



Dinâmica não-linear e exercício físico: conceitos e aplicações

Antônio Pakenas¹, Tácito Pessoa de Souza Junior² e Benedito Pereira³

RESUMO

Médicos, fisiologistas, bioquímicos, psicólogos e até profissionais envolvidos com exercício físico estão recentemente aumentando seus interesses pela dinâmica não-linear, uma teoria científica desenvolvida principalmente por matemáticos, que é genericamente conhecida por Teoria da Complexidade. Embora poucos trabalhos em Educação Física e Esporte utilizem esse paradigma para solucionar seus problemas, nota-se um crescente interesse por esse mesmo enfoque, principalmente em relação aos efeitos do exercício físico sobre mudanças na variabilidade e complexidade de séries temporais fisiológicas. Geralmente, tais mudanças se revelam na forma de queda em seu comportamento temporal, denotando diminuição na complexidade do organismo ou de componentes envolvidos especificamente na sua regulação. De acordo com a Teoria da Complexidade, por enfatizar interações não-lineares existentes em sistemas biológicos, verifica-se que não é importante apenas a elevação (supercompensação) de componentes do organismo com a prática de exercícios físicos, mas também aqueles que atrofiam (descompensação) paralelamente, porque podem contribuir para a ocorrência de perda de sincronia na funcionalidade desses sistemas. Assim, em oposição à ênfase que se dá no treinamento físico à repetição monótona de atividade física intensa e voltada para efeitos específicos positivos, que invariavelmente leva à simplificação do organismo, recomenda-se maior variação qualitativa e quantitativa nos exercícios praticados. O objetivo é preservar sua complexidade natural ou impedir que ocorra diminuição rápida com o envelhecimento. A presente revisão tem por objetivo, além de descrever a possível perda de complexidade com o treinamento físico, discutir alguns conceitos da Teoria da Complexidade de modo introdutório, com particular ênfase em tópicos envolvendo saúde e desempenho físico.

ABSTRACT

Non-linear dynamics and physical exercise: concepts and applications

Physicians, physiologists, biochemists, psychologists and even professionals involved with physical exercise have been recently increasing their interests for the non-linear dynamics, a scientific theory developed mainly by mathematicians, which is generically known as the Complexity Theory. Although few investigations on

Palavras-chave: Teoria do caos. Especificidade. Desempenho físico e saúde.

Keywords: Fractals. Specificity. Physical fitness and health.

Physical Education and Sports make use of this paradigm to solve their problems, a growing interest for this very approach has been noticed, mainly concerning the effects of physical exercise on changes in the variability and complexity of physiological temporal series. Usually, such changes appear as the decrease in its temporal behavior, denoting in decrease in the body complexity or in the components specifically involved in its regulation. According to the Complexity Theory, since non-linear interactions existing in biological systems are emphasized, it is observed that not only the increase (overcompensation) of the body components with the practice of physical exercises but also those which cause atrophy (decompensation) in parallel, once they can compromise the functionality of these systems. Thus, contrary to the emphasis that is given in the physical training to the monotonous repetition of intense physical activity and with emphasis on positive specific effects, that invariably promote the simplification of the body, larger qualitative and quantitative variation is recommended in the exercise practice. The objective is to preserve its natural complexity or neutralize its rapid decrease with aging. The present review has the objective, besides describing the possible complexity loss with physical training, to discuss some concepts of the Complexity Theory in an introductory way, with particular emphasis on issues involving health and physical training.

INTRODUÇÃO

Faz parte do raciocínio tradicional aplicado à solução de problemas biológicos a tríade mecanicismo, reducionismo e linearização de conjunto de dados⁽¹⁾. O terceiro item sintetiza tais procedimentos, pois significa que mecanismos causais podem explicar fenômenos que, uma vez envolvido com vários fatores, aplica-se a estratégia de fragmentar o sistema em várias partes, com posterior somatório das mesmas⁽²⁾. No caso do desempenho físico, por exemplo, geralmente se aceita a presença de fatores que o limitam ou que promovem o desenvolvimento de fadiga, por exemplo⁽³⁻⁴⁾. Hoje existem descritos tantos fatores relacionados com fadiga que praticamente nenhum pode ser excluído. O único jeito disponível para explicá-la é somando os efeitos promovidos por cada fator investigado.

Mais especificamente sobre a linearização de dados, verifica-se ainda hoje o uso de termos retratando essa forma de pensar como equilíbrio, homeostase ou *steady state* aplicados ao organismo vivo. O conceito de homeostase será mais bem discutido abaixo. Por enquanto, geralmente seus precursores afirmam que, após qualquer distúrbio ocorrido, um sistema tende a restabelecer o *steady state*, e um sistema também pode desenvolver outro tipo de *steady state*, se e quando o distúrbio externo for prolongado⁽⁵⁾. A vida, desta forma, torna-se parte de uma sucessão de *steady states*, uma batalha para manter constantemente certo balanço entre estresse e um distúrbio sofrido⁽⁶⁾. Contudo, é aceito atualmente que o ponto de vista linear só é correto e aplicável a

1. Mestrando do Programa de Pós-graduação em Biodinâmica da Escola de Educação Física e Esporte, Universidade de São Paulo. E-mail: nldynbioefe@usp.br

2. Professor Doutor da Universidade Metropolitana de Santos, Faculdade de Educação Física, UNIMES-FEFIS. E-mail: tacitojr@terra.com.br

3. Professor Doutor da Escola de Educação Física e Esporte, Departamento de Esporte, Universidade de São Paulo. E-mail: benepe@usp.br
Aceito em 27/2/07.

