cycle fluctuations during treadmill running. *Human Movement Science*, Amsterdam, v. 26, n. 1, p. 87-102, Feb. 2007a.

JORDAN, K.; CHALLIS, J. H.; NEWELL, K. M. Walking speed influences on gait cycle variability. *Gait & Posture*, Oxford, v. 26, n. 1, p. 128-134, June. 2007b.

KEARNS, W. D.; FOZARD, J. L.; NAMS, V. O. Movement Path Tortuosity in Free Ambulation: Relationships to Age and Brain Disease. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, New York, v. 21, n. 2, p. 539-548, 2017.

KEARNS, W. D.; FOZARD, J. L.; NAMS, V. O. Wireless telesurveillance system for detecting dementia. *Gerontechnology*, [s. n.], v. 10, n. 2, p. 90-102, 2011.

KENKEL, N.; WALKER, D. Fractals in the biological sciences. *Coenos*, Gorizia, v. 11, p. 77-100, 1996.

KHANDOKER, A. H. *et al.* Investigating Scale Invariant Dynamics in Minimum Toe Clearance Variability of the Young and Elderly During Treadmill Walking. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, New York, v. 16, n. 4, p. 380-389, Aug. 2008.

KRZYSZTOFIK, W. J. *Fractals in Antennas and Metamaterials Applications*. 2017. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/fractal-analysis-applications-in-physics-engineering-and-technology/fractals-in-antennas-and-metamaterials-applications>. 1 nov. 2019.

LEVINE, A. *Tree of life*. 2018. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/37996646802@N01/39870730240>. Acesso em: 2 jul. 2019.

MANDELBROT, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W. H. Freeman, 1983.

- MLODINOW, L. *O andar do bêbado: como o acaso determina nossas vidas*. Rio de Janeiro: Zahar, 2011.
- MOON, Y. *et al.* Gait variability in people with neurological disorders: A systematic review and meta-analysis. *Human Movement Science*, Amsterdam, v. 47, p. 197-208, Jun. 2016.
- NASCIMENTO, M. do; SILVA, S. de C. R. da; MACIEL, N. A. A Didactic Proposal For The Teaching Of Fractal Geometry In High School. *Vidya*, Santa Maria, v. 32, n. 2, p.113-132, July/Dec. 2012.
- NORMAN, J. “Star Trek II” Includes the First Completely Computer-Generated (CGI) Cinematic Image Sequence in a Feature Film. 2012. Disponível em: <https://www.historyofinformation.com/detail.php?entryid=3584>. Acesso em: 1 nov. 2019.
- NUNES, R. S. R. *Geometria fractal e aplicações*. 2006. Dissertação (Mestrado em Física) - Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, 2006. Disponível em: http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/maio2013/matematica_artigos/dissertacao_nunes.pdf. Acesso em: 15 ago. 2019.
- ROCON, S. A.; PAIVA, W. J. M. Prevalência de Doenças Crônicas Não Transmissíveis (DCNTs) devido a possível inadequação na alimentação e inatividade física entre professores do CEEBJA de Apucarana-PR. In: PARANÁ. Secretaria de Estado da Educação. Superintendência de Educação. *O professor PDE e os desafios da escola pública paranaense, 2012*. Curitiba: SEED/PR, 2012. (Cadernos PDE).
- SALLUM, É. M. Fractais no ensino médio. *Revista do Professor de Matemática*, São Paulo, ed. 57, 2005. Disponível em: <http://rpm.org.br/cdrpm/57/1.htm>. Acesso em: 12 ago. 2019.
- SEKINE, M. *et al.* Fractal dynamics of body motion in patients with Parkinson’s disease. *Journal of Neural Engineering*, [s. n.], v. 1, n. 1, p. 8-15, 1 Mar. 2004.
- SIERPINSKI, W. *Comptes Rendus*. Paris: Acad. Sci., 1915.
- SIRAGY, T.; NANTEL, J. Quantifying Dynamic Balance in Young, Elderly and Parkinson’s Individuals: A Systematic Review. *Frontiers in Aging Neuroscience*, [s. n.], v. 10, p. 1-22, 2018.

SOUZA, C. *Geometria fractal e aplicações no ensino médio*. 2014. Dissertação (Mestrado em Matemática) - Instituto de Ciências Exatas, Universidade de Brasília, 2014.

STERGIOU, N. *et al.* The effect of the walking speed on the stability of the anterior cruciate ligament deficient knee. *Clinical Biomechanics*, Oxford, v. 19, p. 957-963, 2004.

STERGIOU, N.; HARBOURNE, R.; CAVANAUGH, J. Optimal movement variability: a new theoretical perspective for neurologic physical therapy. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 120-129, 2006.

TERRIER, P.; TURNER, V.; SCHUTZ, Y. GPS analysis of human locomotion: Further evidence for long-range correlations in stride-to-stride fluctuations of gait parameters. *Human Movement Science*, Amsterdam, v. 24, n. 1, p. 97-115, Feb. 2005.

VALIM, J.; COLUCCI, V. Geometria Fractal no Ensino Fundamental e Médio. In: SEMANA ACADÊMICA DA MATEMÁTICA, 12., 2008, Cascavel. *Anais [...]*. Cascavel: Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2008. p. 47-57.

VARGAS, A. F. *et al.* Aprendendo matemática através de fractais: uma experiência no ensino médio. In: ENCONTRO REGIONAL DE ESTUDANTES DE MATEMÁTICA DA REGIÃO

SUL, 20., 2014, Bagé. *Anais [...]*. Bagé: Fundação Universidade Federal do Pampa, 2014. p. 766-774.

