

Use of Wavelet Transforms and Detrended Fluctuation Analysis in the evaluation of human skin microcirculation

A utilização de transformadas de Wavelet e de Detrended Fluctuation Analysis no estudo da microcirculação da pele humana

Hugo A. Ferreira¹, Catarina D. Fernandes¹, Pedro C. Pinto² & Luís M. Rodrigues³

¹Instituto de Biofísica e Engenharia Biomédica, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

²CBIOS-UDE-Research Center for Health Science and Technologies, Universidade Lusófona, Campo Grande, 376, 1749-024, Lisboa, Portugal

³Laboratório de Fisiologia Experimental, Faculdade de Farmácia, Universidade de Lisboa
Email: hhferreira@fc.ul.pt

Abstract

Laser Doppler Flowmetry (LDF) is a non-invasive technique used to assess microvascular flow oscillations. Skin microcirculation has been shown to contain oscillation components with characteristic frequency ranges. These are related to heart, respiration, and myogenic, sympathetic and metabolic activities. So, the evaluation of each component in time may hold important information regarding blood flow physiology. LDF measurements were done at the ankle of 9 female healthy subjects during ankle perfusion restriction using a cuff. Wavelet Transform and Detrended Fluctuation Analysis (DFA) were applied to LDF signals to derive component's amplitude ratios and exponents. Parameters were compared in rest, during perfusion restriction, and in recovery after the cuff release. During perfusion restriction a significant increase of heart, respiratory and myogenic components' parameters was observed, suggesting vasoconstriction. Metabolic parameters exhibited a decrease that could be related to NO release changes from the endothelium. Finally, after cuff release a recovery of both amplitude ratios and exponents was noted, particularly in the respiratory, myogenic and metabolic components. Combined analysis of wavelet component amplitudes with DFA-derived exponents can provide a new and more complete picture of microvascular blood-flow regulation.

Keywords: Laser Doppler Flowmetry; Wavelet analysis; Detrended Fluctuation Analysis; Microcirculation; Skin flow

Resumo

A Fluxometria por Laser Doppler (LDF) é uma técnica não invasiva usada para medir o fluxo microvascular da pele humana. No fluxo é possível isolar componentes oscilatórias em gamas de frequências características que se encontram relacionadas com as actividades cardíaca, respiratória, miogénica, simpática e metabólica. A LDF permite assim estudar a fisiologia do fluxo sanguíneo. Neste trabalho foram realizadas medições de LDF nos tornozelos de 9 mulheres saudáveis numa situação de restrição à perfusão, usando uma braçadeira nos tornozelos. Os dados foram analisados com Transformada de Wavelet e Detrended Fluctuation Analysis (DFA) de modo a estudar os rácios das amplitudes das componentes de Wavelet e os respectivos expoentes. Estes parâmetros foram comparados nas situações de repouso, de restrição à perfusão e de recuperação após remoção da braçadeira. Observou-se que durante a restrição à perfusão houve um aumento significativo dos rácios de amplitude e dos expoentes para as componentes cardíaca, respiratória e miogénica, o que pode reflectir vasoconstricção. Os parâmetros da componente metabólica apresentaram uma diminuição que se pode relacionar com variações na libertação de NO por parte do endotélio. Após a libertação da braçadeira, os parâmetros das componentes respiratória, miogénica e metabólica retornaram aos valores iniciais. A análise combinada de Wavelet com DFA oferece uma nova visão sobre a regulação do fluxo microvascular.

Palavras-chave: Fluxometria por Laser Doppler; Transformada de Wavelet; Detrended Fluctuation Analysis; Microcirculação, Circulação da Pele

Introduction

Laser Doppler Flowmetry (LDF) is a technique based on the Doppler effect:- laser light impinging any moving scattering object undergoes a very small frequency shift that can be measured. Thus, the output of LDF can be used to obtain information regarding the flux of red blood cells in vessels. Hence, the technique is able to assess blood flow physiology and also it can be used as a complementary diagnostic tool^[1].

In particular, LDF has been used to record human skin microvascular blood flow. Measured signals were shown to be comprised of several components at characteristic frequency ranges. These are related to the heart (0.6-2Hz), respiration (0.15-0.6Hz), myogenic activity in the vessel wall (0.052-0.15Hz), sympathetic activity (0.021-0.052Hz) and endothelial metabolic activity (0.0095-0.021Hz)^[2]. Additionally, the individual frequency components were observed to have a time-varying behavior. In fact, blood flow signals are typically non-stationary and complex in nature, showing fractal properties.