Endereço para correspondência: Prof. Dr. Benedito Pereira, Av. Prof. Melo Moraes, 65, Cidade Universitária, Butantã – 05508-900 – São Paulo, SP. Tel./fax: (11) 3091-3120. E-mail: benepe@usp.br

sistemas simples e próximos do equilíbrio, o que de fato não se aplica ao organismo vivo⁽⁵⁾.

Um aspecto essencial dos organismos que justifica a crítica prévia é sua extraordinária complexidade. Deve-se levar em conta, na definição de complexidade, o grande número de estruturas e processos que interagem não linearmente por mecanismos de realimentação, com a possibilidade de emergência de outras funções, assim como de comportamentos muitas vezes inesperados⁽⁶⁾. Dada essa problemática, médicos, fisiologistas, bioquímicos, psicólogos e até profissionais envolvidos com exercício físico estão recentemente aumentando seus interesses por essa nova maneira de pensar, que é derivada da Teoria da Complexidade⁽⁷⁻⁸⁾.

São exemplos de processos emergentes, dentre outros, fenômenos relacionados com as noções de não-estacionaridade (o fato de o espectro de frequências de um sinal variar ao longo do tempo) e não-linearidade, típicas dos sinais mensurados de variáveis tanto fisiológicas como metabólicas, durante o repouso ou exercício físico. No último caso, o interesse tem-se voltado principalmente na compreensão do significado de mudanças ocorridas na variabilidade e complexidade dessas variáveis⁽⁹⁻¹¹⁾. O objetivo desta revisão é estabelecer quais os avanços que podem ser obtidos com o uso desta teoria em relação à prática do exercício físico, haja vista que o assunto tem sido discutido por um número limitado de profissionais dessa área⁽¹²⁾. Para tanto, abordam-se os seguintes conceitos: homeodinâmica, não-linearidade e fractais⁽¹³⁻¹⁵⁾. Além disso, objetiva-se propor e justificar a importância da prática de exercícios físicos com conteúdo variado em termos tanto qualitativos como quantitativos, no sentido de preservar ou aprimorar a complexidade inerente ao organismo humano.

HOMEOSTASE E HOMEODINÂMICA

Um dos primeiros passos para a compreensão do significado de complexidade biológica é o contraste entre homeostase e homeodinâmica. Está implícito no conceito de homeostase que sistemas fisiológicos operam normalmente com o intuito de reduzir a variação e manter, assim, a constância das funções internas do organismo⁽¹⁶⁻¹⁷⁾. Depreende-se disso que qualquer variável fisiológica deve retornar ao seu estado normal após ser modificada por estímulos ambientais, como o exercício físico. O princípio da homeostase impõe, dessa forma, que variações metabólicas ou fisiológicas são meramente respostas transitórias às flutuações promovidas por estímulos⁽¹⁸⁻²⁰⁾.

Alguns aspectos clínicos e fisiológicos descobertos recentemente sobre o comportamento temporal de variáveis fisiológicas, como a frequência cardíaca, inviabilizam a utilização da homeostase como paradigma fisiológico. De fato, tomemos como exemplo a frequência cardíaca de quatro indivíduos, mensurada e colocada em gráfico apropriado. Imaginemos, também, que somente um deles seja saudável; os restantes são pacientes que possuem algum tipo de problema cardíaco. Para identificar o registro normal, médicos utilizam a comparação entre médias e desvios-padrão de dois ou mais indivíduos. Contudo, pode-se não detectar, por meio desse procedimento, qualquer diferença no comportamento dessa variável, porque os indivíduos podem demonstrar, por exemplo, média e desvios-padrão idênticos, sugerindo inexistência de problema clínico⁽²¹⁻²³⁾.

O procedimento sozinho também não funciona porque a interpretação de resultados utilizando esse tipo de análise não leva em conta a não-linearidade inerente a essa variável fisiológica⁽²⁴⁻²⁷⁾. Sistemas não-lineares, como é o caso dos mecanismos que regulam a variação da frequência cardíaca, comportam-se em desequilíbrio em condições normais⁽⁹⁾, sendo que essa característica apresentada por sinais biológicos foi denominada homeodinâmica por Lloyd *et al.*⁽¹⁶⁾ e Yates⁽¹⁷⁾. Recomendou-se, em função disso, a análise contínua dessas variáveis, ao invés de se basear somente em valores médios ou desvios-padrão⁽²⁷⁾.