YEH, Y.-C.; WANG, W.-J. QRS complexes detection for ECG signal: The Difference Operation Method. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Amsterdam, v. 91, p. 245-54. 2008.

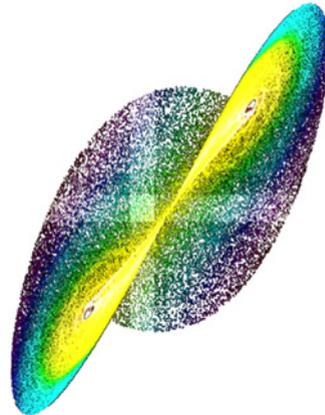
Expoente de Lyapunov

Ana Paula Quixadá
Denise Gomes de Castro
Jose Garcia Vivas Miranda

O que saberei responder no final deste capítulo:

- O que é o efeito borboleta?
- É possível prever com certeza acontecimentos em sistemas complexos?
- Qual a relação do expoente de Lyapunov com a estabilidade do movimento?

Figura 1 - Atrator de Lorenz



Fonte: elaborada pelos autores.

História do caos

A palavra “caos” remete à ideia de desordem, bagunça, algo sem forma, sem organização, sem rumo, desorientado. Quem nunca falou que a casa estava caótica, quando a mesma estava bagunçada, cheia de coisa espalhada de forma desordenada?

Bom, originalmente, a palavra *chaos* deriva do verbo grego *chasko* que está atrelado ao significado de manter-se sempre aberto, continuamente abrindo-se. Para os gregos, o caos é o começo de tudo, é o poder em si mesmo (Figura 2). Segundo Silveira e demais autores (1995,

p. 246) “Do caos provém, para o caos remete, no caos se mantém e de volta ao caos retorna sempre toda ordem e toda desordem, o mundo e o imundo, tudo que está sendo, como tudo que não está sendo.”

Figura 2 - Representação grega do Deus Caos



Fonte: Lotto e Capoferri (1524).

Apesar de toda a imprevisibilidade, há certa ordem no caos. Por exemplo, quando o seu quarto está “bagunçado”, você consegue achar determinado objeto, mas quando alguém “arruma” o cômodo, você fica perdido. Isso acontece porque se as condições iniciais de um sistema são conhecidas, é possível determinar o comportamento dele. O problema é que nós nunca sabemos, com precisão, estas condições, e como uma pequena variação destas pode mudar radicalmente o rumo de um evento, de modo que a nossa capacidade de predição fica bastante reduzida.

E se pudéssemos voltar ao passado e mudar alguns eventos? O que aconteceria? Para pensar melhor sobre isso, vamos discutir um pouco o filme *Efeito borboleta*.

Filme sobre o efeito borboleta

A expressão “efeito borboleta” surgiu da frase do matemático e filósofo Edward Lorenz (1972): “O bater das asas de uma borboleta no Brasil pode causar um tornado no Texas”. Esta expressão metafórica foi criada para representar a ideia de que eventos pequenos – muitas vezes considerados insignificantes – podem ter efeitos catastróficos e imprevisíveis.

O filme Efeito borboleta¹ aborda justamente essa premissa e explora a ideia da imprevisibilidade da vida e todas as possibilidades do “E se...”. A vontade é de falar com o protagonista: “Para de tentar corrigir o passado, Evan! Você não pode prever os acontecimentos futuros!”. Nós não temos o controle das consequências das nossas ações, pois estamos o tempo inteiro interagindo com outros seres complexos e dinâmicos, portanto – em teoria – é *impossível* prever o comportamento destes outros sistemas.

Um outro ponto da teoria do caos que o filme retrata é a *sensibilidade às condições iniciais*. De forma simples, num sistema complexo e caótico, esta sensibilidade é alta, de forma que uma mudança mínima nas condições iniciais pode causar uma mudança catastrófica no sistema em questão. No filme, vemos que a condição inicial (acontecimentos da infância) gera consequências que faz com que o destino de uma das personagens varie de garçonne frustrada que comete suicídio a típica garota de fraternidade de universidade americana. A sensibilidade às condições iniciais é crucial para compreendermos a medida abordada neste capítulo, por isso vamos aprofundar um pouco mais no tema.

Sensibilidade às condições iniciais

Para iniciar essa sessão, vamos pensar num experimento simples: uma boia colocada no mar ou num rio. Logicamente, depois de um tempo, a correnteza vai levá-la e ela irá percorrer certo caminho² como pode ser visto na figura abaixo (Figura 3).

1 Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=D59KZijEf2M>.

2 Caminho aqui está sendo usado como sinônimo de trajetória.

Figura 3 - Ilustração do efeito da sensibilidade às condições iniciais. Duas boias são colocadas lado a lado em um rio com correnteza



Fonte: elaborada pelos autores.

Agora, vamos pegar duas boias e colocá-las uma do lado da outra, com poucos centímetros as separando. Com o passar do tempo, as duas boias serão levadas pela correnteza, mas as duas irão percorrer o mesmo caminho? Depois de 15 minutos, as duas continuarão a poucos centímetros de distância?

Antes de responder a esse questionamento, vamos pensar: toda vez que retiramos a bateria do celular ele desliga. As pequenas flutuações no movimento de retirada não alteram o fato. Resumindo, pequenas mudanças não impactam, ou geram pequenos efeitos, no comportamento de certos objetos.

