

## ANÁLISE DE FADIGA MUSCULAR DE SINAIS EMG COM WAVELET

LUÍS PAULO NALLIN DE OLIVEIRA<sup>1</sup>, PAULO ROGÉRIO SCALASSARA<sup>1</sup>, LEANDRO RICARDO ALTIMARI<sup>2</sup>,

LYVIA REGINA BIAGI SILVA<sup>1</sup>

1. *Centro de Pesquisa em Controle e Automação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná- Campus Cornélio Procópio.*

*Avenida Alberto Carazzai, 1640, CEP 86300-000, Cornélio Procópio- Paraná.*

2. *Centro de Educação Física e Esporte, Universidade Estadual de Londrina.*

*Rod. Celso Garcia Cid, km 380- Campus Universitário, CEP 86051-990, Caixa postal 6001, Londrina-Paraná.*

*E-mails: luuispaulonallin@hotmail.com, prscalassara@utfpr.edu.br, alti-mari@uel.br, lybiagi@hotmail.com*

**Abstract**— There is a need of studying analysis ways for EMG signals, this methods don't make invasive ways of take the muscular signals. The main objective of this paper work is the explanation of the operation of the signal analysis EMG using the continuous Wavelet transform, it is being a linear combination of a mother Wavelet and its respective coefficients. All of this analysis will be done to be possible to verify the values of the average frequency of the muscle, dividing its signal in tiny chunks of the time for verify the decay of the average frequency, thus indicating muscle fatigue.

**Keywords**— EMG signals, Continuous Wavelet Transform, Pattern recognition, Muscle fatigue.

**Resumo**— Há uma necessidade de estudar formas de análise para sinais EMG, já que este método não constitui formas invasivas de captação de sinais musculares. Este trabalho tem como foco principal a explicação do funcionamento da análise de sinais EMG utilizando a Transformada Wavelet Contínua, sendo esta apresentada como uma combinação linear de uma *mother* Wavelet e seus respectivos coeficientes. Toda esta análise será efetuada para que seja possível verificar os valores da frequência média do músculo, dividindo o sinal em pequenos pedaços no tempo para a averiguação do decaimento da frequência média, indicando assim, a fadiga muscular.

**Palavras-chave**— Sinais EMG, Transformada Wavelet Contínua, Reconhecimento de Padrões, Fadiga muscular.

### 1 Introdução

A Eletromiografia (EMG) consiste em uma técnica preciosa, pois possibilita que seja realizada uma captura dos sinais provenientes do corpo humano de uma maneira não invasiva. Os sinais eletromiográficos são emitido pelo potencial de grupos de fibras motoras que compõem as unidades motoras (DE LUCA, 2006). Por meio da Eletromiografia é possível analisar os sinais obtidos sem perfurações ou cortes no indivíduo monitorando a atividade elétrica que ocorre nas membranas elétricas excitáveis através de eletrodos alocados na superfície da pele. O sinal EMG é a soma algébrica dos sinais detectados que podem, sofrer interferência de fatores anatômicos, fisiológicos, do sistema nervoso periférico ao redor do ponto analisado e da instrumentação utilizada na coleta de dados (ENOKA, 2000). O sinal é coletado para que seja calculada a frequência média. A diminuição desta indica um decaimento do rendimento muscular provocado pela fadiga gerada no músculo analisado (MANNION, 1996).

O sinal EMG captado necessita de retificação para a obtenção de dados proporcionando assim a sua análise. Para obter tais dados é possível utilizar a Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*), entretanto, as funções que com-

põem as bases de Fourier são invariantes no tempo. Devido a essa análise não local oferecida pela Transformada de Fourier, foi utilizado neste trabalho um algoritmo baseado na Transformada Wavelet Contínua (CWT, *Continuous Wavelet Transform*) visto que esta tem algumas vantagens sobre a Transformada de Fourier, proporcionadas pelas funções bases que a compõem (KUMAR, 2003).