Alguns fatos justificam essa proposta: a) a resposta de organismos saudáveis pode revelar variações prováveis de levar o organismo a suportar demandas ambientais que não são, até o momento, conhecidas, e que necessitam de interações não-lineares entre os componentes orgânicos; b) a característica fractal de alguns componentes ou variáveis orgânicos parece degradar-se com a doença e a idade, reduzindo a capacidade de ajuste do organismo ao seu ambiente (o conceito fractal será abordado mais adiante); c) em vários sistemas, a queda na complexidade da resposta corresponde ao isolamento de seus componentes^(23,28). Ou seja, com o tempo ou devido às influências dos estímulos ambientais, partes do sistema diminuem a capacidade de se comunicarem entre si.

Está presente nestes itens a sugestão de que organismos saudáveis possuem eficiência na comunicação entre as suas partes e processos e que a mesma pode estar prejudicada na doença⁽²¹⁻²³⁾. Assim, tanto a noção de homeostase como análises baseadas em estatística descritiva parecem não ser suficientes ou até mesmo adequadas no estudo das características de sistemas não-lineares, o que será mais bem explicado a seguir.

SISTEMAS LINEARES E NÃO-LINEARES

Duas propriedades importantes de sistemas lineares são: proporcionalidade e superposição⁽²⁵⁻²⁷⁾. Proporcionalidade significa que a resposta e o estímulo possuem, num par ordenado, comportamento linear. Superposição sugere que o comportamento de um sistema linear composto por múltiplos componentes pode ser totalmente compreendido e previsto pelo estudo isolado dos mesmos. Nessa análise, a resposta total será reconhecida simplesmente pelo somatório das partes constituintes.

Mesmo sistemas não-lineares simples, entretanto, violam o princípio da proporcionalidade. Um exemplo é o sistema representado pela equação $y = a \cdot x \cdot (1 - x)$, conhecida na Biologia de Populações como equação logística^(19,26). A não linearidade dessa equação, que descreve uma parábola, também evidente na curva de rendimento físico⁽²⁹⁾, resulta do termo x^2 . Nesta equação, se houver a implementação de um procedimento de realimentação [$x_{i+1} = a \cdot x_i \cdot (1 - x_i)$] em que um valor corrente da resposta é usado como valor do estímulo da próxima solução da equação, então (e dependendo do valor do parâmetro a) a solução dessa equação simples na forma pode revelar uma dinâmica desprovida de qualquer previsão aparente observando o gráfico, mas perfeitamente prevista pela regra aplicada⁽¹⁹⁾. No caso dos organismos, por exemplo, a proporcionalidade não se aplica, porque pequenas mudanças nos parâmetros ou condições iniciais de funcionalidade de variáveis fisiológicas podem resultar em efeitos amplos e imprevisíveis⁽¹⁶⁻¹⁷⁾.

Outro fator que se adiciona a essa análise é a impossibilidade de compreensão de sistemas compostos por múltiplos componentes pelo estudo de partes isoladas (superposição)⁽³⁰⁻³²⁾. Essa estratégia falha, porque os componentes de um sistema não-linear interagem⁽²⁶⁾ de um modo que, se um subsistema A , por exemplo, pode influenciar o comportamento de um subsistema B e vice-versa, além de serem influenciados por outros componentes não citados ou não conhecidos, é difícil reconhecer uma relação causa-efeito entre eles⁽³³⁻³⁴⁾.

A discussão acima é justificada pelo fato de haver, numa coleta de dados, uma série de procedimentos que visam transformar um sinal biológico em funções que aceitem a superposição⁽³⁵⁻³⁷⁾. O sinal é normalmente captado na forma de símbolos (de fato, números que não têm qualquer outro significado que não seja numérico; a matemática não tem qualquer relação com o mundo físico: pesquisadores é que atribuem isso a ela) que, uma vez registrado por equipamento projetado para tanto, expressa as trocas de informação e energia que ocorrem entre as partes componentes do organismo no intervalo de tempo da mensuração⁽³⁸⁻³⁹⁾. Denomina-se modelo de dados a análise dos sinais captados com

o objetivo de caracterizar uma estrutura do mundo físico, tais como o músculo cardíaco (eletrocardiograma), cérebro (eletroencefalograma) ou músculo esquelético (eletromiografia), sem que o tipo de estrutura investigada interfira na análise⁽³⁹⁾.

Os modelos de dados descritos antes são também conhecidos na Fisiologia por séries temporais. Portanto, apesar da complexidade que caracteriza cada organismo humano e a singularidade de seus constituintes, pode ser encontrado certo grau de regularidade no comportamento de suas variáveis. Essa afirmação será explicada quando discutirmos o termo fractal. Há ainda o denominado modelo de sistemas (ou sistema modelo), que procura pela presença de uma entidade concreta responsável pela variação observada (de fato, diagramas ou blocos que representem os estímulos e as respostas de cada subsistema concebido pelo pesquisador). Neste modelo, essa entidade pode representar estruturas redundantes (estruturas idênticas realizando a mesma função⁽⁴⁰⁾) ou degeneradas (estruturas diferentes realizando a mesma função⁽⁴¹⁾), além de mecanismos de realimentação.