Mas será que isso é verdade para tudo? Voltemos a nossa pergunta anterior: Depois de 15 minutos, as duas boias continuarão a poucos centímetros de distância? A resposta é: não! (Figura 4).

Figura 4 - Ilustração do efeito da sensibilidade às condições iniciais. Boias inicialmente próximas em um rio se separam arbitrariamente devido ao efeito múltiplo das pequenas flutuações da correnteza



Fonte: elaborada pelos autores.

Isso acontece porque as ondas do mar são influenciadas por muitos fatores diferentes, tais como: temperatura, ventos, correnteza, fase da lua etc. e, voltando ao nosso exemplo, mesmo em 15 cm de distância, cada uma das boias está sofrendo influências parecidas, mas não exatamente iguais.

Os sistemas reais que convivemos diariamente são, em sua quase totalidade, não lineares e, nesses sistemas, a interação entre os fatores variáveis é amplificada com a passagem do tempo, resultando em grandes efeitos (PEREDA et al., 2010; XAVIER; BORGES, 2005) e, no nosso caso, no distanciamento das boias. Além disso, não sabemos exatamente quais foram as condições iniciais de todas as variáveis que alteram a trajetória dessas boias, e nem temos certeza de quais são todas as variáveis que influenciam, pois talvez haja elementos interagindo que nós ainda nem sabemos que existem. (XAVIER; BORGES, 2005) Usando essa lógica para a análise do movimento, será que o modo como damos um primeiro passo influencia na trajetória dos passos seguintes?

Os sistemas que exibem comportamentos complexos são formados por partes individuais que se comunicam, interferem e influenciam umas às outras. Apesar dessa ideia parecer meio louca e inferir um sistema desordenado e desconexo, esses sistemas podem apresentar comportamentos coerentes, em que todas as partes se unem, formando um organismo extraordinariamente organizado. Há ordem no caos, mas qual a relação entre determinismo e imprevisibilidade?

Determinismo X imprevisibilidade

Por todo o livro, temos falado sobre sistemas não lineares que modificam com o tempo e como calculá-lo através de métodos matemáticos – como MED (Capítulo 4), fractal (Capítulo 5) –, mas poderíamos prever ou inferir resultados?

A essa ideia de prever a dinâmica futura de sistemas é chamada determinismo. Em sistemas não lineares, que é o foco deste livro, há certa dificuldade em determinar o futuro de um sistema devido à sua complexidade (Capítulo 1). A interação, cooperação e interferência de cada parte do sistema resulta no erro associado. Então, como prever o

futuro de um sistema dinâmico não linear? Refazendo essa pergunta, como prever o risco de queda de um paciente com Doença de Parkinson ou mesmo demência? Para isso vamos voltar um pouco no tempo...

Por muitos anos, as leis determinísticas, como as leis de movimento da mecânica clássica, foram consideradas o centro da ciência. Acreditava-se que “Dado um conhecimento *aproximado* das condições iniciais e um entendimento da lei natural, pode-se calcular o comportamento *aproximado* desse sistema”. (GLEICK, 1989, p. 12) Desta forma, pequenas interferências no sistema vão gerar efeitos pequenos. Esse conceito está na base do nosso desenvolvimento tecnológico, gerando enormes contribuições para as nossas vidas, como na construção de computadores, foguetes espaciais e o surgimento da biomecânica! Contudo, recentemente essa visão foi drasticamente alterada.

Em meados do século XX, a meteorologia era baseada em intuição e estatísticas do passado (ex: a temperatura média de Salvador é de 22°; o número médio de dias chuvosos em Riad é de 10 por ano). Em 1960, o matemático Edward Lorenz criou um modelo atmosférico no icônico computador *Royal McBee* (Figura 5), com 12 variáveis climáticas, como velocidade do vento e temperatura. Ele colocava os dados das variáveis no computador e este gerava um gráfico da previsão meteorológica. Certo dia, devido às funcionalidades desse computador, ele precisou realizar a simulação uma segunda vez, mas resolveu arredondar o número de uma variável de 0.506127 para 0.506. O resultado foi uma mudança drástica no padrão do sinal, o que surpreendeu bastante Lorenz, que num momento “Eureca!” entendeu que pequenas mudanças podem causar grandes consequências. (DIZIKES, 2011)

A partir daí surgiu a importância de compreender melhor a influência dessas pequenas mudanças num sistema, e foram criadas metodologias e índices para calcular essa sensibilidade.

Figura 5 - Computador Royal McBee, utilizado por Lorenz para simular um sistema atmosférico



Fonte: Couperus (2010).

Formas de caracterizar o caos (expoente de Lyapunov)

Existem dois algoritmos, mais usados na área de análise do movimento, para calcular este expoente, o de Rosenstein (ROSENSTEIN; COLLINS; DE LUCA, 1993) e o de Wolf e demais autores (1985), que foi o primeiro a ser publicado. O cálculo da medida inicia com uma série temporal, que, na análise de movimento, pode ser oriunda de qualquer variável cinemática (velocidade, aceleração, posição, angulação etc.). A Figura 5 mostra o passo a passo deste tipo de análise. Em A, a série temporal é convertida num espaço de fase, no qual são adicionadas dimensões para o sinal original, sendo que esse espaço de fase apresenta como o estado no passado se relaciona com estados futuros; em B, a figura dá um zoom nas trajetórias do espaço de fase e mostra como pontos com condições iniciais próximas evoluem, verificando se estas se mantiveram estáveis, convergiram ou divergiram com o tempo

