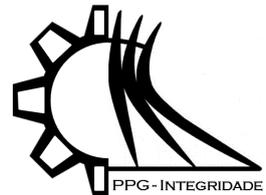




SSN 2447-6102



Article

# Uso de Transformadas de Ondaletas na Avaliação de Intermitência em sinal Discretos

Fernanda P. Cyrne<sup>1,a</sup>, Alexandre A. Melo<sup>2,a</sup> e Jhon N. V. Goulart<sup>3,a</sup>

fernandacyrne@gmail.com<sup>1</sup>, jucaalencarmelo@gmail.com<sup>2</sup>, jvaz@unb.br<sup>3</sup>

<sup>a</sup>Grupo de Mecânica Experimental e Computacional – Universidade de Brasília  
Área Especial de Indústria Projeção A – Gama, DF, Brasil – CEP 72.405-610.

Received: 15/12/2019; Accepted: 28/12/2019; Published: 21/02/2020

**Resumo:** Esse artigo tem como objetivo aplicar transformada contínua de ondaletas – CWT – na análise de sinais transientes com e sem intermitências. Para a avaliação foram empregadas tais técnicas de análise tempo-frequência a dois sinais didáticos e um sinal experimental real de flutuação de velocidade proveniente de uma sonda de fio quente. Em todos os casos, a transformada de ondaletas conseguiu identificar períodos com baixas energéticas mostrando-se eficiente na identificação de intermitências ou anomalias nos sinais.

**Palavras-Chave:** intermitência, ondaletas, transformada contínua de ondaletas – cwt, análise de sinais no tempo-frequência

**Abstract:** This paper aims to apply continuous wavelet transform - CWT - in the analysis of the transient signals with and without intermittency. For that evaluation, time-frequency analysis techniques were employed for two didactic signals and an experimental signal from velocity fluctuation. The velocity signal was acquired by a single hot wire probe. In all cases, the wavelet transform was able to identify periods with low energy levels, showing to be efficient in the identification of intermittency or anomalies in the signals.

**Palavras-Chave:** intermittency, wavelets, continuous wavelets transform – cwt, time-frequency signal analysis

## 1. Introdução

A análise de sinais é o estudo e caracterização das propriedades básicas de sinais (Klein, 2004). O estudo de séries temporais pode ser dividido em dois tipos característicos, os sinais estacionários e os sinais não-estacionários. Os primeiros mantem as propriedades ao longo do tempo, não sendo necessário determinar onde ocorrem as componentes de frequência e os demais são mais complexos, com fenômenos intermitentes e variações de frequência ao longo do tempo (Macedo, 2016). Técnicas clássicas de processamento digital de sinais, análise estatística de séries temporais, análise de correlação e transformada rápida de Fourier têm sido utilizadas para detectar falhas de componentes em plantas industriais. Entretanto, os resultados têm demonstrado que estas técnicas não são suficientes para detectar anomalias não repetitivas ou cuja ocorrência se dá num período de tempo muito curto, ou para analisar sinais em condições não estacionárias. Os escoamentos turbulentos apresentam sinais com amplo espectro de energia, possuindo uma larga banda de frequências, ou seja, apresentam estruturas com baixas e altas frequências. As interações entre estruturas de tamanhos e frequências variadas constituem um refinado e complexo processo de troca de energia altamente dependente do tempo (Neiva, 2007). Sinais não-estacionários podem ser analisados através de técnicas de tempo frequência ou tempo-escala. A transformada de ondaletas é um exemplo desse artifício, que possibilita uma análise detalhada do sinal, por permitir a localização na frequência e no tempo (Farge, 1992). Em sinais experimentais de escoamentos, é possível identificar regimes não estacionários (Indrusiak, 2004) e períodos de intermitência (Olinto, 2005).

O objetivo dessa pesquisa é utilizar transformadas contínuas de ondaletas na identificação de intermitências em sinais. Para tanto, dividiu-se em uma análise inicial comparativa de transformadas de Fourier e de ondaletas com um



senal seno didático, uma análise mais detalhada com um sinal quadchirp modificado e, finalmente, a aplicação da metodologia em um sinal de flutuação de velocidade oriundo de um escoamento turbulento.