Apesar de o estudo isolado dessa entidade render algumas soluções (como no caso das pesquisas sobre o *turnover* ou *clearance* de substâncias), surgem também muitos problemas, pois, quando os componentes sistêmicos são individualizados, é destruída a principal característica dos sistemas complexos: a cooperação entre as partes⁽⁴²⁾. A entidade concreta por trás da variação do sinal não pode, dessa forma, ser analisada (isto é, dividida em partes) sob o ponto de vista semântico do termo; deve, preferivelmente, ser tratada a partir de conceitos e teorias que possam levar em consideração a complexidade do sistema – no caso, o interesse recai sobre o ser humano. Tais conceitos e teorias deveriam, ainda, tornar obsoleta a tarefa de montar um quebra-cabeça, possivelmente inacessível à capacidade humana, que levasse em consideração as mínimas diferenças entre os vários subsistemas do organismo para justificar as disparidades entre os vários sinais biológicos ao longo do tempo⁽⁴³⁾.

GEOMETRIA FRACTAL E ORGANIZAÇÃO AUTO-SIMILAR

Séries temporais, como as exemplificadas acima, consideram registros de dados de variáveis levando-se em conta a possibilidade de existência de escala no espectro obtido. Além disso, cada vez que o experimento é conduzido, as séries temporais podem ser diferentes, principalmente se exibirem comportamento caótico⁽⁴⁴⁾. O ponto essencial é a consideração de que, nesta análise há a possibilidade de presença de informações sobre a funcionalidade dos componentes do sistema⁽⁴³⁻⁴⁴⁾. Nos sistemas que exibem regularidade estrutural ou funcional em suas variáveis e que demonstram lei de potência com ausência de escala típica, o padrão de distribuição temporal dos dados obtidos demonstra dimensão fracionada (fractal).

Curiosamente, foi descrito e extensamente discutido recentemente por Garcia-Manso *et al.*⁽⁴⁵⁾ que corredores de longa e média distância, quando a velocidade média em uma dada distância é tomada, ou o tempo gasto para cobrir essa distância, encontram-se lei de potência do seguinte tipo: $v = cd^{-\alpha}$; em que o valor da constante (c) ou do expoente varia com a condição física ou o tempo de treinamento do atleta; d representa a distância percorrida. Fenômenos desse tipo puderam ser vistos em cada grupo de atletas independente das características individuais e não demonstram escala definida, no sentido de que, com a mudança de escala, não se verificou alteração estatística na resposta. É reconhecido atualmente que em fenômenos que apresentam esse tipo de comportamento há presença de fenômenos críticos, em que um pequeno estímulo estressante pode induzir ao sistema uma mudança drástica de comportamento. Esse significado para o desempenho físico ainda precisa ser estabelecido.

Fractais podem aparecer por diversas razões e de forma imprevisível: em dinâmicas caóticas, processos de crescimento ou evo-

lução, e assim por diante. Fractais podem ser categorizados em dois diferentes grupos: objetos sólidos e atratores estranhos. O primeiro tipo inclui objetos físicos que existem no espaço físico⁽⁴³⁻⁴⁴⁾. O segundo, por outro lado, relaciona-se com objetos conceituais que existem no espaço de fase de sistemas caóticos dinâmicos. Se o registro do sinal de variáveis fisiológicas revelar comportamento caótico, estarão inseridas no segundo exemplo. Para identificar comportamento caótico em séries temporais é preciso utilizar procedimentos que não serão descritos aqui.

Segundo Melendez *et al.*⁽⁴⁶⁾, uma estrutura do mundo físico com característica fractal de construção mostra repetições do mesmo fator iniciador. Assim, os termos que definem o processo de construção na geometria fractal são os de auto-referência e auto-similaridade, porque a estrutura deve ter geralmente a mesma aparência, independentemente da escala de medida em que é observada, e deve ser determinada pela iteração de certo algoritmo (conjunto de instruções)⁽⁴⁶⁻⁴⁹⁾.

Para se compreender a geometria fractal, deve-se recordar inicialmente que as formas geométricas clássicas têm dimensões integras (1, 2 e 3, respectivamente para a linha, superfície e volume), enquanto as fractais têm dimensão fracionada. Isso não quer dizer que uma estrutura fractal tridimensional deixa de ocupar três dimensões no espaço; o conceito de dimensão fracionada é apenas um meio mais preciso para se calcular a superfície ou volume da estrutura⁽⁵⁰⁾.