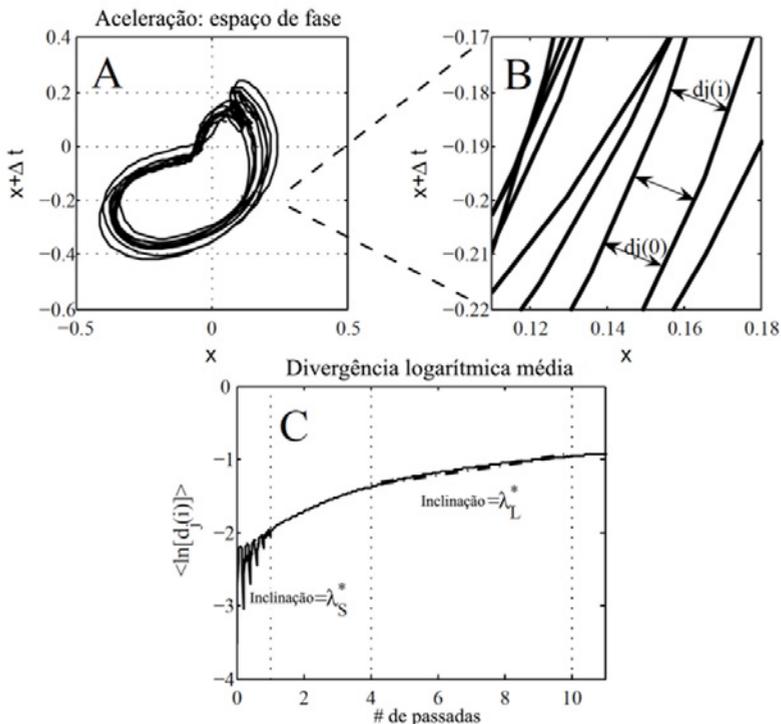
(Figura 6 C). Alguns autores dividem essa curva em dois expoentes: o curto (λ_S) e o longo (λ_L).

Como visto anteriormente e explicado na figura acima, o expoente de Lyapunov (Λ ou λ) calcula o quanto caminhos se afastam em relação às suas condições iniciais, fornecendo informações sobre o comportamento dinâmico do sistema (BOSSOMAIER; GREEN, 2007; PEREDA et al., 2010), medindo as taxas de afastamento e aproximação dos caminhos. (BOSSOMAIER; GREEN, 2007)

Desse modo, λ depende dos efeitos de pequenas mudanças nas condições iniciais na evolução do caminho do sistema, onde

- $\lambda > 0$ corresponde a um regime caótico;
- $\lambda = 0$ representa um caminho constante;
- $\lambda < 0$ ilustra a redução na distância entre os caminhos;

Figura 6 - A) série temporal no espaço de fase; B) Comparação da distância entre pontos ao longo das trajetórias do espaço de fase; C) Gráfico de *scaling* gerado a partir das distancias do passo anterior. O expoente é a inclinação da reta



Fonte: Terrier e Dériaz (2011).

Um sistema é dito caótico quando apresenta expoente de Lyapunov positivo e trajetória limitada. (BOSSOMAIER; GREEN, 2007) Note que essa é uma medida do comportamento local da série temporal, ou seja, ela verifica o comportamento de trajetórias em um espaço localizado do espaço de fase, para caracterizar o caráter global da série, é necessário realizar a média dos valores locais de λ sobre toda a trajetória no espaço de fase. (PEREDA et al., 2010)

Aplicações na área de saúde

A estabilidade pode ser definida como a habilidade do corpo/sistema motor de se reajustar após perturbações, que podem ser flutuações naturais (ex.: respiração, batimento cardíaco, ruído neuromuscular) ou interferências externas (ex.: pedra no caminho, vento, empurrão). (FULL et al., 2002; VAN EMMERIK et al., 2016) A estabilidade local, no contexto que estamos estudando, se refere a sensibilidade de um sistema a pequenas perturbações. Ela gera informação sobre como o sistema neuromuscular controla locomoção entre uma passada e outra, por exemplo. (DINGWELL; CUSUANO, 2000)

O expoente de Lyapunov é uma medida da estabilidade dinâmica local, que tem sido muito usada em estudos de biomecânica, especialmente para análise da marcha (HOLLMAN et al., 2016; JORDAN et al., 2009; REYNARD; TERRIER, 2017; SARBAZ et al., 2012; TERRIER; DÉRIAZ, 2013; YU et al., 2009)

Não é trivial comparar o expoente de Lyapunov com as medidas de variabilidade convencionais, que tratam cada ciclo da marcha como independente do outro e não separam convergências e divergências da série. As diferentes medidas relatam aspectos distintos da dinâmica do sistema. (VAN EMMERIK et al., 2016) Trajetórias muito divergentes podem ser interpretadas como a inabilidade do sistema motor de se recuperar adequadamente de uma perturbação, seja ela intrínseca ou extrínseca. Já o oposto, quando as trajetórias são convergentes, é considerado um aumento na estabilidade. (BRUIJN et al., 2009)

Dingwell e demais autores (2000) relataram que os pacientes com neuropatia diabética aumentaram a estabilidade dinâmica local ao reduzir a velocidade da marcha, ainda que a variabilidade da passada tenha

aumentado. Donker e demais autores (2007) avaliaram o expoente de Lyapunov ao longo da trajetória do COP, de 30 adultos jovens sem disfunções motoras. Segundo os autores, o expoente mede a sensibilidade às condições iniciais ou resistência do sistema a perturbações internas, como as flutuações naturais que ocorrem quando estamos em pé. A postura em pé com os olhos fechados reduziu a estabilidade dinâmica local e o controle postural passou a ser menos eficiente e automático. Neste mesmo estudo, comparou-se a tarefa simples com a dupla tarefa e não houve diferença na estabilidade dinâmica, talvez porque a tarefa não tenha sido tão desafiadora quanto fechar os olhos.