Wavelet analysis is a tool that is particularly suited for the study of time and frequency varying signals. In particular, wavelet analysis can be used with non-stationary signals, providing localized temporal and frequency information^[3].

Fractal properties can be assessed using Detrended Fluctuation Analysis (DFA). This method provides a measurement of statistical self-affinity (expressed by the α exponent), and can be applied to non-stationary signals^[4].

Both wavelets^[2,5,6] and DFA^[4,7-10] methods have been applied to the study of microvascular skin blood flow. These studies were focused on the effects of acetylcholine^[4] and heating^[5,7] induced vasodilation in blood flow. Specific conditions such as anesthesia^[2], strenuous physical activity^[8], hypertension^[9] and hypertension treatment^[6], and risk for development of pressure ulcers^[10] were also evaluated.

Nevertheless, no literature combining both wavelet and DFA methods was found for skin microvascular study. The aim of this work was then to apply such a combined approach for the study of blood flow dynamics during baseline, perfusion restriction, and recovery.

Introdução

A Fluxometria por Laser Doppler (LDF) é uma técnica baseada no efeito Doppler: a luz laser ao incidir num objecto em movimento sofre uma pequena variação de frequência que pode contudo ser medida. Assim, o sinal obtido com a LDF pode ser usado para obter informação relativamente ao fluxo de células vermelhas ao nível dos vasos. Como tal, esta técnica é capaz de averiguar a fisiologia do fluxo sanguíneo, podendo ainda ser utilizada como uma ferramenta complementar de diagnóstico^[1].

Em particular, a LDF tem sido usada para registar o fluxo sanguíneo ao nível da microvasculatura da pele humana. Os sinais medidos são constituídos por várias componentes, sendo que estas se encontram em gamas de frequências específicas. Estas estão relacionadas com a actividade cardíaca (0.6 – 2Hz), respiratória (0.15-0.6Hz), actividade miogénica ao nível da parede dos vasos (0.052-0.15Hz), actividade simpática (0.021-0.052Hz) e actividade endotelial metabólica (0.0095-0.021Hz)^[2]. Para além do mais, cada uma das componentes em frequência foram analisadas individualmente e foi observado que o seu comportamento varia no tempo. De facto, os sinais de fluxo sanguíneo são tipicamente não estacionários e complexos por natureza, apresentando propriedades fractais.

A análise de Wavelet apresenta-se como uma ferramenta que é particularmente apropriada para o estudo de sinais que variam no tempo e em frequência. Em particular, este tipo de análise pode ser usada em sinais não estacionários, providenciando informação localizada a nível temporal e em frequência^[3].

As propriedades fractais podem ser exploradas utilizando da Detrended Fluctuation Analysis (DFA). Este método oferece uma medição de auto-afinidade estatística (expressa por um expoente α) e pode ser aplicado a sinais não estacionários^[4].

Tanto a análise de wavelets^[2,5,6] como a DFA^[4,7-10] são métodos que já foram aplicados no estudo da fluxo sanguíneo da microvasculatura. Estes estudos focaram-se nos efeitos da acetilcolina^[4] e do calor^[5,7] na indução de vasodilatação. Condições específicas como anestesia^[2], actividade física intensa^[8], hipertensão^[9] bem como o seu tratamento^[6] ou o risco associado ao desenvolvimento de úlceras de pressão^[10] foram também avaliados.

Contudo, não foi encontrada literatura que combinasse a análise de wavelet com os métodos de DFA num estudo da microvasculatura da pele. O objectivo deste trabalho foi então aplicar uma metodologia combinada para o estudo da dinâmica do fluxo sanguíneo durante repouso, uma restrição à perfusão e recuperação da perfusão.