Grande variedade de estruturas possui essa característica, incluindo árvores, brócolis, couve-flor, formações de coral, costa marítima e montanhas. No organismo, certo número de estruturas pulmonares, artérias e veias, dentre outras, também possuem formato semelhante⁽⁵¹⁻⁵²⁾. Do ponto de vista mecanicista, essas estruturas orgânicas auto-similares espacialmente distribuídas podem favorecer a comunicação rápida e eficiente entre componentes sistêmicos, como, por exemplo, o sistema circulatório, respiratório e digestório⁽⁵²⁾. Além disso, o conceito de fractal também pode servir a certos modelos de dados⁽⁷⁾, já que os sinais captados podem demonstrar flutuações que seguem um algoritmo mais ou menos constante (por exemplo, variáveis fisiológicas). A apreciação quantitativa da natureza auto-similar de processos fisiológicos pode ser obtida colocando-se em gráfico suas flutuações em diferentes resoluções temporais, como no caso da frequência cardíaca de indivíduos saudáveis e não-saudáveis sob três escalas de tempo⁽¹⁹⁾.

Assim, o uso de um número limitado de algoritmos que possibilitem o aparecimento de comportamentos complexos parece valer para muitos processos e estruturas, com possível aplicação da geometria fractal na análise da variabilidade dos sinais. Por exemplo, já foram constatadas flutuações caracteristicamente fractais na pressão sanguínea sistêmica, ritmo da caminhada, número de células brancas, cinética de transportadores de certos íons, frequência cardíaca e consumo de oxigênio⁽²⁵⁾. À medida que novos experimentos forem confirmando as afirmações anteriores, podem-se generalizar as conseqüências a respeito do que aconteceria ao organismo, se passasse a se comportar de maneira extremamente fortuita ou monótona: ocorrência de quebra de estruturas e processos resultando em doença (p. e., câncer) ou estresse duradouro⁽⁵²⁾.

Nota-se, em função disso, um paradoxo na aplicação da geometria fractal na análise de doenças, pois uma grande quantidade delas é marcadamente associada ao comportamento periódico de suas variáveis, apesar de serem qualificadas como desordens⁽²¹⁻²³⁾. Além disso, o aparecimento de dinâmica periódica em muitos estados de doença tem sido relacionado com perda de complexidade.

Haveria uma possível perda de complexidade orgânica e celular pelos procedimentos de prática de exercício físico que visam à obtenção imediata de rendimento pela especialização precoce ou mesmo a prática diária com repetição monótona de atividade fisi-

ca, estimulando apenas alguns poucos componentes do organismo? Existem evidências indicando isso^(12,29,47,53). Além disso, nos trabalhos previamente citados, há vários exemplos de perda ou insensibilização de componentes orgânicos e celulares nestas condições. Outros exemplos incluem modificações na variabilidade ou regularidade da frequência cardíaca devido ao *overtraining*⁽⁵⁴⁾. Outros exemplos serão descritos abaixo.

A característica primária dos organismos, portanto, prevista e explicada pela Teoria da Complexidade, é o comportamento de variáveis internas de maneira irregular, devido à ocorrência de interações entre seus componentes, além de possíveis efeitos ambientais. De acordo com achados da geometria fractal comentados acima, essas interações constantes entre componentes sistêmicos ocorrem por meio de conexões que se aplicam em todas as escalas de espaço ou tempo⁽⁴⁰⁾.

Deve-se considerar, em função disso, que à adição de estruturas e processos que o exercício físico venha a supercompensar, há necessidade constante de se respeitar a complexidade inerente aos processos orgânicos e celulares, principalmente no sentido de propiciar, por esta prática, melhores condições para que ocorram interações adequadas entre estes. Ressaltamos que os procedimentos de prática esportiva ou de atividade física seguindo o paradigma atual, que invariavelmente conduzem à especialização, impossibilita que isso ocorra, favorecendo na verdade o surgimento de dinâmica anormal entre os componentes e processos do organismo, definida por estudiosos da complexidade como doença dinâmica^(15,44).

Um exemplo recente da importância de o organismo apresentar-se com dinamismo intracelular íntegro ou em faixa de interação maior, pode ser retirado de estudos antropológicos envolvendo africanos, afro-americanos e escandinavos. A constituição fisiológica de negros da África Oriental, por exemplo, quenianos e etíopes, apresentando maior interação entre as capacidades aeróbia e anaeróbia do que escandinavos ou afro-americanos, sugere que o sucesso esportivo em atividades prolongadas se relaciona mais com o equilíbrio dinâmico que existe no organismo desses atletas do que com suas capacidades aeróbias superiores⁽⁵⁵⁾. Como consequência, conseguem treinar com grandes volumes, mas também com ritmos mais intensos relativamente aos seus oponentes de outras raças, porque demonstram maiores concentrações sanguíneas de lactato e as suportam por mais tempo que o normal.

Assim, pode-se prever, em função do que foi dito acima, que a estrutura em forma de rede de conexões fisiológicas e bioquímicas pode ser alterada quando o treinamento físico se baseia nos princípios da sobrecarga e especialização. O que, de acordo com o exposto, é prejudicial ao organismo. Isso porque é possível que o controle dos processos interativos exercido pelos sistemas endócrino, imunitário, comportamental e sistema nervoso autônomo, responsáveis pela manutenção das variáveis fisiológicas e bioquímicas em dinamismo variado constante, esteja prejudicado por esse procedimento.