Terrier e Dériaz (2013) tinham o objetivo de verificar se um estímulo auditivo externo poderia influenciar a marcha de pessoas sem distúrbios motores. Eles usaram um metrônomo e mediram o expoente de Lyapunov longo e curto da trajetória do centro de pressão da marcha (na esteira) de 20 jovens e em diferentes velocidades. O resultado foi que, após a introdução do metrônomo, o efeito maior foi no expoente de Lyapunov longo, que reduziu bastante em todas as velocidades e direções. Desta forma, o uso de pistas auditivas aumenta a estabilidade dinâmica local, o que, provavelmente, é consequência de um controle mais consciente da marcha.

Numa revisão bem interessante sobre medidas que avaliam a estabilidade dinâmica na marcha e sua capacidade preditiva de probabilidade de queda, Bruijn e demais autores (2013) fizeram análise de diversos estudos e verificaram diversos níveis de validade. Uma das medidas analisadas foi o expoente de Lyapunov.

Para a validade de convergência em estudos experimentais, a revisão traz diversos trabalhos que mediram o expoente de Lyapunov em diversas condições experimentais. Por exemplo, um trabalho usou dessensibilização nos pés para deixar a marcha mais instável e constatou maiores valores de l_s relacionado às mudanças a curto prazo no sinal, e l_L relacionado a mudanças a longo prazo na série. Dois estudos colocaram pessoas para andarem em superfície instável e verificaram maiores valores de l_s , sendo que num destes também foi usada a perturbação visual para desequilibrar as pessoas, sendo obtido o mesmo resultado. Outro trabalho conseguiu o mesmo resultado usando estimulação vestibular galvânica para desestabilizar os participantes. Uma das conclusões da

revisão foi que o l_s possui boas evidências para identificar a probabilidade de quedas.

Na revisão sistemática de Siragy e Nantel (2018), é pontuada a dificuldade em interpretar os resultados desta medida, por conta das diferenças metodológicas encontradas nos estudos. Segundo os autores, ainda não há consenso sobre qual ponto anatômico deve ser usado, sendo que alguns estudos exploraram os membros inferiores e outros o tronco. O uso dos dados de acelerometria do tronco tem tido mais sucesso em identificar diferenças entre idosos e jovens. (BRUIJN et al., 2013)

Apesar dessas dificuldades, os autores relatam dois resultados consistentes nos estudos, independentemente da região avaliada. Mesmo os adultos jovens sem disfunção motora têm uma certa instabilidade dinâmica local, pois o expoente de Lyapunov é sempre positivo, o que pode ser causado por ruído neuromuscular, por exemplo. Além disso, a literatura concorda que essa divergência, ou instabilidade, aumenta com a idade. (SIRAGY; NANTEL, 2018)

Podemos afirmar que a complexidade reside em algum lugar entre a ordem e o completamente aleatório, e que medidas como o expoente de Lyapunov nos ajudam a compreender o fenômeno altamente complexo que é o movimento humano. Esperamos que este capítulo tenha servido para despertar a sua curiosidade a respeito de mais este método que enriquece o nosso arcabouço de informações sobre o movimento humano.

Referências

BOSSOMAIER, T. R. J.; GREEN, D. G. (ed.). *Complex Systems*. New York: Cambridge University Press, 2007.

BRUIJN, S. M. et al. Assessing the stability of human locomotion: A review of current measures. *Journal of the Royal Society Interface*, [S. l.], v. 10, n. 83, 2013.

BRUIJN, S. M. et al. Is slow walking more stable? *Journal of Biomechanics*, New York, v. 42, n. 10, p. 1506-1512, 2009.

- COUPERUS, J. *The machine that Mel programmed*. [S. l.], 21 Jan. 2010. Flickr. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/40648743@N00/4328210901>. Acesso em: 28 jul. 2019.
- DINGWELL, J. *et al.* Slower speeds in patients with diabetic neuropathy lead to improved local dynamic stability of continuous overground walking. *Journal of Biomechanics*, [S. l.], v. 33, n. 10, p. 1269-1277, Oct. 2000.
- DINGWELL, J. B.; CUSUMANO, J. P. Nonlinear time series analysis of normal and pathological human walking. *Chaos*, Woodbury, v. 10, n. 4, p. 848-863, 2000.
- DIZIKES, P. When the Butterfly Effect Took Flight. *MIT Technology Review*, [S. l.], 22 Feb. 2011.
- DONKER, S. F. *et al.* Regularity of center-of-pressure trajectories depends on the amount of attention invested in postural control. *Experimental Brain Research*, Berlin, v. 181, n. 1, p. 1-11, 2007.
- EFEITO borboleta. Direção: Eric Bress e J. Mackye Gruber. Produção: Anthony Rhulen, Chris Bender, Ashton Kutcher, J. C. Spink e A. J. Dix. Roteiro: Eric Bress, J. Mackye Gruber. [S. l.]: FilmEngine BenderSpink Katalyst, 2004. 1 DVD (113 min).
- FULL, R. J. *et al.* Quantifying dynamic stability and maneuverability in legged locomotion. *Integrative and Comparative Biology*, Mclean, v. 42, n. 1, p. 149-157, 2002.
- GLEICK, J. *Caos: a criação de uma nova ciência*. Rio de Janeiro: [s. n.], 1989.
- HOLLMAN, J. H. *et al.* Complexity, fractal dynamics and determinism in treadmill ambulation: Implications for clinical biomechanists. *Clinical Biomechanics*, Oxford, v. 37, p. 91-97, 2016.
- JORDAN, K. *et al.* Stability and the time-dependent structure of gait variability in walking and running. *Human Movement Science*, Amsterdam, v. 28, n. 1, p. 113-128, Feb. 2009.
- LORENZ, E. N. Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas? In: AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE, 139., 1972, [S. l.]. [Anais ...]. [S. l.]: AAAS, 1972.
- LOTTO, L.; CAPOFERRI, G. F. *Magnum Chaos*. 1524. 1 Incrustação de madeira. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/>