Materials and Methods

This study enrolled 9 healthy female subjects with mean standard deviation age of 20.34.0 years. All subjects gave informed written consent and protocols conducted in accordance with the Declaration of Helsinki and respective amendments. LDF measurements were performed at the ankle site for each subject during 30 minutes: - 10 min baseline (resting); 10 min during perfusion restriction of the ankle with a cuff, and 10 min recovery. Signals were sampled at 32 Hz and, after a segmentation in 3 time segments (corresponding to the 3 experimental conditions), data was analyzed using a home-built MATLAB script based on MATLAB's Wavelet toolbox (Mathworks) using the Morlet wavelet and DFA algorithm ([http://](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19795-detrended-fluctuation-analysis)

www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19795-detrended-fluctuation-analysis). Prior to analysis, data non-stationarity was tested using the Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin (KPSS) test. Frequency components from wavelet decomposition were analyzed regarding amplitude ratios (mean amplitude of each component over the total signal amplitude). Each component time-series was also subsequently analyzed using DFA and α exponents derived. Group comparison between data segments (baseline, perfusion restriction, and recovery) was done regarding amplitude ratios and α exponents for each frequency component by using paired t-test or Wilcoxon test, according to variable normality as assessed by the Shapiro-Wilk test.

Results and Discussion

Data from all subjects were shown to be non-stationary according to the KPSS test, confirming that using both wavelet and DFA methods for microvascular blood flow study was adequate.

The LDF signal for a representative subject is depicted in figure 1. A large decrease in signal amplitude was observed after cuff inflation, corresponding to an expected perfusion restriction. In figure 1 the LDF signal power spectrum is also depicted, where the different phenomenological frequency ranges were observed as expected. Also, larger power amplitudes corresponded to lower frequencies, in particular, to endothelial metabolic and sympathetic activities. On the other hand, very small power amplitudes were

Materiais e Métodos

Este estudo envolveu 9 mulheres saudáveis com uma idade média desvio padrão de 20.3 4.0 anos. Todos os sujeitos deram o seu consentimento informado por escrito, sendo todos os protocolos desenvolvidos de acordo com a Declaração de Helsinki e respectivas emendas. As medições de LDF foram executadas no local do tornozelo em cada um dos indivíduos durante um período de 30 minutos - 10 minutos de repouso; 10 minutos com restrição de perfusão ao nível do tornozelo com o auxílio de uma braçadeira, e 10 minutos de recuperação. Os sinais foram amostrados a 32 Hz e, após segmentação nos 3 segmentos temporais (correspondentes às 3 condições experimentais), os dados foram analisados usando um script em MATLAB baseado em MATLAB Wavelet toolbox (Mathworks) com a wavelet Morlet e o algoritmo de DFA ([http://](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19795-detrended-fluctuation-analysis)

www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/19795-detrended-fluctuation-analysis). Previamente à análise, a não estacionariedade dos dados foi testada com o teste de

Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin (KPSS). As componentes em frequência resultantes da decomposição de wavelet foram analisadas relativamente a rácios de amplitude (amplitude média de cada uma das componentes sobre a amplitude total do sinal). A série temporal de cada componente foi posteriormente analisada utilizando a DFA e os expoentes α foram calculados. As comparações em grupo entre segmentos (repouso, restrição de perfusão e recuperação) foram realizadas relativamente aos rácios de amplitude e expoentes α para cada uma das componentes de frequência utilizando um teste t emparelhado ou teste de Wilcoxon, conforme a normalidade das variáveis avaliada pelo teste Shapiro-Wilk.

Resultados e Discussão

De acordo com o teste KPSS os dados de todos os indivíduos revelaram ser não estacionários, confirmando utilização adequada dos métodos de wavelet e DFA no estudo do fluxo sanguíneo microvascular.

O sinal de LDF para caso representativo é apresentado na figura 1. Observou-se uma grande diminuição na amplitude do sinal após o enchimento da braçadeira, o que corresponde à restrição da perfusão esperada. Na figura 1 também se encontra representado o espectro de potência do sinal, onde as diferentes gamas de frequência fisiológicas foram observadas tal como seria expectável. É ainda visível que maiores amplitudes de potência correspondem a gamas de

observed for higher frequencies, namely those related to the heart pumping and respiration. Myogenic activity of the vessel walls appears both at medium frequencies and medium power amplitudes.

frequência mais baixas, em particular, às actividades endotelial metabólica e simpática. Por outro lado, para as frequências mais altas foi observado que as amplitudes de potência eram muito pequenas, nomeadamente as que estão relacionadas com o actividade cardíaca e com a respiração. A actividade miogénica das paredes dos vasos aparece a frequências médias e tem também ela uma amplitude de potência média.