## 2. Materiais e Métodos

Nesse trabalho foram avaliados três tipos de sinais. O primeiro foi um sinal senoidal  $f(t)$  com tempo,  $t$ , frequência de aquisição,  $f_a$  e ângulo de fase,  $\phi$ , completamente definidos, como na Eq (1).

$$y = \text{sen}(2\pi ft) + \phi \quad (1)$$

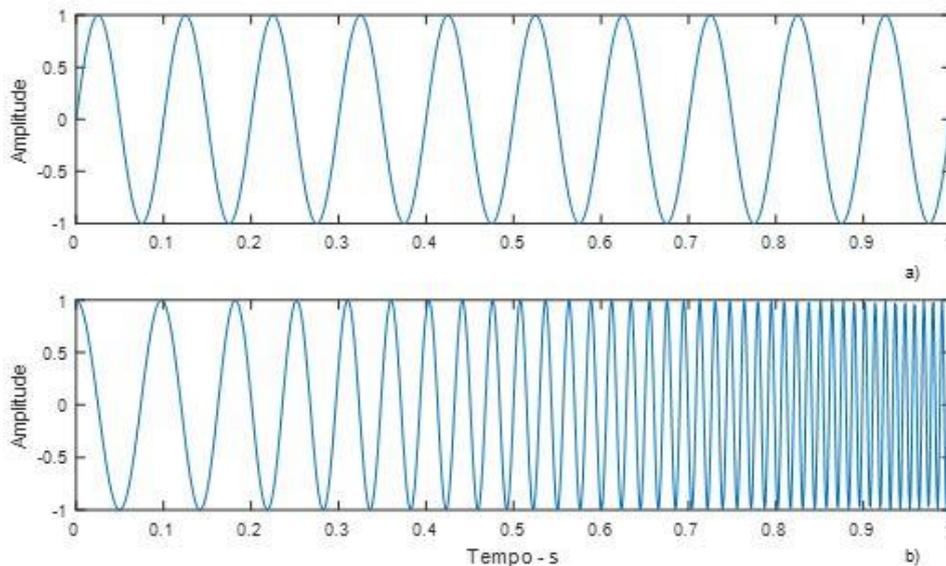
onde  $f$  é a frequência fundamental do sinal, 10 Hz, e  $\phi$  é zero. A frequência de aquisição do sinal foi de 1000 Hz.

O segundo sinal escolhido foi o sinal quadchirp do aplicativo computacional Matlab®. O sinal é descrito por uma função co-senoidal que possui valores instantâneos de frequência fundamental a medida que o tempo passa (Coifman, 1995). A variação da frequência fundamental do sinal com o tempo pode ser de forma linear, quadrática ou logarítmica. Nesse trabalho foi utilizado a dependência quadrática da frequência com o tempo. A frequência fundamental do sinal pode então ser calculada como escrito na Eq. (2).

$$f_{(t)} = f_o + \beta t^n \quad (2)$$

$$\beta = \frac{(f_1 - f_o)}{t_1^n}$$

No conjunto de Eq (2),  $f(t)$  é a frequência ao longo do tempo,  $f_o$  é a frequência instantânea no tempo inicial,  $t_o$ ,  $f_1$  é a frequência instantânea no tempo  $t_1$ . O expoente “ $n$ ” indica o tipo de dependência entre frequência e tempo. Para um valor unitário de “ $n$ ”, a dependência é linear. Nesse trabalho é utilizada uma dependência quadrática,  $n = 2$ . Nesse trabalho  $f_o = 10$  Hz,  $f_1 = 100$  Hz, no tempo  $t_1 = 1$  s, como mostra a Fig. (1).



**Figura 1.** Sinais a serem avaliados. a) senoide de frequência fundamental constante no tempo, 10 Hz. b) sinal senoidal de frequência fundamental variando de forma quadrática com o tempo.

O último sinal é um sinal de flutuação de velocidade proveniente de uma sonda de fio quente. O sinal foi adquirido com frequência de aquisição de 1000Hz e filtro e digitalizado em uma placa de aquisição NI 9215 – USB – 16 bits. Os dados foram filtrados utilizando-se um filtro passa baixa de 300 Hz. Esse sinal de flutuação de velocidade é adquirido em uma região do escoamento turbulento onde é esperado a presença de grandes vórtices.

Grandes e energéticos vórtices no escoamento turbulento podem ser reconhecidos por sua assinatura nos traços de flutuação de velocidade. No escoamento turbulento é esperado uma composição randômica do sinal, sem qualquer parte coerente, no entanto, grandes vórtices, quando presentes no escoamento, imprimem um sinal de flutuação de velocidade quase-periódico, geralmente, com uma frequência muito bem definida.