[Chaos_\(cosmogony\)#/media/File:Lotto_Capoferri_Magnum_Chaos.jpg](#).
Acesso em: 29 jul. 2019.

PEREDA, P. *et al.* *Nonlinear analysis of biomedical data*. La Laguna: Servicio de Publicaciones, 2010.

REYNARD, F.; TERRIER, P. Determinants of gait stability while walking on a treadmill: A machine learning approach. *Journal of Biomechanics*, New York, v. 65, p. 212-215, dez. 2017.

ROSENSTEIN, M. T.; COLLINS, J. J.; DE LUCA, C. J. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Amsterdam, v. 65, n. 1-2, p. 117-134, May 1993.

SARBAZ, Y. *et al.* Do the chaotic features of gait change in Parkinson's disease? *Journal of Theoretical Biology*, London, v. 307, p. 160-167, Aug. 2012.

SILVEIRA, A. M. da *et al.* *Caos, acaso e determinismo*. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 1995.

SIRAGY, T.; NANTEL, J. Quantifying Dynamic Balance in Young, Elderly and Parkinson's Individuals: A Systematic Review. *Frontiers in Aging Neuroscience*, [S. l.], v. 10, p. 1-22, 2018. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6262057/pdf/fnagi-10-00387.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2019.

TERRIER, P.; DÉRIAZ, O. Kinematic variability, fractal dynamics and local dynamic stability of treadmill walking. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 1-13, 2011. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3060113/pdf/1743-0003-8-12.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2019.

TERRIER, P.; DÉRIAZ, O. Non-linear dynamics of human locomotion: effects of rhythmic auditory cueing on local dynamic stability. *Frontiers in Physiology*, v. 4, p. 1-13, Sep. 2013. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3759806/pdf/fphys-04-00230.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2019.

VAN EMMERIK, R. E. A. *et al.* Comparing dynamical systems concepts and techniques for biomechanical analysis. *Journal of Sport and Health Science*, v. 5, n. 1, p. 3-13, 2016.

WOLF, A. *et al.* Determining Lyapunov Exponents from Time Series. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Amsterdam, v. 16, p. 285-317, 1985.

XAVIER, A. A. B.; BORGES, A. T. Teaching about complex system sensitivity to initial conditions. *In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS*, 5., 2005. *Anais [...]*. [S. l.], 2005. p. 2-3.

YU, W. W. *et al.* Non-linear analysis of body responses to functional electrical stimulation on hemiplegic subjects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, London, v. 223, n. 6, p. 653-662, 2009.

Sobre os(as) organizadores(as)

Ana Paula Quixadá

Possui Graduação em Fisioterapia e Mestrado em Tecnologias em Saúde pela Escola Bahiana de Medicina e Saúde Pública (EBMSP) e Doutorado em andamento em Difusão do Conhecimento pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Em 2017, foi *visiting researcher scholar* pela Fulbright Brasil e conduziu parte do seu doutorado no Hospital de Reabilitação Spaulding, afiliado a Harvard Medical School. Pesquisadora do Núcleo de Inovação Tecnológica e Reabilitação (NITRE) e do Grupo de Pesquisa em Dinâmica do Sistema Neuromusculoesquelético (GPDSNME).

[Currículo Lattes](#)

Elaine Cristina Cambuí Barbosa

Possui Graduação em Ciências Biológicas pela Universidade Católica do Salvador (UCSal), Mestrado e Doutorado em Ecologia e Biomonitoramento pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Atualmente é pesquisadora do Núcleo de Inovação Tecnológica em Reabilitação (Nitre-UFBA). Área de atuação está voltada aos estudos com modelagem computacional e sistemas complexos em ecologia.

[Currículo Lattes](#)

José Garcia Vivas Miranda

Possui Graduação em Física pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Mestrado em Física pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) e doutorado em Ciências Ambientais pela Universidad de La Coruña. Atuou como pesquisador em regime de pós-doutoramento em duas ocasiões, na Universidade de La Coruña (ES) e uma vez na Universidade de Harvard (USA). Atualmente, é professor titular do Instituto de Física da UFBA e coordena o grupo de pesquisa Núcleo de Inovação Tecnológica em Reabilitação (Nitre).