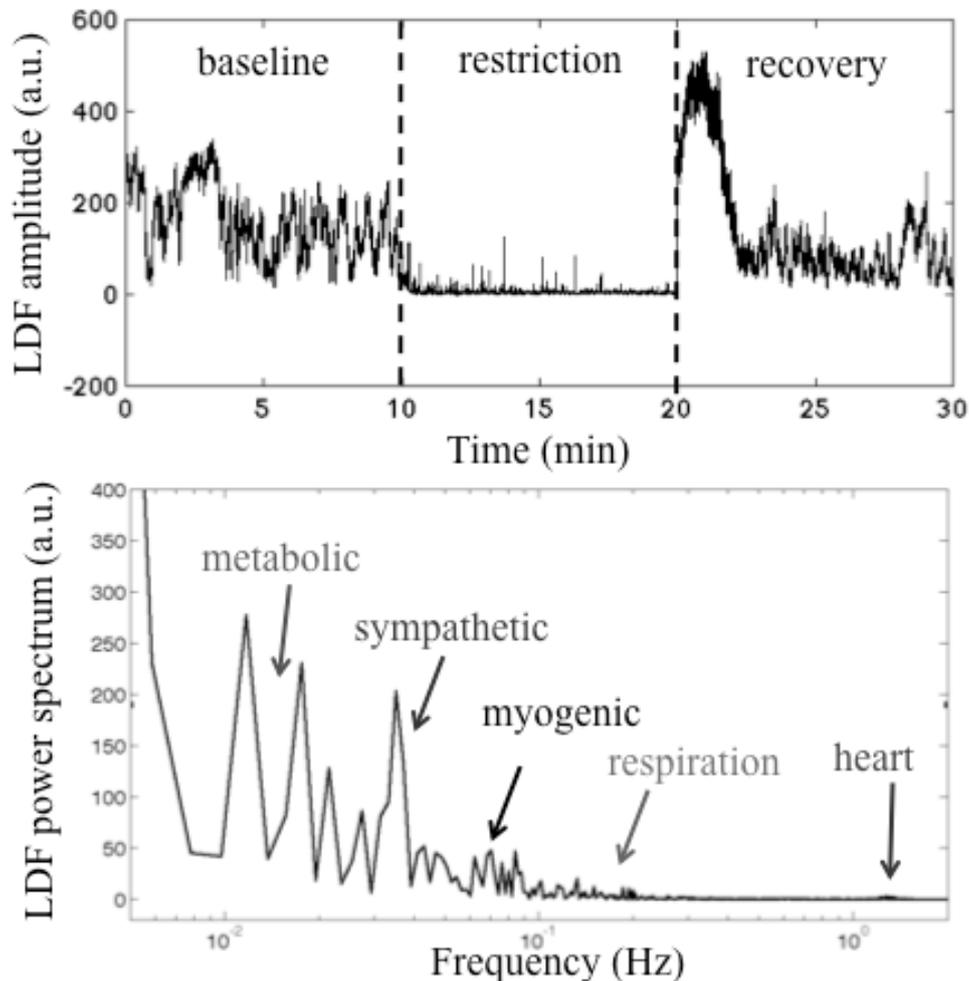


Figure 1 - Top: Laser Doppler Flowmetry (LDF) signal amplitude in time showing the 3 experimental conditions or segments: baseline, perfusion restriction and recovery. **Bottom:** LDF power spectrum depicting characteristic phenomenological frequency ranges: heart (0.6-2Hz), respiration (0.15-0.6Hz), myogenic activity in the vessel wall (0.052-0.15Hz), sympathetic activity (0.021-0.052Hz) and endothelial metabolic activity (0.0095-0.021Hz). Data is from a representative subject. (a.u.=arbitrary units; frequency axis is in log10 scale)

Figura 1 - Em cima: Amplitude do sinal de Fluxometria de laser Doppler (LDF) ao longo do tempo onde é possível distinguir as 3 condições experimentais ou segmentos: repouso, restrição de perfusão e recuperação. **Em baixo:** Espectro de potência LDF salientando as gamas de frequências características: cardíaca (0.6-2Hz), respiratória (0.15-0.6Hz), actividade miogénica das paredes dos vasos (0.052-0.15Hz), actividade simpática (0.021-0.052Hz) e actividade endotelial metabólica (0.0095-0.021Hz). Os dados são relativos um sujeito representativo. (a.u.=unidades arbitrárias; eixo de frequência é numa escala de log10)

Figure 2 shows the different wavelet component's time-series. It was observed that each frequency component varies in time, underlying a complex behavior.

A figura 2 representa as diferentes séries temporais das componentes de wavelet. Foi possível observar que cada componente de frequência varia no tempo, apresentando um comportamento complexo.