A característica desse sinal a ser analisado é sua larga banda de frequência, levando assim a uma baixa definição de sua frequência fundamental e por conseguinte da dinâmica do escoamento. Uma das causas dessa característica pode ser a presença de processos intermitentes na formação de estruturas coerentes (grandes vórtices) na região do escoamento em análise. A figura 2 (a) e (b) mostra dois traços do sinal de flutuação de velocidade. Na Fig. 2 (a) são

mostrados os primeiros 500 ms do sinal e na sequência os próximos 500 ms. Pode-se notar que nos primeiros 500 ms (Fig. 2 (a)), o traço de flutuação de velocidade, aparentemente, apresenta componentes periódicas, enquanto que no próximo período (Fig. 2(b)), essa componente parece desaparecer.

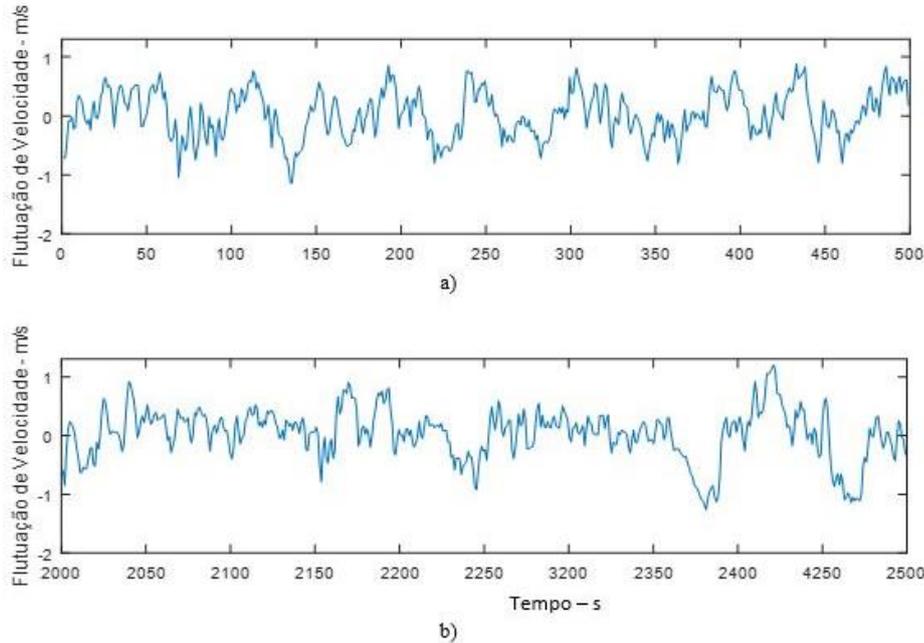


Figura 2. Traços de flutuação de velocidade medidos com uma sonda de fio quente.

### 2.1 Modelagem Matemática

Transformada de Fourier - FFT e a Transformada Contínua de Ondas - CWT

A transformada de Fourier é um artifício matemático que permite a análise de um sinal em função da frequência. Para uma série temporal infinita  $f(t)$ , essa é dada pela Eq. (3).

$$\hat{X}(f) = \frac{1}{2\pi} \int f(t) e^{-ift} dt \tag{3}$$

Em que  $(X(f))$  são os coeficientes de Fourier. A função de densidade espectral de potência (PSD) indica a energia do sinal dividida em bandas de frequência e pode ser obtida pela Eq. (4).

$$P_{xx(f)} = |\hat{X}(f)|^2 \tag{4}$$

Enquanto funções trigonométricas (senos e cossenos) são a base da transformada de Fourier, que levarão, uma vez somadas, a recomposição do sinal original, a transformada de ondaleta é um conjunto de coeficientes que surge da dilatação e translação de uma ondaleta mãe (De Melo et al., 2017).

As funções trigonométricas em que o sinal original é decomposto na transformada de Fourier lidam apenas com amplitude e frequência, excluindo as informações no tempo (Bueno, 2008). Diferentemente, a transformada de ondaletas aparece como uma opção para casos em que essas informações no tempo não podem ser descartadas. Tal característica pode tornar a ferramenta valiosa no estudo de anomalias em sinais.

