

DIMENSÃO FRACTAL DA FORÇA DE TRACÇÃO DURANTE A PUXADA NA BARRA: MÉTODOS NOS DOMÍNIOS DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

R. S. L. Mattos^{*,**}, R. G. T. Mello^{*,**} e J. Nadal^{*}

^{*}Programa de Engenharia Biomédica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro

^{**}Departamento de Educação Física e Esportes (DEFE), Escola Naval, Marinha do Brasil
e-mail: rslm@yahoo.com.br

Resumo: O termo dimensão fractal (*DF*) é utilizado para descrever a estrutura e a irregularidade de objetos encontrados na natureza. Diversos métodos têm sido empregados para estimar a *DF* de séries temporais. A dimensão fractal do sinal da força de tração durante o exercício de puxada na barra fixa foi calculada nos domínios do tempo e frequência, usando a *detrended fluctuation analysis* (DFA) e a função *power spectral density* (PSD), respectivamente, sendo então usada como um parâmetro para prever o desempenho do exercício. Participaram do estudo 15 indivíduos saudáveis e bem condicionados do sexo masculino, com idade $22,2 \pm 2,5$ anos, massa $77,7 \pm 9,7$ kg e estatura $1,75 \pm 0,9$ m, (média \pm desvio padrão), provenientes do corpo de aspirantes da Escola Naval. A análise estatística mostrou que a *DF* obtida pelo método PSD não apresentou correlação significativa com o desempenho ($r = 0,16$; $p = 0,59$), enquanto a *DF* por DFA apresentou correlação negativa significativa ($r = -0,71$; $p < 0,005$). Logo, o desempenho no exercício foi melhor representado pelo método DFA, pelo qual a *DF* pode constituir um índice de desempenho do exercício.

Palavras-chave: Controle motor, dimensão fractal, sinal de força de tração.

Abstract: Fractal dimension (FD) describes both the structure and the irregularity of objects found in nature. Several methods have been proposed to estimate FD in time series. The FD of the traction force signal during the chin-up bar exercise was calculated in the time and frequency domains, using respectively the *detrended fluctuation analysis* (DFA) and the *power spectral density* (PSD), and employed to predict exercise performance. The study included 15 healthy, well-conditioned males, aged 22.2 ± 2.5 years, body mass 77.7 ± 9.7 kg and height 1.75 ± 0.9 m (mean \pm standard deviation), midshipmen of the Brazilian Naval Academy. Statistical analysis showed that the FD obtained with PSD method has no significant correlation with performance ($r = 0.16$; $p = 0.59$), whilst the one given by DFA presented a significant negative correlation ($r = -0.71$; $p < 0.005$). Thus, the DFA method better represented the traction force signal FD, and can be taken as an index of performance in the chin-up bar exercise.

Keywords: Motor control, fractal dimension, traction force signal.

Introdução

O termo “fractal” foi primeiramente proposto pelo matemático Benoit Mandelbrot em 1975, sendo utilizado até hoje para descrever a geometria de estruturas e objetos irregulares encontrados na natureza [1]. Diferentemente da geometria Euclidiana, na qual objetos são representados por meio de axiomas com dimensões inteiras, a dimensão fractal (*DF*) apresenta valores não inteiros, normalmente sendo limitada pelas dimensões Euclidiana (*DE*) e topológica (*DT*): $DT < DF < DE$ [2,3]. Uma estrutura fractal possui como características: i) presença de autossimilaridade; ii) segue a lei de potência escalar; iii) possui escala invariante no tempo ou espaço [2-3].

Diversos métodos, tanto no domínio do tempo quanto da frequência, são empregados para estimar os aspectos estruturais de sinais provenientes de sistemas físicos e fisiológicos [2-5]. Todavia, uma questão importante é a escolha do método para estimar a *DF*. Diferentes métodos podem conduzir a diferentes *DF* e isto pode ser devido às características intrínsecas do sinal, tal como a presença de tendências, a não estacionariedade e a contaminação por ruído extrínseco, levando a uma inconsistência na estimação do parâmetro [3,6]. Em particular, em sinais cíclicos, como a força durante exercícios repetidos, há a presença de picos espectrais que podem gerar tendências sobre os estimadores no domínio da frequência.