[Currículo Lattes](#)

Sobre os(as) autores(as)

Ana Lúcia Barbosa Góes

Possui Mestrado e Doutorado em Medicina e Saúde Humana pela Escola Bahiana de Medicina e Saúde Pública (EBMSP) (2016-2018), Graduação em Fisioterapia pela Universidade Católica do Salvador (UCSal) (1997). Atualmente, é professora adjunta dos cursos de Fisioterapia e Educação Física na EBMSP e professora Adjunta do curso de Fisioterapia na Universidade Federal da Bahia (UFBA), trabalhando com conteúdos que envolvem cinesiologia, biomecânica, estudo e avaliação do movimento humano.

[Currículo Lattes](#)

Ângelo Frederico Souza de Oliveira e Torres

Bacharel e Licenciado em Física pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), trabalha, majoritariamente, com análise complexa de movimentos humanos, compreendendo aprendizado motor, desenvolvimento e aprimoramento de ferramentas computacionais de análise motora e desenvolvimento de índices complexos para análise do movimento. O Mestrado pela UFBA, no Programa de Pós-graduação em Física, foi uma continuidade desses trabalhos, culminando na dissertação de título *Entropia Multiescalar na Avaliação dos Efeitos do Tai Chi Chuan na Progressão da Doença de Parkinson*.

[Currículo Lattes](#)

Bruna Improta de Oliveira Mendonça

Doutoranda em Psicologia pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Mestre em Psicologia pela UFBA, especialista em Gestalt-terapia pelo Instituto de Gestalt Terapia da Bahia (IGTBA) e pela Escola Bahiana de Medicina e Saúde Pública (EBMSP), psicoterapeuta transpessoal em Dinâmica Energética do Psiquismo. Graduada em Psicologia (UFBA). Autora e organizadora do livro *O grupo gestáltico e a clínica de possibilidades*:

tecendo caminhos, além de artigos e capítulos de livros na abordagem e na psicologia, de modo geral. Atualmente, atua como psicoterapeuta individual e de grupos, docente de especializações em gestalt-terapia na Bahia, Sergipe e no Espírito Santo, e coordenadora da especialização em gestalt-terapia infanto-juvenil pela Universidade Jorge Amado (Unijorge). Atuou como docente de cursos de Graduação em Psicologia na Universidade do Estado da Bahia (UNEB), Universidade Salvador (Unifacs) e Universidade Federal da Bahia (UFBA).

[Currículo Lattes](#)

Cecília Bastos da Costa Accioly

Professora Adjunta da Escola de Dança da Universidade Federal da Bahia (UFBA). Pesquisadora do Núcleo de Inovação Tecnológica em Reabilitação (Nitre), e do grupo de pesquisa Políticas e Processos Corporeográficos e Educacionais em Dança (Proceda). Professora permanente do Programa de Pós-graduação Profissional em Dança (Prodan/UFBA). Possui Graduação em Licenciatura em Dança pela Escola de Dança da UFBA (2007); Especialização em Gestão Acadêmica pela Escola de Administração da UFBA; Mestrado em Artes Cênicas pela UFBA (2010) e Doutorado em Artes Cênicas pela UFBA (2014), realizando pesquisas nas áreas de educação em dança e teatro, teorias de currículo, territorialidades e saberes locais, ensino superior, filosofia, artes da cena, neuroestética e cognição. Foi coordenadora do Programa Estadual de Incentivo ao Patrocínio Cultural (FazCultura), da Superintendência de Promoção Cultural da Secretaria de Cultura do Estado da Bahia (Secult-Ba). Foi Visiting Researcher Scholar da Faculty of Education da Simon Fraser University em Vancouver, BC, Canadá, realizando pesquisa sobre *Place-Based Education* and Critical e Pedagogia Crítica e Pós-crítica e atuando como professora assistente do Master of Education. Foi professora substituta do Departamento de Fundamentos do Teatro da Escola de Teatro da Universidade Federal da Bahia. Foi professora da Escola de Dança da Fundação Cultural do Estado da Bahia (Funceb). Foi professora de dança para pessoas com múltiplas deficiências no projeto “Corpo Diferente”, associado ao grupo de pesquisa Dança, Ciência e Comunidade da Escola de Dança da Universidade Federal da Bahia, em parceria com o Instituto Baiano de

Reabilitação (IBR) da Fundação José Silveira e Centro de Prevenção e Reabilitação do Portador de Deficiência (CEPRED) da Secretaria de Saúde do Estado da Bahia (Sesab). É professora de dança, pesquisadora, bailarina, dançarina, coreógrafa e instrutora de pilates.

[Currículo Lattes](#)

Denise Gomes de Castro

Possui Graduação em Matemática pela Universidade Estácio de Sá (2018) e Graduação em Fisioterapia pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) (2018). Pós-graduada em Engenharia Biomédica com Ênfase em Engenharia Clínica pela Universidade Estácio de Sá. Atualmente é mestranda em Mecatrônica pela UFBA e pesquisadora do Núcleo de Inovação Tecnológica em Reabilitação (Nitre).

[Currículo Lattes](#)

Juliana Ocarino

Fisioterapeuta graduada pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), mestre e doutora em Ciências da Reabilitação pela UFMG. Professora do Departamento de Fisioterapia da UFMG. Atualmente, é coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Reabilitação e do Setor de Fisioterapia do Centro de Treinamento Esportivo (CTE/UFMG). Atua nas áreas de movimento humano, biomecânica e fisioterapia esportiva.