A transformada contínua de ondaletas – CWT, é uma ferramenta matemática baseada em representações quadradas integráveis que permitem decompor séries temporais para o espaço do tempo-frequência (Torrence, 1998). Essa técnica utiliza a superposição de variações de uma mesma função, chamada ondaleta mãe, por meio de vetores de correlação, chamadas de coeficientes. A Eq (5) é a equação que rege a CWT.

$$X_{(a,b)} = \int_t \psi_{a,b}(t) dt \rightarrow a, b \in R, a \neq 0 \tag{5}$$

Onde  $\psi_{a,b}(t)$  são as funções de ondaletas e  $a$  e  $b$  são os parâmetros de escala (frequência) e translação. A potência do sinal em uma certa frequência e tempo pode ser obtido pela Eq. (4), assim como foi feito com a transformada de Fourier, e disposta em um escalograma. Ele permite analisar se o sinal em questão possui

características multi-escalares e quais escalas participam do processo descrito, observando a variabilidade temporal do sinal.

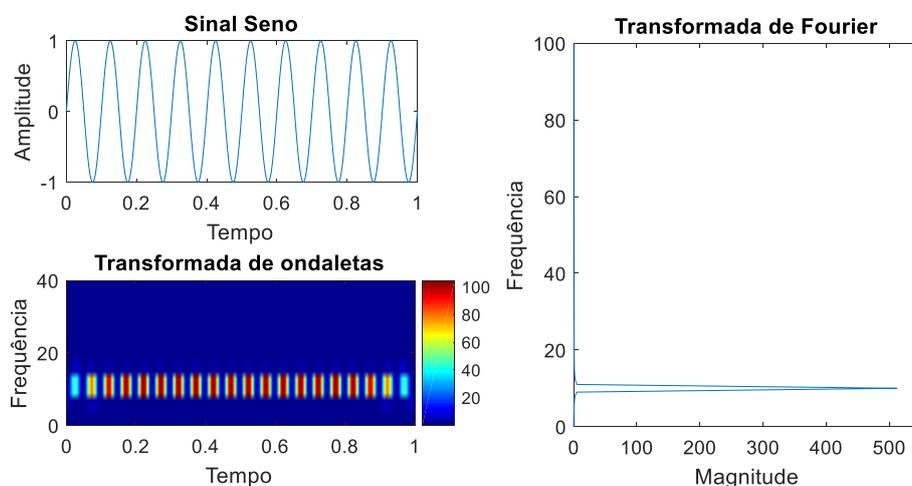
A frequência associada a uma escala pode ser calculada com a Eq. (6).

$$f = \frac{F\psi F_s}{a} \quad (6)$$

Onde  $F_\psi$  é a pseudo-frequência da ondaletas mãe e  $F_s$  é a frequência de amostragem dos dados, no presente trabalho,  $F_s = 1000$  Hz, (Abry, 1997).

### 3. Resultados e Discussão

A Fig. 3 (a), (b) e (c) mostra o sinal senoidal e suas Transformada Rápida de Fourier e sua Transformada Contínua de Ondaletas (Continuous Wavelets Transform – CWT) Na Fig. 3 (a), o sinal senoidal tem ângulo de fase zero e frequência fundamental de 10 Hz, constante ao longo do tempo, como na Eq. 1.



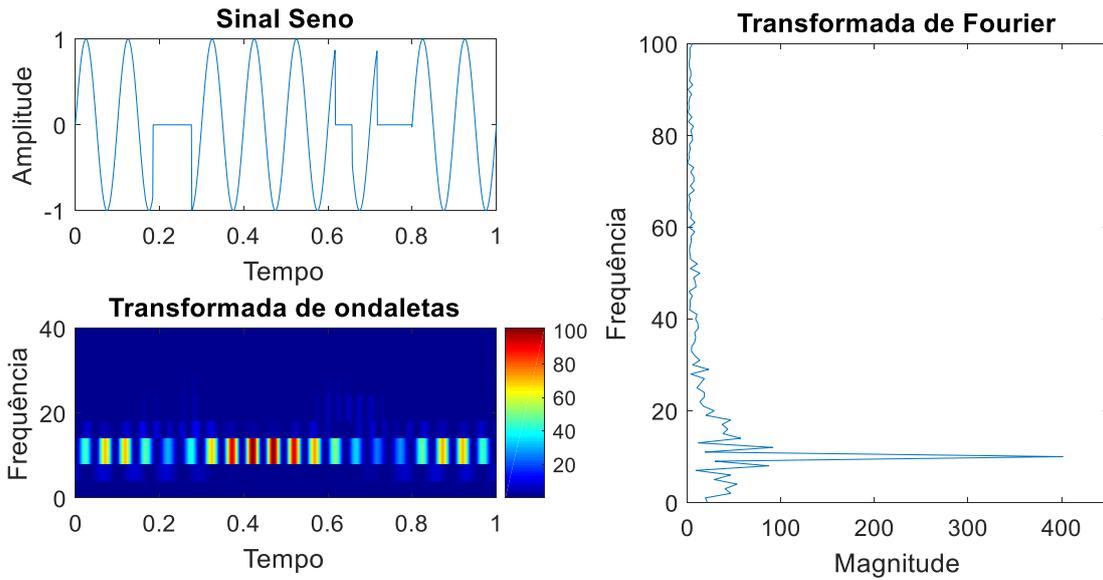
**Figura 3.** a) Sinal senoidal de frequência constante  $f = 10$  Hz e sem intermitência. b) Transformada de Fourier do sinal. c) Transformada de ondaletas do sinal

