

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

REMOÇÃO DE PICOS E RUÍDOS DE MEDIÇÕES POR ADV PARA ANÁLISE ESPECTRAL DA ENERGIA TURBULENTA

*Renzo de Freitas Dusi¹; Leonardo Zandonadi Moura²; Pâmela Ravena da Costa Silveira³ &
Arthur Tavares Schleicher⁴*

Abstract: The Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) is a well-established instrument for measuring three-dimensional velocity in flows, based on previous studies. However, its data presents inherent errors related to the equipment, which can lead to distortions in the analysis of turbulent parameters. In this work, a two-step post-processing method is proposed: the removal of anomalous spikes using the Phase-Space Threshold method and the attenuation of noise through the Wavelet Threshold method. The method was evaluated using data from a laboratory experimental channel by analyzing velocity profiles and the one-dimensional turbulent energy spectrum, before and after its application. After processing, it was observed that signal impurities tend to overestimate turbulent fluctuations. In addition, it was possible to identify the inertial subrange of the spectrum and, therefore, to estimate the Kolmogorov scales, which were consistent with theoretical predictions. The results indicate that the proposed post-processing step proved to be effective for the analysis of data obtained by ADV.

Resumo: O Velocímetro Doppler Acústico (ADV) é um instrumento consolidado para a medição da velocidade tridimensional em escoamentos. No entanto, seus dados apresentam erros inerentes ao equipamento, os quais geram distorções na análise de parâmetros turbulentos. Neste trabalho, propõe-se um método de pós-processamento em duas etapas: a remoção de picos anômalos com base no método Limiar no Espaço de Fases e a atenuação de ruídos por meio do método Supressão de Coeficientes Wavelet. A partir de um canal experimental laboratorial, o método foi avaliado por meio da análise dos perfis de velocidade e do espectro unidimensional da energia turbulenta, antes e depois de sua implementação. Observou-se, após o processamento, que as impurezas no sinal tendem a superestimar as flutuações turbulentas. Além disso, foi possível identificar a faixa inercial do espectro e, portanto, estimar as escalas de Kolmogorov, sendo coerentes com estimativas teóricas realizadas. Os resultados indicam que a etapa de pós-processamento proposta mostrou-se ser eficiente para a análise de dados obtidos por ADV.

Palavras-Chave: Velocímetro Doppler Acústico; Turbulência; Pós-processamento.

INTRODUÇÃO

A análise experimental das propriedades turbulentas de um escoamento depende diretamente da capacidade de se obter a velocidade média e suas flutuações. Nesse contexto, o Velocímetro Acústico Doppler (ADV) apresenta-se como uma solução eficiente, uma vez que permite a medição instantânea dos três componentes da velocidade em um ponto fixo no espaço por meio de um volume

1) Doutorando no Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – Universidade de Brasília (PTARH – UnB); e-mail: renzodus@gmail.com

2) Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília (ENC – UnB); e-mail: lzmoura@unb.br

3) Graduanda em Engenharia Civil – Universidade de Brasília (UnB); e-mail: pamelaravenasilveira@gmail.com

4) Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília (ENC – UnB); e-mail: aschleicher@unb.br

amostral afastado dos sensores físicos. Uma de suas principais vantagens é o fato de, embora seja um equipamento essencialmente intrusivo, a distância entre o volume amostral e os componentes físicos do ADV ser grande o suficiente para minimizar a interferência no escoamento (Kraus *et al.*, 1994). Dessa forma, o ADV pode ser utilizado para a obtenção de diversos parâmetros turbulentos, como a energia cinética turbulenta, tensões de Reynolds, velocidade de fricção, espectro de energia e escalas de Kolmogorov (Voulgaris e Trowbridge, 1998; Cea *et al.*, 2007).