Quanto ao sistema endócrino, existem evidências, por exemplo, de que as concentrações plasmáticas de hormônios como a testosterona estão reduzidas com o exercício contínuo intenso e prolongado⁽⁵⁶⁾; é razoavelmente bem sabido que o exercício intenso provoca modificações negativas na funcionalidade do sistema imunitário⁽⁵⁷⁾; o contrário ocorre com o exercício a 50% do $\dot{V}O_{2MAX}$; receptores β -adrenérgicos no tecido muscular e no tecido adiposo são insensibilizados progressivamente com o treinamento físico⁽⁵⁸⁾ e, além disso, atletas apresentam modificações no comportamento com o treinamento excessivo⁽⁵⁹⁾.

MANUTENÇÃO DA COMPLEXIDADE: SAÚDE E RENDIMENTO FÍSICO

Do exposto, pode-se afirmar que, quando um sistema se torna muito previsível, já que repete monotonamente sua atividade, sua

resposta não atende às demandas ambientais; como visto antes, isso é reflexo de sua perda progressiva de complexidade. Esse padrão de comportamento também se verifica nos parâmetros de certas doenças, já que aquelas estudadas são caracterizadas por marcante queda na complexidade relativamente ao estado saudável. Em outras palavras, os sistemas fisiológicos tornam-se menos ajustados ou ajustáveis, impondo restrições à sua capacidade em lidar com as constantes mudanças ocorridas no meio ambiente⁽⁶⁰⁾. Além disso, para gerar informação ou interpretar estímulos, um sistema precisa ser capaz de comportar-se de maneira não previsível, porque um sinal repetitivo não possui informação que já não seja conhecida, ou seja, torna-se redundante.

Quanto a esse tema, apesar de pouco considerado por profissionais do exercício físico, verifica-se mais recentemente o oposto, principalmente no que diz respeito à variação da frequência cardíaca, que se encontra grandemente reduzida no exercício físico intenso⁽¹⁰⁾. Foi constatada em alguns casos, mesmo que sem importância epidemiológica, até mesmo a possível ocorrência de problemas sérios como morte súbita⁽⁶¹⁾. Contudo, a geometria fractal ensina-nos que um comportamento fisiológico pode ser muito variado e simples e, ao contrário, pouco variado e complexo^(19,21). Portanto, a queda na variabilidade de séries temporais fisiológicas e a perda de complexidade não são sinônimas. Pesquisas adicionais são necessárias para se estabelecer a possível perda de complexidade do tipo fractal nessas variáveis com o treinamento ou exercício físico⁽⁶¹⁾.

Yun *et al.*⁽⁶⁰⁾ sugeriram que o declínio progressivo na amplitude de variação dos estímulos ambientais a que os organismos são submetidos diariamente, pode contribuir para disfunções na saúde e, ao contrário, que a expansão nessa amplitude por meio de possíveis estratégias, como o exercício físico, pode ser benéfica. Os autores realçam que três diferentes sistemas como o endócrino, autonômico e músculo-esquelético podem sofrer efeitos negativos, em virtude dessa perda de variação na estimulação ambiental.

Com relação à atividade física, foi descrito que a queda na sua variação como o estresse ambiental propiciado pelas sociedades modernas, devido ao novo estilo de vida que nos oferecem, pode reduzir a amplitude da dinâmica do sistema nervoso autônomo. O resultado esperado é a possível queda na variação da frequência cardíaca e na funcionalidade de vários sistemas orgânicos. Desse modo, recomenda-se que o exercício físico, ao ativar o sistema nervoso autônomo, poderia contribuir positivamente para a preservação dessa importante função fisiológica. Entretanto, mesmo com sua prática, pode ocorrer em longo prazo a repetição monótona de exercícios padronizados, resultando em benefícios pouco evidentes para esse sistema quanto à sua complexidade, como exemplificado acima⁽⁶²⁾.

CONCLUSÕES

As interações existentes entre componentes sistêmicos que ocorrem por meio de conexões que se aplicam em todas as escalas de espaço ou tempo no organismo podem estar reduzidas com a especialização esportiva ou a prática repetitiva de exercício padronizado. A simplificação da funcionalidade do organismo, de acordo com a Teoria da Complexidade, é importante fator a ser considerado no estudo da barreira de rendimento físico; portanto, é imprescindível que o treinamento seja variado, tanto qualitativa quanto quantitativamente, previamente a aplicações de cargas específicas de treinamento. Há um problema grave denominado por especialização esportiva precoce, mas nenhuma proposta adequada quanto a solucioná-lo. A variação de experiências motoras também é enfatizada na área esportiva, mas sem conhecimento teórico disponível. Acreditamos que a Teoria da Complexidade pode ajudar a tornar a proposta da variação de experiências motoras e de sobrecargas no início do processo de treinamento (evitando

com isso a especialização precoce), de maneira mais científica e menos folclórica. Assim, conclui-se que a variação do treinamento poderia exercer um efeito minimizador na barreira do rendimento físico.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