Nota-se na Fig. 3 (b) que a Transformada Rápida de Fourier é, como previsto, capaz de avaliar a resposta dinâmica do sinal. O maior coeficiente de Fourier está localizado exatamente na frequência de 10 Hz. A transformada de ondaletas da Fig. 3 (c) concentra as maiores energias na frequência de 10 Hz como esperado.

Na figura 4 (a), o mesmo sinal é artificialmente descontínuo em alguns pontos. Os pontos de descontinuidade foram randomicamente escolhidos. A distribuição dos coeficientes de Fourier e a CWT são mostradas na Fig. 4 (b) e (c), respectivamente.

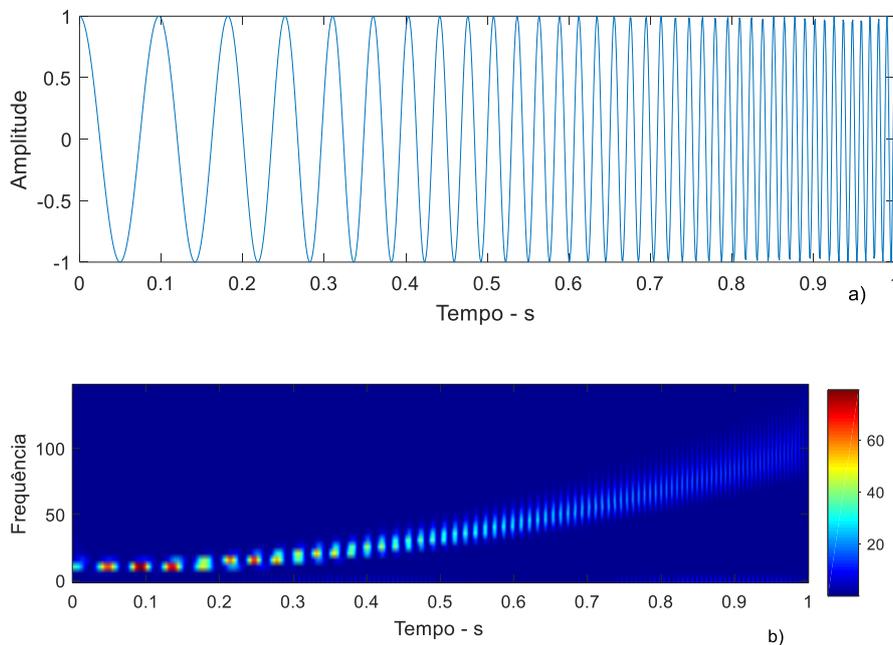
Novamente a Transformada Rápida de Fourier, Fig. 4 (b), que foi capaz de extrair a frequência fundamental do sinal, apesar das descontinuidades impostas. Contudo, algumas diferenças em relação a Fig. 3 (b) podem ser vistas. A distribuição dos coeficientes de Fourier em bandas de frequência mostrou o fenômeno de leakage próximo a frequência fundamental, o que não foi visto no sinal sem intermitência. Pode-se notar também que o sinal senoidal puro apresentou um pico de maior amplitude na banda de frequência relativa a 10 Hz, quando comparado ao sinal modificado.

A CWT, Fig. 4 (c), apresenta um comportamento diferente da transformada da Fig. 3 (c). As maiores energias continuam concentradas na frequência relativa a 10 Hz, contudo existem discrepâncias no padrão de distribuição de coeficientes nos períodos relativos a descontinuidades do sinal entre os tempos de 0,20 até 0,30 segundos e 0,70 até 0,80 segundos.