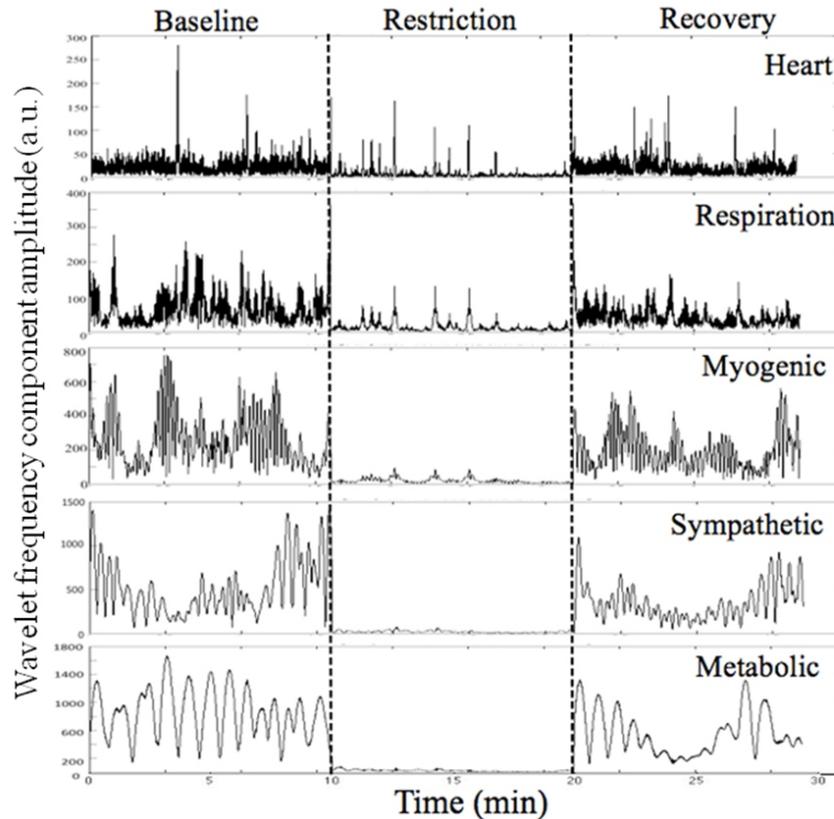


Figure 2 - Amplitude over time of each wavelet frequency component: heart (0.6-2Hz), respiration (0.15-0.6Hz), myogenic activity in the vessel wall (0.052-0.15Hz), sympathetic activity (0.021-0.052Hz) and endothelial metabolic activity (0.0095-0.021Hz) obtained for each experimental condition: baseline, perfusion restriction and recovery. Data is from a representative subject. (a.u.=arbitrary units).
Figura 2 - Amplitude ao longo do tempo para cada uma das componentes de frequência: cardíaca (0.6-2Hz), respiratória (0.15-0.6Hz), atividade miogénica das paredes dos vasos (0.052-0.15Hz), atividade simpática (0.021-0.052Hz) e atividade endotelial metabólica (0.0095-0.021Hz) obtida para cada uma das condições experimentais: repouso, restrição da perfusão e recuperação. Os dados são relativos a um sujeito representativo. (a.u.=unidades arbitrárias)

Results from amplitude ratios and α exponents for each wavelet component are summarized in table 1 and visually illustrated in figure 3. The different frequency components not only had different wavelet amplitude ratios but also different α exponents. Nevertheless, all components showed $\alpha > 0.5$, translating positive self-correlated signals. This means that if there is an

Os rácios de amplitude e expoentes α para cada uma das componentes de wavelet encontram-se sumarizados na tabela 1 e representados graficamente na Figura 3. Verificou-se que as diferentes componentes em frequência não só têm diferentes rácios de amplitude de wavelet como também diferentes expoentes α . Contudo, todas as

increase in the physiological response of one of the components, then it is more likely that subsequent increases in response would be observed ^[9]. Additionally, metabolic and sympathetic activity components showed the highest amplitude ratios, meaning that LDF signals were mainly from metabolic and sympathetic origin. Furthermore, these frequency components also showed the highest DFA α exponents, translating non-stationary correlated signals of the fractional Brownian motion type ^[9].