REFERÊNCIAS

- Gleria I, Matsushita R, Da Silva S. Sistemas complexos, criticalidade e leis de potência. *Rev Bras Ens Fis.* 2004;26:99-108.
- Hudson CG. At the edge of chaos: a new paradigm for social work. *J Social Educ.* 2000;36:215-30.
- Noakes TD, St Claire Gibsom A, Lambert EV. From catastrophe to complexity: a novel model of integrative central neural regulation of effort and fatigue during exercise in humans: summary and conclusions. *Br J Sports Med.* 2005;39:120-4.
- Lambert EV, St Claire Gibson, Noakes TD. Complex systems model of fatigue: integrative homeostatic control of peripheral physiological systems during exercise in humans. *Br J Sports Med.* 2005;39:52-62.
- Recordati G, Bellini TG. A definition of internal constancy and homeostasis in the context of non-equilibrium thermodynamics. *Exp Physiol.* 2004;89:27-38.
- Burggren WW, Monticino MG. Assessing physiological complexity. *J Exp Biol.* 2005;208:3221-32.
- Goldberger AL, Rigney DR, West BJ. Chaos and fractals in human physiology. *Sci Am.* 1990;262:42-9.
- Holden A. Nonlinear science – the impact of biology. *J Franklin Inst.* 1997;334B:971-1014.
- Francis DP, Willson K, Georgiadou P, Wensel R, Davies LC, Coats A, et al. Physiological basis of fractal complexity properties of heart rate variability in man. *J Physiol.* 2002;542:619-29.
- Javorka M, Zila I, Balharek T, Javorka K. Heart rate recovery after exercise: relations to heart rate variability and complexity. *Braz J Med Biol Res.* 2002;35:91-100.
- Wesfreid E, Billat VL, Meyer Y. Multifractal analysis of heartbeat time series in human races. *App Comp Harm An.* 2005;18:329-35.
- Pereira B, Souza Junior TP. Compreendendo a barreira de rendimento físico. 1ª ed. São Paulo: Phorte; 2005.
- Seely AJE, Macklem PT. Complex systems and the technology of variability analysis. *Crit Care.* 2004;8:R326-84.
- Aubert AE, Seps B, Beckers F. Heart rate variability in athletes. *Sports Med.* 2003;33:889-919.
- Glass L. Nonlinear dynamics of physiological function and control. *Chaos.* 1991;1:247-50.
- Goldberger AL, Peng C-K, Lipsitz LA. What is physiologic complexity and how does it change with aging and disease? *Neurobiol Aging.* 2002;23:23-6.
- Goldberger AL. Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractals, and complexity at the bedside. *Lancet.* 1996;347:1312-4.
- Kyriazis M. Practical applications of chaos theory to the modulation of human ageing: nature prefers chaos to regularity. *Biogerontology.* 2003;4:75-90.
- Lipsitz LA. Age-related changes in the complexity of cardiovascular dynamics: a potential marker of vulnerability to disease. *Chaos.* 1995;5:102-9.
- Lipsitz LA. Dynamics of stability: the physiologic basis of functional health and frailty. *J Gerontol.* 2002;57A:B115-B25.
- Goldberger AL. Complex systems. *Proc Am Thor Soc.* 2006;3:467-71.
- Lloyd D, Aon MA, Cortassa S. Why homeodynamics, not homeostasis? *The Scientific World Journal.* 2001;1:133-45.
- Yates FE. Order and complexity in dynamical systems: homeodynamics as a generalized mechanics for biology. *Math Comp Model.* 1994;19:49-74.
- Pincus SM. Greater signal regularity may indicate increased system isolation. *Math Biosci.* 1994;122:161-81.
- Goldberger AL. Fractal variability *versus* pathologic periodicity: complexity loss and stereotypy in disease. *Perspect Biol Med.* 1997;40:543-61.
- Liebowitch LS, Scheurle D. Two lessons from fractals and chaos. *Complexity.* 2000;5:34-43.
- Pincus SM, Goldberger AL. Physiological time-series analysis: what does regularity quantify? *Am J Physiol.* 1994;266:H1643-56.
- Glass L, Mackey MC. From clocks to chaos. The rhythms of life. New Jersey: Princeton University Press; 1988.
- Pereira B. Função das atividades motoras variadas para o rendimento físico: aspectos bioquímicos. *Rev Paul Ed Fis.* 1995;9:147-63.
- Adami C. What is complexity? *BioAssays.* 2002;24:1085-94.
- Stelling J, Sauer U, Szallasi Z, Doyle FJ, Doyle J. Robustness of cellular functions. *Cell.* 2004;118:675-85.
- Aon MA, Cortassa S, Lloyd D. Chaotic dynamics and fractal space in biochemistry: simplicity underlies complexity. *Cell Biol Int.* 2000;24:581-7.
- Bernard-Weil E. Pathological homeostasis: its meaning, its inferences. *Med Hypotheses.* 1997;53:24-31.