[Currículo Lattes](#)

Luciana de Michelis Mendonça

Bacharel em Fisioterapia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) (2003). Mestre e doutora em Ciências da Reabilitação (UFMG-2011 e 2014, respectivamente). Docente do Departamento de Fisioterapia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Reabilitação e Desempenho Funcional da UFVJM no período de 2017-2019. Presidente da Sociedade Nacional de Fisioterapia Esportiva e da Atividade Física (Sonafe) no período de 2016-2017. Diretora da International Federation of Sports Physical Therapy (IFSPT). Atua

nas áreas de fisioterapia esportiva e fisioterapia traumato ortopédica. Suas linhas de pesquisa são: processos de avaliação e intervenção do desempenho motor e funcional humano.

[Currículo Lattes](#)

Marina de Carvalho de Souza

Bacharela em Física pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Mestranda em Psicologia pela UFBA e pesquisadora do Núcleo de Inovação Tecnológica e Reabilitação (Nitre).

[Currículo Lattes](#)

Natalia Franco Netto Bittencourt

Pesquisadora Pós-Doutorado no *VU Medical Center-Amsterdam*. Fisioterapeuta, mestre e doutora em Ciências da Reabilitação pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Professora adjunta no Centro Universitário Uni-BH (Belo Horizonte -MG). Editora associada do *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy* (JOSPT). Coordenadora da Fisioterapia Esportiva do Minas Tênis Clube, no período de 2014-2019. Chief Executive Officer (CEO) do aplicativo Physiotherapy Assessment Tool (Phast).

[Currículo Lattes](#)

Raphael Silva do Rosário

Possui Graduação em Física pela Universidade Estadual de Feira de Santana (UESF) (2011), Mestrado (2013) e Doutorado em Física pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) (2017). Atualmente, é professor da UFBA e atua principalmente na área de neurofísica e sistemas complexos. Tem experiência na área de instrumentação em física, sistemas inteligentes, redes complexas, modelos computacionais e neurociência.

[Currículo Lattes](#)

Rosana de Andrade Sousa

Graduada em Física pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), mestre em Física e atualmente é doutoranda em Física, ambos pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) na área de Física

Estatística e Sistemas Complexos. Já atuou como professora de Física do ensino médio no Colégio Estadual Isaias Alves (Poções-BA) e no Projeto Universidade para Todos, em 2009, na UESB. Atualmente, participa do grupo de Física Estatística e Sistemas Complexos (FESC/UFBA). Interessa-se por modelagem computacional, sistemas complexos e física estatística.

[Currículo Lattes](#)

Sergio Teixeira da Fonseca

Possui Graduação em Fisioterapia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) (1986), Mestrado em Physical Therapy pela University of Alberta (1989) e Doutorado em Applied Kinesiology pela Boston University (1997). Em 2006, concluiu seu estágio Pós-doutoral no Center for the Studies of Perception and Action (CESPA) na Universidade de Connecticut. Sérgio Fonseca é professor titular livre do Departamento de Fisioterapia da UFMG e foi Diretor da Escola de Educação Física, Fisioterapia e Terapia Ocupacional da UFMG de 2013 a 2017. Atualmente, é editor chefe do Brazilian Journal of Physical Therapy, juntamente com os professores Rafael Zambelli e Paula Camargo, e Diretor do Centro de Treinamento Esportivo da UFMG. Possui experiência na área de Fisioterapia, com ênfase em Desempenho Funcional Humano, atuando principalmente nos seguintes temas: estabilidade funcional, biomecânica dos tecidos, reabilitação e prevenção das lesões no esporte e comportamento motor (sistemas dinâmicos e percepção-ação).

[Currículo Lattes](#)

Thiago da Cruz Figueiredo

Possui Bacharelado em Física pela Universidade Estadual de Feira de Santana (UESF) (2011), Mestrado (2013) e Doutorado em Física pela Universidade Federal da Bahia (UFBA) (2019). Realizou também um período sanduíche na Universidade de Tübingen, na Alemanha. Desde 2017, trabalha como cientista de dados na MCM Klosterfrau, onde atua principalmente em integração de dados, modelagem estatística e pesquisa de mercado. Tem experiência em física e estatística e atua nos seguintes temas: sistemas complexos, neuroreabilitação, controle

e aprendizado motor, séries temporais, modelos lineares generalizados, processamento de sinais, aprendizado de máquina. Tem experiência em programação estatística com R e Python.

[Currículo Lattes](#)

Vitor Sotero dos Santos

Fisioterapeuta pela Escola Bahiana de Medicina e Saúde Pública (EBMSP), acupunturista pelo Instituto de Ciências da Saúde/Instituto Mineiro de Acupuntura e Massagens (INCISA/IMAM) e técnico em Mecatrônica pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia Senai-Cimatec. Mestre e doutorando em Mecatrônica pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Professor do curso de Fisioterapia da Universidade Ruy Barbosa. Pesquisador do Núcleo de Inovação Tecnológica em Reabilitação (Nitre) e do Laboratório de Propriedades Óticas (LaPO).

[Currículo Lattes](#)

Analisar o movimento através das lentes da complexidade é importante para enxergarmos a riqueza de informações do sistema musculoesquelético. A quebra de paradigma do pensamento linear na ciência do movimento está acontecendo e nós esperamos que esta obra ajude no processo de transição. Este livro introduz assuntos atuais de forma interdisciplinar, para pessoas que estudam o movimento humano, independentemente da área de formação. O objetivo é introduzir ideias, conceitos e fornecer base para um posterior aprofundamento individual. O que faz desta obra especial é a difusão de um tema novo e importante em língua portuguesa, o conjunto interdisciplinar de autores, com uma linguagem simples e profundidade de conteúdo.



ISBN 978-65-5630-049-8



9 786556 300498