Metabolic mean values of $\alpha \sim 1.8 > 1.5$ reflect long-range correlations, which can be deterministic and not necessarily stochastic in nature. Sympathetic $\alpha \sim 1.4$, on the other hand, could reflect a physiological process with characteristics closer to Brownian noise ($\alpha = 1.5$). Finally, heart, respiration and myogenic activity components showed $\alpha \sim 1.0$ at the baseline (resting) condition, meaning that these phenomena have a 1/f or pink noise behavior. These are phenomena for which power or amplitude changes inversely with the frequency. This is what was observed for these components.

componentes apresentam $\alpha > 0.5$, traduzindo auto-correlações positivas. Como tal isto significa que caso exista um aumento da resposta fisiológica de uma das componentes então é bastante provável que um futuro aumento na resposta volte a ser observado ^[9]. As componentes de actividade metabólica e simpática apresentam os maiores valores para os rácios de amplitude, o que leva a concluir que os sinais de LDF são maioritariamente de origem simpática e metabólica. Estas componentes de frequência também apresentam os maiores valores para os expoentes α da DFA, o que se significa que estes são sinais correlacionados não estacionários do tipo movimento Browniano fractal ^[9].

Os valores médios de $\alpha \sim 1.8 > 1.5$ para a actividade metabólica reflectem correlações de longo alcance, que pode ser determinísticas e não necessariamente de natureza estocástica. Por outro lado, o expoente $\alpha \sim 1.4$ da actividade simpática pode traduzir um processo fisiológico com características próximas do ruído Browniano ($\alpha = 1.5$). Por fim, as componentes das actividades cardíaca, respiratória e miogénica obtiveram um $\alpha \sim 1.0$ na condição de repouso, o que significa que estes fenómenos têm um comportamento do tipo 1/f. Estes são fenómenos para os quais a potência ou amplitude varia inversamente com a frequência, sendo que tal foi observado para estas componentes.

Table 1 - Average standard deviation group values of ratios of Wavelet amplitudes and α exponents derived from Detrended Fluctuation Analysis (DFA) for each wavelet component. Significant differences between segment pairs: ^abaseline/restriction $p < 0.05$; ^bbaseline/recovery $p < 0.05$; ^crestriction/recovery; $p < 0.05$; ^dbaseline/restriction $p < 0.001$; ^erestriction/recovery; ^fbaseline/restriction $p < 0.005$.

Tabela 1 - Média desvio padrão dos valores de grupo dos rácios das amplitudes de Wavelet e dos expoentes α resultantes da Detrended Fluctuation Analysis (DFA) para cada componente de wavelet. Diferenças significativas entre pares de segmentos: ^arepouso/restricção $p < 0.05$; ^brepouso/recuperação $p < 0.05$; ^crestricção/recuperação $p < 0.05$; ^drepouso/restricção $p < 0.001$; ^erestricção/recuperação; ^frepouso/restricção $p < 0.005$.

Component Componente	Wavelet amplitude ratios (%) Rátios de amplitudes das wavelets (%)			DFA α exponent Expoente α DFA		
	Baseline Baseline	Restriction Restrição	Recovery Recuperação	Baseline Baseline	Restriction Restrição	Recovery Recuperação
Heart Coração	0.07±0.03 ^{ab}	0.18±0.10 ^a	0.09±0.05 ^b	0.96±0.10	1.01±0.07 ^c	0.92±0.09 ^c
Respiration Respiração	0.49±0.14 ^a	1.48±0.64 ^{ac}	0.64±0.29 ^c	1.03±0.08 ^d	1.30±0.06 ^{de}	1.08±0.08 ^e
Myogenic Miogénica	4.35±1.66 ^a	6.06±1.92 ^a	4.74±1.06	0.99±0.12 ^f	1.10±0.06 ^f	1.08±0.19
Sympathetic Simpático	20.58±3.12	21.21±2.74	19.75±5.28	1.41±0.09	1.40±0.07	1.44±0.09
Metabolic Metabólica	73.92±3.99 ^a	70.45±4.57 ^a	74.18±5.68	1.81±0.04	1.77±0.06	1.75±0.08