### 2 Materiais e Métodos

#### 2.1 Teoria Aplicada

A primeira menção dos estudos sobre as Wavelet ocorreu em 1909 no apêndice da tese de Alfréd Haar. A função apresentada ofereceu um suporte compacto devido ao fato de ser local, ou seja, tender a zero no infinito. No entanto, a Wavelet Haar não era diferenciável em todo seu intervalo. Apesar disso, a Wavelet passou a ser estudada profundamente a partir de 1930, quando diferentes grupos iniciaram seus estudos verificando a análise de escala propiciada pela Wavelet Haar.

Os estudos sobre as Wavelets avançaram com a descoberta de Stephane Mallat em 1980. Mallat descobriu uma correlação entre filtros de quadratura e as bases ortonormais das Wavelets, desse mo-

do, tornou-se o primeiro a utilizar Wavelets não triviais, mas sem o suporte compacto que era proporcionado pela Wavelet Haar.

Com base nesses estudos, Ingrid Daubechies desenvolveu então seus resultados elaborando suas famílias de Wavelets sendo estas diferenciáveis em toda a sua extensão e possuem um suporte compacto (GRAPS, 1995).

A Transformada Wavelet Contínua pode ser comparada a Transformada de Fourier, pois ambas podem realizar a análise da frequência muscular. Entretanto há algumas pequenas diferenças em sua análise, tal como uma boa verificação em pontos de descontinuidades, que a Transformada de Fourier não possui. Para a exemplificação da vantagem da Transformada Wavelet Contínua em relação a Transformada Rápida de Fourier, pode-se realizar uma breve análise da Figura 1 e em seguida, da Figura 2.

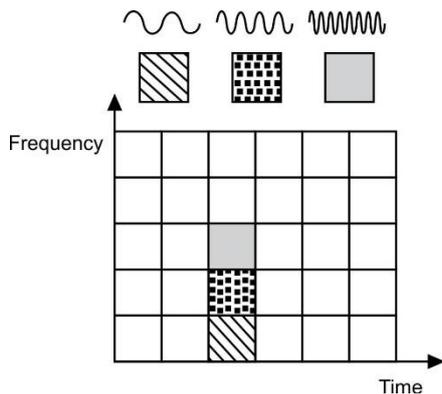


Figura 1: Janelas de análise propiciada pela FFT.  
Fonte: Graps, 1995.

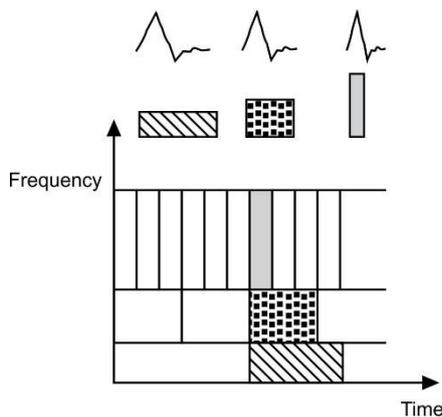


Figura 2: Janelas de análise propiciada pela CWT.  
Fonte: Graps, 1995.

A partir do desenho das janelas obtidas com a Transformada Rápida de Fourier e com a Transformada Wavelet Contínua, fica claro quanto a relação de escalas, ou seja, enquanto a Figura 1 mostra tamanho de janelas fixos, propiciada pela FFT, a Figura 2 evidencia a possibilidade de ajustes das janelas de acordo com o sinal que está sendo processado, sendo isso possível com a CWT. Para a FFT pode-se selecionar um tamanho de janela pequeno para que sua aproximação não seja ruim em pontos descontínuos,

a janela mínima para este método deve ser de 250ms, porém, nos locais onde não houver abruptas intermitências o tamanho da janela será pequeno demais para efetuar a análise (HOSTENS, 2004).