O objetivo do presente trabalho foi testar os métodos *power spectral density* (PSD) e *detrended fluctuation analysis* (DFA) para a predição do desempenho por meio da *DF* da força de tração durante o exercício de puxada na barra fixa.

Materiais e métodos

Casística – Participaram do estudo 15 indivíduos saudáveis e bem condicionados do sexo masculino, com idade $22,2 \pm 2,5$ anos (média \pm desvio padrão), massa $77,7 \pm 9,7$ kg e estatura $1,75 \pm 0,9$ m, provenientes do corpo de aspirantes da Escola Naval. O protocolo foi aprovado pelo comitê de ética da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (CAAE: 01530712.9.0000.5282) e todos os voluntários assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido.

Instrumentação – Uma célula de carga uniaxial com capacidade 200 kgf e resposta em frequências de 0 a 23 Hz foi montada em série com a barra e o sinal de força foi amplificado (ganho 600) e registrado por um conformador de sinais em uma frequência de amostragem igual a 2 kHz (EMGSystem, Brasil).

Protocolo experimental – Os voluntários foram posicionados sob a barra e orientados a segurá-la de forma a manter as articulações ulnares em máxima extensão, as mãos na largura dos ombros e os antebraços em supinação. Todos foram motivados verbalmente a fazer o número máximo de repetições até a exaustão ou quando não fosse possível a execução adequada do movimento.

Processamento dos sinais – Os sinais foram filtrados por um filtro digital passa-baixas Butterworth de 2ª ordem com frequência de corte 100 Hz. Em seguida, os sinais foram subamostrados para 200 Hz e normalizados pelo peso corporal. Como todos os voluntários suportaram no mínimo 16 s de exercício, este tempo foi considerado para a análise. Adicionalmente, o primeiro segundo foi descartado para evitar possíveis transientes. Para o método PSD, o espectro de potências foi estimado por meio do método do periodograma. Previamente, foi realizada a remoção da média e de tendências lineares e a aplicação da janela parabólica de tamanho N igual ao número de amostras do sinal [4,6]:

$$W(j) = 1 - \left(\frac{2j}{N+1} - 1\right)^2 \quad j = 1, \dots, N \quad (1)$$

A aplicação desta janela teve o objetivo de reduzir os vazamentos espectrais que podem acentuar os picos característicos do movimento cíclico.

Foi assumida a lei de potências para as funções densidade espectral de potência $S(f)$, dada pela relação:

$$S(f) \propto 1/f^\beta \quad (2)$$

onde f é a frequência e β o expoente espectral. A partir desta relação, foi possível calcular o valor de β como sendo o coeficiente angular da reta de regressão ajustada a $S(f)$ e f representados em escala logarítmica:

$$\log(S(f)) = \log(1) - \beta \log(f) \quad (3)$$

O sinal foi identificado por inspeção visual como sendo de banda estreita. Portanto, as altas frequências foram descartadas, a estimação do expoente espectral foi limitada a 6 Hz, e a dimensão fractal foi calculada a partir da relação [3,7]:

$$DF = \frac{5-\beta}{2} \quad (4)$$

O método utilizado para calcular a DF no domínio do tempo foi o DFA. Inicialmente, foi calculado o perfil do sinal por meio da soma cumulativa, da seguinte forma [3,6]:

$$X(k) = \sum_i^k [x(i) - \bar{x}] \quad (5)$$

onde $x(i)$ é o sinal de força, \bar{x} a sua média e N , o número de amostras do sinal de força.