- Bunge M. Levels and reduction. *Am J Physiol.* 1977;233:R75-82.
- Garfinkel A. Mathematics for physiology. *Am J Physiol.* 1983;245:R4555-66.
- Higgins JP. Nonlinear systems in medicine. *Yale J Biol Med.* 2003;75:247-60.
- Barry DT. Basic concepts of electricity and electronics in clinical electromyography. *Muscle Nerve.* 1991;14:937-46.
- Elbert T, Ray WJ, Kowalik ZJ, Skinner JE, Graf KE, Birbaumer N. Chaos and physiology: deterministic chaos in excitable cell assemblies. *Physiol Rev.* 1994;74:1-47.
- Distefano JJ, Landaw EM. Multiexponential, multicompartmental, and noncompartmental modeling. I. Methodological limitations and physiological interpretations. *Am J Physiol.* 1984;246:R651-64.
- Edelman GM, Gally JA. Degeneracy and complexity in biological systems. *Proc Natl Acad Sci.* 2001;20:13763-8.
- Tononi G, Sporns O, Edelman GM. Measures of degeneracy and redundancy in biological networks. *Proc Natl Acad Sci USA.* 1999;96:3257-62.
- Haken H. Operational approaches to complex systems: an introduction. In: *Complex systems – operational approaches in neurobiology, physics, and computers.* Editor: Haken, H. Berlin: Springer-Verlag; 1985. V. 31, p. 1-13.
- Dokoumetzidis A, Iliadis A, Macheras P. Nonlinear dynamics and chaos theory: concepts and applications relevant to pharmacodynamics. *Pharmac Res.* 2001;18:415-26.
- Savi MA. Chaos and order in biomedical rhythms. *J Braz Soc Mech Eng.* 2005;27:157-68.
- Garcia-Manso JM, Martín-González JM, Dávila N, Arriaza E. Middle and long distance athletics viewed from the perspective of complexity. *J Theor Biol.* 2005;233:191-8.
- Melendez R, Melendez-Hevia, E, Canela EI. The fractal structure of glycogen: a clever solution to optimize cell metabolism. *Biophys J.* 1999;77:1327-32.
- Heymans O, Fissette J, Vico P, Blancher S, Masset D, Brouers F. Is fractal geometry useful in medicine and biomedical sciences? *Med Hypotheses.* 2000;54:360-6.
- Weibel ER. Fractal geometry: a design principle for living organisms. *Am J Physiol.* 1991;261:L361-9.
- Mutch WAC, Lefevre GR. Health, small-words, fractals and complex networks: and emerging field. *Med Sci Monit.* 2003;9:MT55-9.
- Mandelbrot BB. The fractal geometry of nature. New York: Wh Freeman; 1982.
- Tsonis AA, Tsonis PA. Fractals: a new look at biological shape and patterning. *Perspect Biol Med.* 1987;30:355-61.
- Cross SS. Fractals in pathology. *J Pathol.* 1997;182:1-8.
- Pereira B, Souza Junior TP. Dimensões biológicas do treinamento físico. 1ª ed. São Paulo: Phorte; 2002.
- Mourot L, Bouhardi M, Perrey S, Cappelle S, Henriot M-T, Wolf J-P, et al. Decrease in heart rate variability with overtraining: assessment by the Poincaré plot analysis. *Clin Physiol Funct Imag.* 2004;24:10-8.
- Myburgh KH. What makes an endurance athlete world-class? Not simply a physiological conundrum. *Comp Biochem Physiol.* 2003;136:171-90.
- Maimoun L, Lumbroso S, Manetta J, et al. Testosterone is significantly reduced in endurance athletes without impact on bone mineral density. *Horm Res.* 2003;59:285-92.
- Smith LL. Cytokine hypothesis of overtraining: a physiological adaptation to exercise stress. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32:317-31.
- Marion-Latard F, De Glisezinski I, Crampes F, Berlan M, Galitzky J, Suljkovicova H, et al. A single bout of exercise induces β -adrenergic desensitization in human adipose tissue. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol.* 2001;280:R166-R173.
- Petibois C, Cazorla G, Poortmans JR, Deléris G. Biochemical aspects of overtraining in endurance sports. *Sports Med.* 2002;32:867-78.
- Yun AJ, Bazar KA, Gerber A, Lee PY, Daniel SM. The dynamic range of biologic functions and variation of many environmental cues may be declining in the modern age: implications for diseases and therapeutics. *Med Hypotheses.* 2005;65:173-8.
- Billat VL, Wesfreid E, Kapfer C. Nonlinear dynamics of heart rate and oxygen uptake in exhaustive 10,000 m runs: influence of constant vs. freely paced. *J Physiol Sci.* 2006;56:103-11.
- Nakamura Y, Yamamoto Y, Muraoka I. Autonomic control of heart rate during physical exercise and fractal dimension of heart rate variability. *J Appl Physiol.* 1993;74:875-81.