A ideia fundamental da Wavelet é a análise de acordo com a escala. Com esta ferramenta é possível manipular as escalas e resoluções. A Transformada de Wavelet possibilita a observação de pequenas e grandes anomalias, como picos e descontinuidades, de acordo com o intervalo de análise. Por exemplo, em grandes intervalos notam-se as grandes anomalias, reduzindo-se o intervalo é possível observar as anomalias de grau inferior. A Transformada de Fourier tem como base as funções seno e cosseno que realizam uma aproximação muito pobre nas "sharp spikes". Além disso, essas funções são não-locais, ou seja, vão até o infinito. Por sua vez, as Wavelets são boas em brutas descontinuidades.

Para que seja possível efetuar a análise através da Transformada Wavelet Contínua da função, determina-se uma função Wavelet protótipo chamada "analyzing Wavelet" ou "mother Wavelet" (famílias Wavelets). Para a análise temporal é utilizada uma versão em alta frequência da Wavelet protótipo e uma em baixa frequência para a análise da frequência. A Wavelet é escrita através de uma expansão a partir da utilização de coeficientes de uma combinação linear (GRAPS, 1995).

As funções denominadas *mother Wavelets* devem satisfazer duas condições:

- i) Área total igual a zero, ou seja,
 
$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi(t) dt = 0 \quad (1)$$
- ii) Energia finita, ou seja,
 
$$\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(t)|^2 dt < \infty \quad (2)$$

Sendo  $\varphi(t)$  a função que representa a *mother Wavelet*.

A partir da análise destas duas propriedades, pode-se afirmar que estas funções tendem a oscilar abaixo e acima do eixo do tempo.

Entre as várias famílias de Wavelet, optou-se neste estudo pelas pertencentes à família Daubechies: *db4* disponível em Wavelet Toolbox™ de MatLab® v.7.7.

O uso desta ferramenta se dá a partir da necessidade em encontrar a frequência média dos sinais obtidos. Esta frequência média é definida como a frequência que divide a energia do sinal em duas partes iguais.

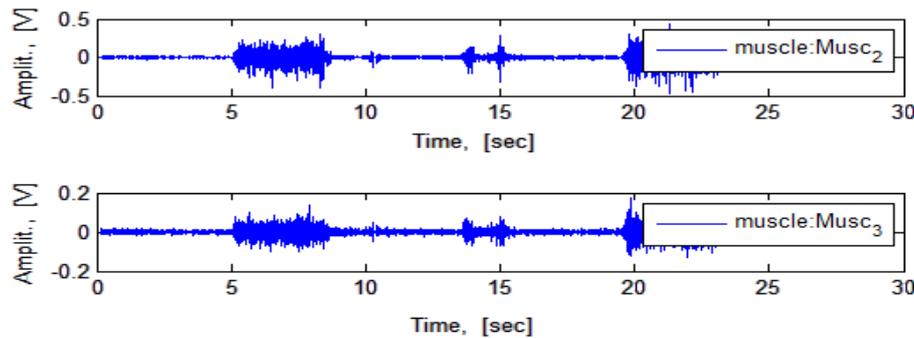


Figura 3: Sinais EMG coletados.

$$\int_0^{freq.m\acute{e}dia} S_w(f)df = \int_{freq.m\acute{e}dia}^{f_{off}} S_w(f)df \quad (3)$$

$$W_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \int f(t)\varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (4)$$

Sendo  $S_w(f)$  o sinal representado no domínio da frequência; a freq. média é a frequência média que divide o sinal em duas partes, sendo que cada parte contém a mesma quantidade de energia e;  $f_{off}$  é a frequência máxima analisada definida por um filtro, por isso a frequência máxima é igual a frequência máxima permitida pelo filtro. Tem-se que a mínima frequência de corte do filtro deve ser duas vezes a frequência do sinal da amostra.