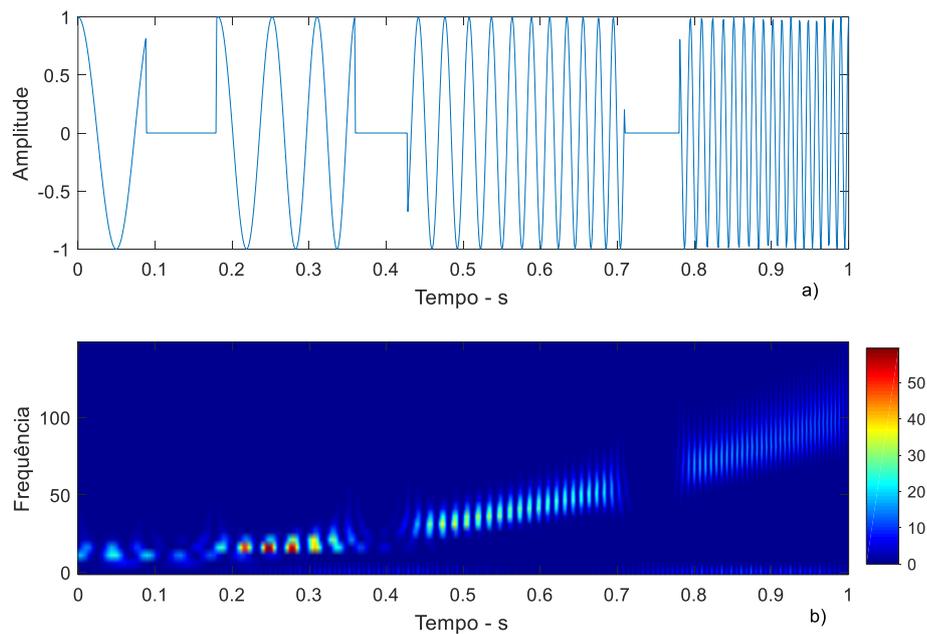
**Figura 4.** a) Sinal senoidal de frequência fundamental  $f = 10$  Hz e com intermitência. b) Transformada de Fourier do sinal. c) Transformada de ondaletas do sinal

A mesma técnica foi aplicada ao sinal quadchirp, Fig. 1 (b). Descontinuidades aleatórias foram impostas ao sinal, contudo, a transformada de Fourier não foi utilizada, utilizou-se somente a transformada de ondaletas, CWT. Na Fig. 5 (a) e (b) é mostrado o sinal quadchirp e sua transformada contínua de ondaletas - CWT, respectivamente. Da fig. 5 (b) pode-se ver que a utilização da transformada de ondaletas concorda de forma correta com a representação de sinal. Os maiores coeficientes possuem uma distribuição quadrática em função do tempo e estão localizados nas frequências em que o sinal fora gerado, obedecendo a Eq. 2.



**Figura 5.** a) Sinal quadchirp de frequência variável sem intermitências. b) Transformada de ondaletas do sinal.

Intermitências artificiais e randômicas foram impostas ao sinal quadchirp, Fig. 6 (a). Na Fig. 6 (b) a distribuição dos coeficientes de ondaletas como função do tempo e frequência conserva a dependência quadrática dos coeficientes mais energéticos com o tempo, porém, nos pontos onde o sinal apresenta descontinuidades em sua dinâmica periódica a CWT mostra coeficientes próximos a zero. O resultado mais expressivo acontece entre os tempos de 0,70 e 0,80 s, onde o algoritmo randômico anula o sinal nesse intervalo de tempo.