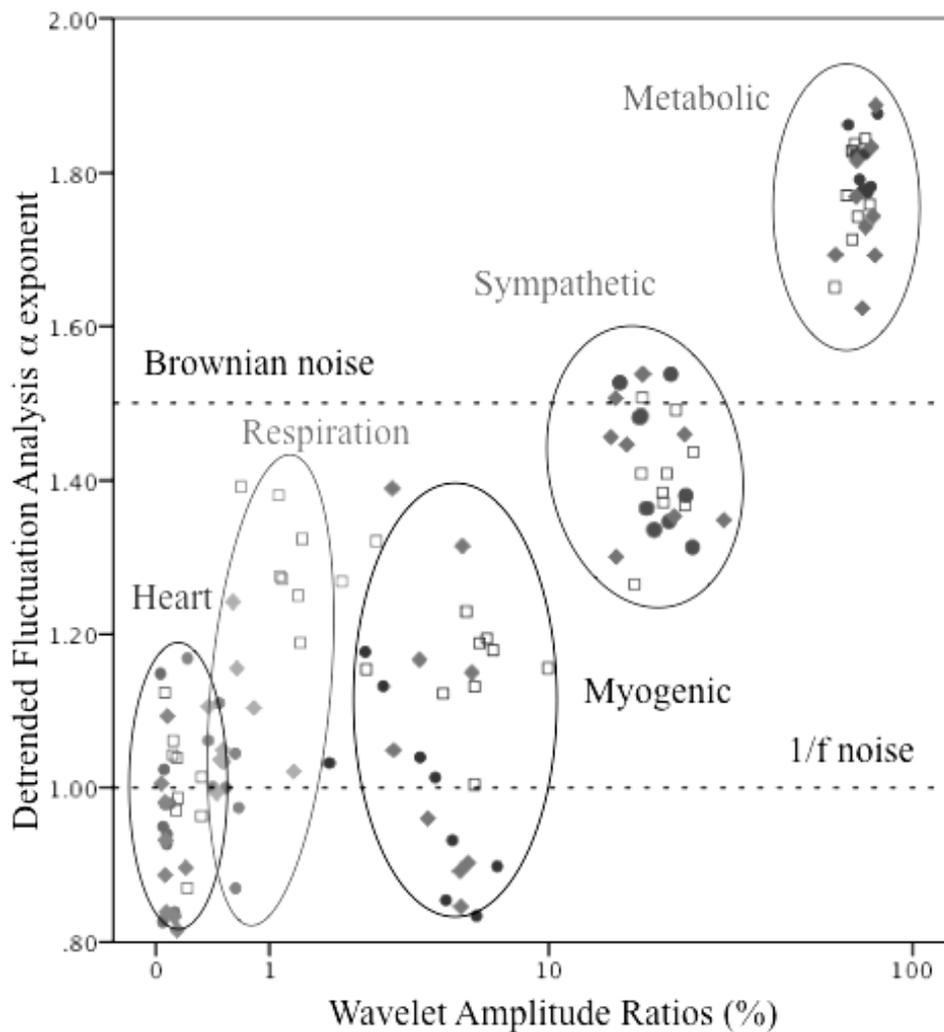


Figure 3 - Plot showing Detrended Fluctuation Analysis (DFA) α exponents vs Wavelet amplitude ratios (abscissa axis in log10 scale). The different frequency components are indicated by colors (heart=blue; respiration=green; myogenic=gray; sympathetic=purple; and metabolic=red), and the different segments are indicated by symbols (baseline=filled circles; perfusion restriction=open squares; recovery=filled diamonds). Also, dashed lines for $\alpha=1$ (1/f noise) and $\alpha=1.5$ (Brownian noise) are shown for referencing.

Figura 3 - Gráfico onde são apresentados os expoentes α da Detrended Fluctuation Analysis (DFA) vs os rcios de amplitude de Wavelet (o eixo das abcissas est na escala log10). As diferentes componentes da frequncia esto indicadas por cores (corao=azul; respirao=verde; miognica=cinzento; simptica=roxo; metablica=vermelho), e os diferentes segmentos so indicados pelos smbolos (repouso=crculos preenchidos; restrio da perfuso=quadrados abertos; recuperao=diamantes preenchidos). So ainda visveis linhas para $\alpha=1$ (rudo 1/f) e $\alpha=1.5$ (rudo Browniano) usadas como referncia.