### 3 Transformada Wavelet Contínua

O cálculo da Transformada Wavelet Contínua gera um conjunto de coeficientes da seguinte forma. O primeiro coeficiente é calculado refletindo o grau de semelhança entre uma parte do sinal e a *mother* Wavelet. A *mother* Wavelet é traduzida no tempo, e outro coeficiente é obtido. Esse processo ocorre repetidamente enquanto dura o sinal, sendo essa duração do sinal definida pela escala dada, ao final desse pequeno intervalo de tempo é obtido um conjunto de coeficientes que, juntamente com a *mother* Wavelet, representam o sinal. Após o término desse processo, a partir de outra definição de escala, todo o processo de cálculo de coeficientes é repetido. Então os coeficientes são gerados para cada valor de escala previamente determinado. Portanto, a Transformada Wavelet Contínua produz coeficientes que representa a similaridade, ou seja, “o quanto é igual”, a *mother* Wavelet do sinal original analisado, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência (SPARTO, 1999).

Utilizando-se o princípio de que qualquer função pode ser representada por uma combinação linear, pode-se reescrever um sinal utilizando os seus coeficientes característicos e uma *mother* Wavelet. O sinal obtido com a Transformada Wavelet mantém as propriedades da *mother* Wavelet. Matematicamente, tal transformada pode ser representada conforme equação (4):

Os fatores  $a$  e  $b$  indicam os parâmetros de escala e translação, respectivamente. O termo  $1/\sqrt{a}$  é uma parametrização para que seja garantida uma energia unitária do sinal.

A frequência média do sinal analisado foi calculada mediante a criação de um algoritmo, cujos procedimentos são enumerados a seguir.

- 1 - Subdivisão em pequenos fragmentos de tamanho igual a 1 segundo do sinal.
- 2- Cálculo de 128 coeficientes da Transformada Wavelet Contínua para cada intervalo definido.
- 3 - Comparação entre a posição do vetor onde foi armazenado os valores dos coeficientes e o ponto onde a energia era a metade da energia total do fragmento de tempo.

Pelo fato da frequência média mostrada na equação 3 ser definida como a frequência que divide a energia do sinal na metade, bastou utilizar o coeficiente da transformada que também divide a energia na metade e encontrar a frequência média no pequeno intervalo de tempo.

Para que o sinal fosse totalmente analisado através do algoritmo implementado, obteve-se a frequência média para cada intervalo de tempo. Assim então, foi efetuada uma linearização destes valores que permitiu visualizar o decrescimento da frequência enviada ao músculo para que este executasse a ação, caracterizando assim, a fadiga muscular. O algoritmo implementado utilizou a Daubechies: *db4* para executar a análise do sinal EMG.

### 4 Aplicação da Transformada Wavelet Contínua em um sinal EMG

A Figura 3 mostra dois sinais EMG coletados pelo grupo de pesquisa da Universidade Estadual de Londrina que utilizaram um *eletromiograph* 16 canais (MP150™, Biopac Sistema®, EUA), com taxa de amostragem de 2000 Hz, sendo esta frequência é maior do que duas vezes a frequência do sinal coletado, de acordo com o Teorema da Amostragem (OPPENHEIM, 2010).

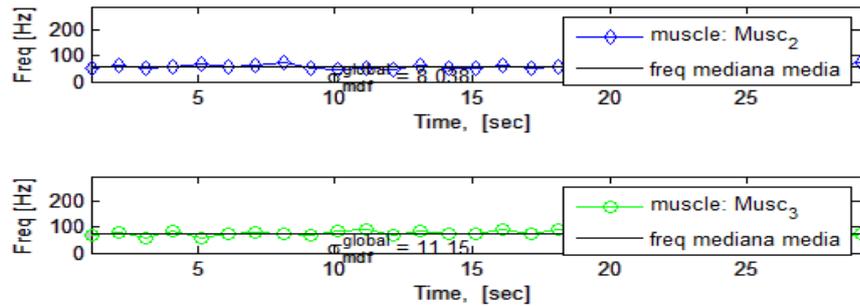


Figura 4: Linearização das frequências obtidas em cada intervalo.