$X(k)$ foi dividido em N_n intervalos de comprimento n , sem sobreposição. Em cada intervalo, uma reta de regressão X_n foi ajustada representando a tendência local de cada intervalo. Esta reta foi então subtraída dos respectivos pontos de cada intervalo. O valor da flutuação média para cada intervalo de tamanho n foi obtido pelo valor eficaz dos seus respectivos pontos, como segue:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{N_n} \sum_{k=1}^{N_n} [X(k) - X_n]^2} \quad (6)$$

Este procedimento foi repetido para todos os possíveis intervalos, com n variando de 10 até $N/2$, com passo 10 [6]. Como $F(n)$ aumenta em função de n , a característica fractal é confirmada e a seguinte lei de potências é esperada:

$$F(n) \propto n^\alpha \quad (7)$$

onde α é o expoente escalar calculado como o coeficiente angular da reta de regressão ajustada entre $F(n)$ e n , em escala logarítmica. Os limites de ajuste foram escolhidos iniciando em $n = 10$ até a inflexão de $F(n)$. Do mesmo modo que β , α foi usado para estimar a dimensão fractal sendo definido por [3]:

$$DF = 3 - \alpha \quad (8)$$

Análise estatística – Foi estimado o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre a DF calculada por ambos os métodos e o desempenho no exercício, o qual foi medido por meio do número máximo de repetições. A significância de r foi testada por meio do teste t de Student. O nível de significância adotado foi 0,05.

Resultados

A força de tração apresentou característica cíclica com alta irregularidade para os indivíduos com menor desempenho (Figura 1).

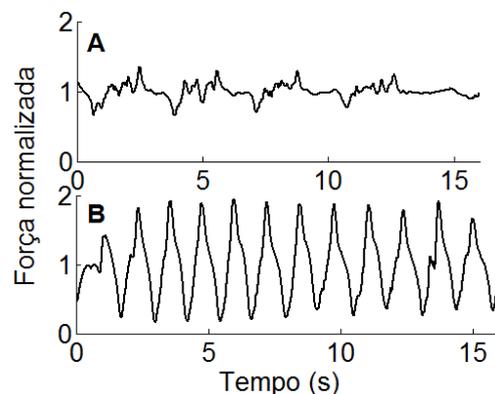


Figura 1: Força de tração normalizada pela massa corporal. A, indivíduo com menor desempenho; B, indivíduo com maior desempenho.

Ao contrário do esperado, β foi maior em módulo para os indivíduos com menor desempenho (Figura 2), o que gerou menores valores de DF para estes sujeitos (Tabela 1).

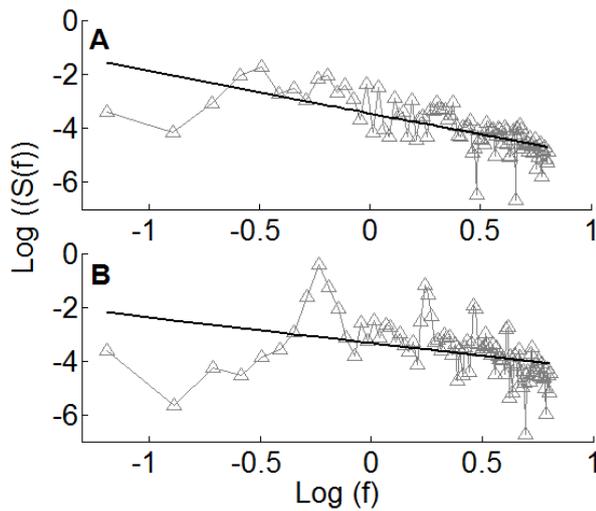


Figura 2: $S(f)$ em função de f em escala bilogarítmica. Percebe-se uma maior inclinação da reta de regressão para o sujeito com menor desempenho (A), em relação ao indivíduo com maior desempenho (B).

Ao contrário, o método DFA mostrou que α foi menor nos sujeitos com menor desempenho (Figura 3), o que acarretou em maiores valores de DF (Tabela 1).