Regarding the analysis of the different experimental conditions it was observed that during perfusion restriction there was a significant increase of the amplitude ratios and α exponents of heart, respiratory and myogenic components. This behavior can be related to vasoconstriction observed after perfusion restriction. In parallel, a decrease in metabolic activity

No que diz respeito  anlise das diferentes condioes experimentais foi possvel verificar que durante a restrio da perfuso ocorreu uma diminuio significativa dos rcios de amplitude bem como dos expoentes α das componentes cardcia, respiratria e miognica. Este comportamento pode ser relacionado com a vasoconstrico observada aps a restrio da

was observed, and this can be related to changes in NO release from the endothelium. In the recovery segment, after cuff release, a return to baseline values was observed, although a significant difference ($p < 0.05$) was still observed in the heart activity. Finally, contrary to what was expected no significant changes were observed for the sympathetic component. This could probably result from the reduced sample dimension here studied.

Conclusions

The combined approach of wavelet analysis and DFA have shown potential to become a complementary tool for analyzing vasomotion in LDF signals. In particular, it could contribute to a better characterization of the different systems and phenomena regulating microvascular blood flow, and distinguish between different physiological or medical conditions.

Conflict of interests

The authors declare that there are no financial and personal relationships that could be viewed as presenting a potential conflict of interests.

References / Referências

- [1] Oberg PA. Laser-doppler flowmetry. *Critical Reviews in Biomedical Engineering* 1990; 18: 125-163.
- [2] Landsverk SV, Kvandal P, Bernjak A, Stefanovska A, Kirkeboen KA. The effects of general anesthesia on human skin microcirculation evaluated by wavelet transform. *Anesthesia & Analgesia* 2007; 105: 1012-1019.
- [3] Sosnovtseva OV, Pavlov AN, Mosekilde E, Holstein-Rathlou N-H, Marsh DJ. Double-wavelet approach to study frequency and amplitude modulation in renal autoregulation. *Physical Review E* 2004; 70: 031915.
- [4] Esen F, Esen H. Detrended fluctuation analysis of laser Doppler flowmetry time series: the effect of extrinsic and intrinsic factors on the fractal scaling of microvascular blood flow. *Physiological Measurement* 2006; 27: 1241-1253.
- [5] Sheppard LW, Vuksanovic V, McClintock PVE,

- Stefanovska A, Oscillatory dynamics of vasoconstriction and vasodilation identified by time-localized coherence. *Physics in Medicine and Biology* 2011; 56: 3583-3601.
- [6] Rossi M, Bradbury A, Magagna A, Pesce M, Taddei S, Stefanovska A. Investigation of skin vasoreactivity and blood flow oscillations in hypertensive patients: effect of short-term antihypertensive treatment. *Journal of Hypertension* 2011; DOI:10.1097/HJH.0b013e328348b653.
- [7] Liao F, Struck BD, MacRobert M, Jan Y-K. Multifractal analysis of nonlinear complexity of sacral blood flow oscillations in older adults. *Medical & Biology Engineering & Computing* 2011; 49: 925-934.
- [8] Esen F, Aydin GS, Esen H. Detrended fluctuation analysis of Doppler flowmetry time series. *Microvascular Research* 2009; 78: 314-318.

- [9] Esen F, Çağlar S, Ata N, Ulus T, Birdane A, Esen H. Fractal scaling of laser Doppler flowmetry time series in patients with essential hypertension. *Microvascular Research* 2011; 82: 291-295.
- [10] Liao F, Garrison DW, Jan Y-K. Relationship between nonlinear properties of sacral skin blood flow oscillations and vasodilatory function in people at risk for pressure ulcers. *Microvascular Research* 2010; 80: 44-53.

perfusão. Em paralelo, ocorreu uma diminuição dos parâmetros da actividade metabólica sendo que isto pode estar relacionado com variações na libertação de NO por parte do endotélio. No segmento de recuperação, após retirada da braçadeira, é observável um retorno aos valores de repouso, apesar de que uma diferença significativa ($p < 0.05$) foi ainda observável relativamente à actividade cardíaca em repouso vs recuperação. Por fim, e contrariamente ao esperado, não foram observáveis diferenças significativas na actividade simpática. Este facto poder-se-á dever à pequena amostra de estudo.

Conclusões

O método combinado de análise Wavelet e DFA demonstrou potencial para se tornar numa ferramenta complementar na análise de oscilações microvasculares de sinais LDF. Em particular, este método poderá contribuir para uma melhor caracterização dos diferentes sistemas e fenómenos envolvidos na regulação do fluxo sanguíneo microvascular, e distinção entre diferentes condições fisiológicas e médicas.

Conflitos de Interesses

Os autores declaram que não existem relações pessoais ou financeiras que possam ser vistas como um potencial conflito de interesses.