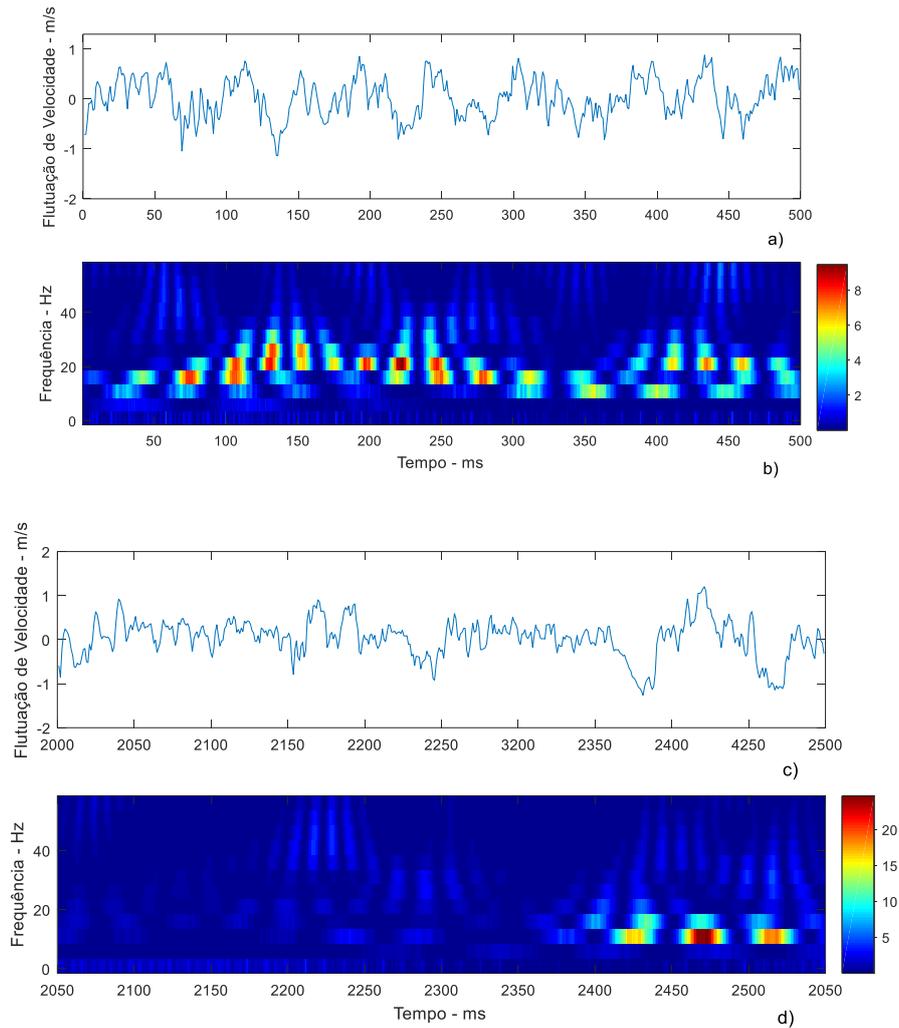
**Figura 6.** a) Sinal quadchirp de frequência variável com intermitências. b) Transformada de ondaletas do sinal intermitente.

Em ambos os mapas de coeficientes dos sinais modificados o padrão de distribuição de coeficientes da transformada de ondaletas foi modificado no tempo em que ocorre a descontinuidade do sinal. Desta forma, a transformada contínua de ondaletas foi capaz de identificar a intermitência imposta no sinal.

Como já explanado anteriormente o terceiro sinal a ser avaliado é um sinal de flutuação de velocidade oriundo de uma sonda de fio quente. Traços temporais desse sinal são apresentados na Fig. 7 (a), (b), (c) e (d). Os traços são de 500 ms de duração.

É importante notar que em diferentes locais da série temporal de velocidade o escoamento possui diferentes características dinâmicas no que diz respeito a frequência do aparecimento de grandes vórtices. Ainda mais, através da CWT, Fig 7 (b) e (d), nota-se que coeficientes energéticos estão diferentemente localizados em termos de frequência. No caso da Fig. 7 (b) (primeiros 500 ms de aquisição de flutuação de velocidade) a os coeficientes mais energéticos quase não são função do tempo, ou seja, vórtices estão presentes no escoamento durante todo o tempo de 500 ms e possuem uma frequência de aparecimento de, aproximadamente, 10 Hz.

No que diz respeito a Fig. 7 (c), que compreende o tempo de 2000 até 2500 ms da série temporal de velocidade, nota-se que o comportamento quase-periódico do sinal desapareceu, implicando em um sistema intermitente de geração de grandes vórtices na região estudada. A Fig 7 (d) mostra a distribuição dos coeficientes de ondaletas para esse traço de sinal. O mapa de coeficientes corrobora com o que foi visualizado no sinal de flutuação. Nos primeiros 400 ms desse traço de velocidade não há quaisquer coeficientes mais energéticos, estes somente aparecerão transcorrido esse tempo.



**Figura 7.** Traços de flutuação de velocidade de a e b) 0-500 ms e c e d) 2000-2500ms.

#### 4. Conclusão

Neste trabalho foi apresentada uma análise numérica de sinais transientes da presença de intermitências em sinais. O objetivo principal foi avaliar a eficiência do uso da transformada de ondaletas em comparação com a transformada de Fourier, assim como validar o seu uso para sinais didáticos e experimentais. Foram empregadas ferramentas computacionais com o aplicativo computacional Matlab®.