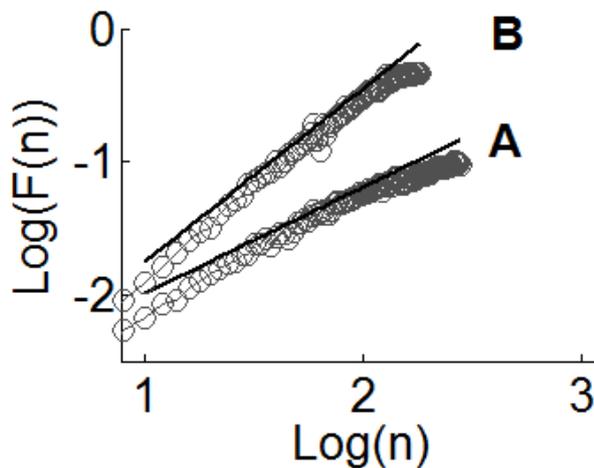


Figura 3: $F(n)$ em função de n em escala bilogarítmica, mostrando menor inclinação da reta de regressão para o indivíduo com menor desempenho (A) em relação ao indivíduo com maior desempenho (B).

Não houve correlação significativa entre a DF por PSD e o desempenho no exercício ($r = 0,16$; $p = 0,59$). Entretanto, a DF por DFA apresentou correlação negativa significativa com o desempenho ($r = -0,71$; $p < 0,005$) (Figura 4).

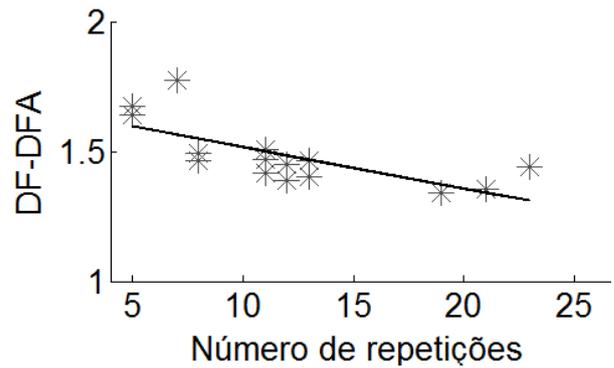


Figura 4: A DF da força de tração pelo método DFA apresentou correlação negativa significativa com o desempenho mostrada pela reta de regressão.

Tabela 1: Dimensão fractal (DF) da força de tração pelos métodos PSD e DFA, bem como o desempenho no exercício.

Sujeito	DF		# de Repetições
	PSD	DFA	
1	1,48	1,64	5
2	1,49	1,46	13
3	1,68	1,47	11
4	1,60	1,47	8
5	1,63	1,40	13
6	1,65	1,39	12
7	1,44	1,35	21
8	1,66	1,44	23
9	1,50	1,34	19
10	1,46	1,64	5
11	1,37	1,51	11
12	1,65	1,45	12
13	1,44	1,49	8
14	1,64	1,42	11
15	1,57	1,78	7

Discussão

Diversos estudos utilizaram a DF ou seus estimadores, como os expoentes de Hurst, β e α , de forma a obter informações sobre a complexidade de um determinado sistema. Esta complexidade é dada pelo aspecto estrutural de um dado sinal, bem como pela sua irregularidade [2-7].

O propósito deste trabalho foi estimar a DF do sinal de força de tração por dois diferentes métodos para inferir sobre o número máximo de repetições durante o exercício de puxada na barra fixa. A hipótese inicial foi de que os indivíduos com menor desempenho apresentariam uma maior DF , característica de um controle motor menos apurado. A inspeção visual fortaleceu esta hipótese, que foi confirmada somente para o método DFA, o qual se mostrou robusto mesmo no caso de sinal cíclico analisado no presente estudo. Curiosamente, o método PSD não mostrou correlação com o desempenho. Ainda mais, alguns sujeitos evidenciaram respostas contrárias ao esperado.