Este sinal foi obtido enquanto o voluntário executava um exercício de repetição em um *ciclosimulator* (*CompuTrainer DYNAFIT™, RacerMate®*, USA) há uma velocidade de 90 rpm, o teste era finalizado quando o indivíduo permanecia abaixo de 85 rpm por mais de cinco segundos (CAMATA, 2010). O sinal mostrado na Figura 3 será tratado com a Transformada Wavelet Contínua. A Figura 4 mostra esse mesmo sinal após o tratamento.

A Figura 4 apresenta o valor da frequência média de cada intervalo calculado e a linearização dos valores de cada frequência média no tempo após a aplicação algoritmo de implementação das Wavelets.

Observando a linearização dos valores médios obtidos, percebe-se claramente que esta decresce de acordo com o aumento do tempo em que o indivíduo permanece executando o exercício. Contudo é possível relacionar o coeficiente desta reta com a taxa de cansaço do voluntário, ou seja, quanto maior este coeficiente, mais rápido ocorre a fadiga do músculo, pois quanto menor a frequência de impulsos elétricos, mais fadigado o músculo estará. Então, a fadiga pode ser definida de forma básica como o declínio no desempenho ou rendimento na execução de um esforço repetitivo (MANNION, 1996).

## 5 Conclusão

Neste artigo foi realizado uma introdução ao funcionamento básico de um algoritmo para tratamento de sinais EMG a partir do cálculo transformada Wavelet Contínua.

Há um grande interesse em métodos de analisar um sinal eletromiográfico, EMG, haja visto que a obtenção deste é realizada de forma não invasiva, eliminando assim os riscos que um procedimento invasivo poderia acarretar ao indivíduo.

A Transformada Wavelet Contínua, tal como a Transformada de Fourier, vem a ser um método que pode ser utilizado para efetuar a análise do sinal EMG.

A partir da análise deste sinal é possível identificar a frequência média do músculo e com a linearização, observa-se o decaimento de tal frequência. Portanto, com base na frequência média obtida fica claro o recuo da capacidade de um indivíduo em executar uma tarefa, caracterizando desta forma a fadiga muscular (KUMAR, 2003).

## Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Tecnológica Federal do Paraná- UTFPR e a Fundação Araucária (projeto no. 338/2012) pela possibilidade de desenvolvimento da pesquisa.

## Referências Bibliográficas

- De Luca, C. J.; Adam, A.; Wotiz, R.; Gilmore, L. D.; Nawab, S. H. (2006). Decomposition of surface EMG signals.
- Graps, A (1995). Introduction to a Wavelet.
- Hostens, I. ; Seghers, J. ; Spaepen, A. ; Ramon, H. (2004). Validation of the wavelet spectral estimation technique in biceps brachii and brachioradialis fatigue assessment during prolonged low-level static and dynamic contractions.
- Kumar, D. K.; Pah, N. D. (2003). Wavelet Analysis of Surface Electromyography to Determine Muscle Fatigue.
- Mannion, A.F.; Dolan, P (1996). Relationship between myoelectric and mechanical manifestations of fatigue in the quadriceps femoris muscle group. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* DOI: [10.1007/BF02337721](https://doi.org/10.1007/BF02337721)
- Sparto, P. J.; Parnianpour, M.; Barria, E. A.; Jagadeesh, J. M. (1999). Wavelet Analysis of Electromyography for Back Muscle Fatigue Detection During Isokinetic Constant-Torque Exercises.

Oppenheim, A. V.; Schafer, R. W. (2009). Discrete-Time Signal Processing. 3ª edição.

Camata, T. V.; Dantas, J. L.; Abrão, T.; Brunetto, M. A. O. C.; Moraes, A. C.; Altimari, L. R. (2010). Fourier and Wavelet Spectral Analysis of EMG signal in Supramaximal Constant Load Dynamic Exercise.