Os resultados obtidos permitiram observar que a transformada de Fourier é capaz de extrair a frequência fundamental do sinal senoidal de frequência constante, porém não identifica características referentes a intermitência. Com a aplicação da transformada de ondaletas contínuas no mesmo, as maiores energias continuaram concentradas na frequência fundamental e mudança no padrão dos coeficientes nas discontinuidades. Um padrão semelhante foi obtido ao aplicar a CWT no sinal senoidal de frequência variável quadchirp. Os coeficientes seguiram a distribuição quadrática ao longo do tempo, conforme equação de governo, e apresentaram valores próximos a zero nas discontinuidades do sinal. Desta forma, é possível fazer a identificação das intermitências com a aplicação da transformada contínua de ondaletas.

O sinal experimental real de flutuação de velocidade oriundo de uma sonda de fio quente utilizado possui diferentes características dinâmicas em relação a frequência de aparição de vórtices, conforme esperado para um escoamento turbulento. Com a aplicação do CWT nos primeiros 500 ms do sinal, os maiores coeficientes possuem localização quase independente do tempo, confirmando a presença de vórtices com frequência de aparecimento próximas de 10 Hz. Esse comportamento quase-periódico é modificado no trecho de 2000 a 2500 ms, gerando intermitências. A distribuição dos coeficientes consegue identificar a ausência de velocidade, conforme esperado com o uso de transformada contínua de ondaletas.

## Agradecimentos

Fernanda Cyrne agradece ao CNPq pela concessão de bolsa de Iniciação Científica. Alexandre Alencar de Melo agradece a FAPDF pelo apoio financeiro e bolsa IC através do projeto n° 193.001356/2016 (FAPDF). Dr. Jhon Goulart também agradece ao CNPq e FAPDF pela concessão de auxílio financeiro através dos projetos FAPDF e CNPQ n°, 193.001.158/2015, 193.001356/2016 e 408869/2016-0, respectivamente.

## Referências

1. Abry, P. 1997. "Ondlettes et Turbulence, Multirésolutions, Algorithms de Décomposition, Invariance D'échelles", Diderot Editeur, Paris.
2. Bueno, R. F. 2008. "The application of the Fourier and wavelet transform to altitude differences of temporal series, set ot by GPS, acopled a shaker at USP bases", Bol. Cien. Geo. 14, pag 557-570.
3. Coifman, R. R., Donoho, D. L, 1995. "Translation-invariant de-noising", Wavelets and statistics, Springer, New York, NY, pp. 125-150.
4. De Melo, T., Goulart, J. N. V., Anflor, C. T. and Domingues, E. "Experimental Investigation of the Velocity Time-traces of the Turbulent Flow in a Rectangular Channel With a Lateral Slot", European Journal of Mechanics/B Fluids. 62 (2017) 130 – 138.
5. Farge M., 1992. "Wavelet Transforms and their Applications to Turbulence", Anual Review of Fluid Mechanics. Jan 1992.
6. Indrusiak, Maria Luiza Sperb, 2004. "Caracterização de escoamentos turbulentos transientes usando a transformada de ondaletas", Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
7. Klein, Fabiana Lopes, 2004. "Análise tempo-freqüência de regimes de escoamento bifásico gás-líquido intermitentes em tubo horizontal". Diss. Universidade de São Paulo.
8. Macedo, Humberto Gimenes; Da Luz Sodré, Zuleika Auxiliadora; Fernandes, Francisco Carlos Rocha, 2016. "Aplicação de wavelets na análise de rádio emissões solares". Revista Univap,
9. Neiva, R. Q., Sousa, A. J., Coelho, J. G., Junior, A. C. P. B., 2007, "Experimental and Numerical Study of the Swirling Flow in Conical Diffusers", 19th International Congress of Mechanical Engineering, ABCM, Brasília, Brasil
10. Olinto, Cláudio Rodrigues, 2005 "Estudo experimental das características do escoamento turbulento nas primeiras fileiras de bancos de tubos".
11. Torrence C. and Compo G. P., 1998. "A Practical Guide to Wavelet Analysis", Bulletin of the American Society Vol 79, Jan 1998 ABCM, 2004. "Journal of the Brazilian Society of Engineering and Mechanical Sciences". 1 Feb. 2007.