As diferenças entre os métodos podem ser devidas às características inerentes ao sinal analisado [3-4,6]. O método PSD, cujo estimador espectral é baseado na transformada discreta de Fourier, exige que o sinal analisado seja estacionário. O DFA não possui esta exigência, pois seu algoritmo tem a vantagem de evitar a detecção de correlações espúrias encontradas em sinais não estacionários [8-11].

Pela inspeção visual dos sinais de força, foi possível observar a presença de um componente senoidal característico e atribuído à cadência cíclica do exercício, em particular nos sinais de sujeitos com melhor desempenho (Figura 1B). A presença de picos espectrais nos harmônicos pode ter influenciado o cálculo do estimador. Além disso, quando o voluntário somente consegue efetuar poucas repetições, o sinal pode apresentar uma não estacionariedade que influencia a estimativa da DF pelo método PSD. Nota-se, por exemplo, que o sinal mostrado na Figura 1A não pode ser considerado estacionário, pois apresenta variância decrescente ao longo do tempo. O DFA supera esta limitação por eliminação das tendências de curto e de longo prazo (locais e globais, respectivamente), quando são utilizados somente os intervalos com n variando de 10 até $N/2$ [9-11]. Logo, o DFA é aparentemente sensível à presença do tremor fisiológico característico do esforço intenso. Entretanto, esta hipótese precisa ser melhor investigada.

Conclusão

O método DFA mostrou-se adequado para a estimação da DF compatível com o desempenho no exercício de puxada na barra fixa. A irregularidade do sinal de força de tração é uma característica que determina o número máximo de repetições no exercício estudado e que pode inferir sobre o controle motor. Devido à natureza cíclica e à não estacionariedade do sinal de força, o método PSD não foi conveniente para a estimação da DF nesse exercício.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pelas agências FAPERJ, CNPq e CAPES.

Referências

- [1] Mandelbrot BB. The Fractal Geometry of Nature. São Francisco: Freeman; 1982.
- [2] Lopes R, Betrouni N, Fractal and multifractal analysis: a review. Medical Image Analysis. 2009; 13:634-49.
- [3] Eke A, Hermán P, Kocsis L, Kozak LR, Fractal characterization of complexity in temporal physiological signals. Physiological Measurement. 2002; 23:1-38.
- [4] Eke A, Hermán P, Bassingthwaight JB, Raymond GM, Percival DB, Cannon M, Balla I, Ikrényi C, Physiological time series: distinguishing fractal noises from motions. European Journal of Physiology. 2000; 439:403-15.
- [5] West BJ, Fractal physiology and the fractional calculus: a perspective. Frontiers in Physiology. 2010; 1:1-17.
- [6] Delignières D, Ramdani S, Lemoine L, Torre K, Forte M, Ninot G, Fractal analyses for 'short' time series: a re-assessment of classical methods. Journal of Mathematical Psychology. 2006; 50:525-44.
- [7] Higuchi T, Relationship between the fractal dimension and the power law index for a time series: a numerical investigation. Physica D. 1990; 46:254-64.
- [8] Hu K, Ivanov CP, Chen Z, Carpena P, Stanley HE. Effect of trends on detrended fluctuation analysis. Physical Review E. 2001; 64: 11-4.
- [9] Penzel T, Kantelhardt JW, Grote L, Peter J-H, Bunde A, Comparison of detrended fluctuation analysis and spectral analysis for heart rate variability in sleep and sleep apnea. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2003; 50:1143-51.
- [10] Horvatic D, Stanley HE, Podobnik B. Detrended cross-correlation analysis for non-stationary time series with periodic trends. Europhysics Letters. 2011; 94:1-6.
- [11] Chen Z, Ivanov PC, Hu K, Stanley HE. Effect of nonstationarities on detrended fluctuation analysis. Physical Review E. 2002; 65:1-17.