Por outro lado, uma das principais limitações do ADV está nos erros de medições inerentes ao sistema, os quais podem ser agrupados em três categorias: (i) erros de amostragem, relacionados à frequência de amostragem e a faixa operacional de velocidade do instrumento; (ii) ruído Doppler, intrínseco à utilização do efeito Doppler como técnica de medição; e (iii) erros causados por elevados gradientes de velocidades dentro do volume amostral (McLelland e Nicholas, 2000). O primeiro tipo de erro pode levar à ocorrência de *aliasing*, gerando picos pontuais nas séries temporais, que nem sempre são facilmente distinguíveis de flutuações reais do escoamento (Goring e Nikora, 2002). O segundo, o ruído Doppler, pode ser aproximado por um ruído branco gaussiano, em que, mesmo não alterando a velocidade média do escoamento, pode gerar alterações na energia total e comprometer a análise espectral de energia (Lohrmann *et al.*, 1994; Nikora e Goring, 1998). Já o terceiro tipo de erro decorre da coexistência de múltiplas escalas de turbulência dentro do volume de medição, sendo uma consequência natural dessa abordagem.

Diante desses desafios, o presente estudo propõe a implementação de um método de pós-processamento voltado à limpeza das componentes de velocidade obtidas por ADV. Esse método consiste em duas etapas: remoção dos picos anômalos decorrentes do *aliasing* por meio do método Limiar no Espaço de Fases, proposto por Goring e Nikora (2002); e atenuação do ruído Doppler pelo método Supressão dos Coeficientes Wavelet, proposto por Donoho e Johnstone (1994). Para avaliação da eficácia do procedimento, são analisados parâmetros como intensidade turbulenta, energia cinética turbulenta e espectro de energia, com destaque para a verificação da lei de -5/3 de Kolmogorov, antes e depois da aplicação do método.

CARACTERIZAÇÃO DO ADV

O Velocímetro Doppler Acústico (ADV), fabricado pela SonTek/YSI, permite a medição, em modelos físicos, dos três componentes da velocidade $U = (U_1, U_2, U_3)$ em um ponto fixo do escoamento, com alta taxa de frequência (0,1 a 50 Hz), por meio de um volume amostral remoto (SonTek, 2001a). Suas principais vantagens incluem: (i) não necessitar de calibração periódica; (ii) operação simples; (iii) cálculo direto de parâmetros turbulentos; e (iv) bom desempenho em fluxos com baixas velocidades ou alta turbidez (Kraus *et al.*, 1994; Lohrmann *et al.*, 1994).

O sistema sensorial do ADV é composto por uma haste central, em que está localizado o transdutor emissor, responsável por emitir pulsos acústicos em uma frequência conhecida, e por sensores receptores dispostos ao redor do transdutor emissor, os quais captam a frequência refletida por partículas em suspensão no fluido. A diferença entre as frequências emitida e recebida, causada pelo movimento das partículas, é usada para calcular as componentes da velocidade com base no princípio do efeito Doppler. Considera-se que a velocidade das partículas representa a velocidade do fluido (SonTek, 2001a).

Os feixes acústicos emitidos e recebidos se cruzam em um ponto comum, formando o volume de amostragem (SonTek, 2001a). O centro do volume de amostragem, para o 16-MHz microADV, é distante 5 cm da extremidade do transdutor emissor. Seu formato é aproximadamente cilíndrico, com 6 mm de diâmetro e 9 mm de altura (SonTek, 2001b).

MÉTODOS DE FILTRAGEM

A filtragem de dados em medições com ADV tem como objetivo remover distorções introduzidas por erros na etapa de medição experimental, preservando a estrutura física do escoamento turbulento e melhorando a representatividade do sinal. Neste estudo, foram utilizados dois métodos de filtragem: Limiar no Espaço de Fases (do inglês *Phase-Space Threshold*), proposto por Goring e Nikora (2002), que identifica e substitui picos anômalos com base em um limiar aplicado ao espaço formado pela velocidade e suas derivadas temporais; e Supressão dos Coeficientes Wavelet (do inglês *Wavelet Threshold*), proposto por Donoho e Johnstone (1994), que elimina ruídos de baixa amplitude aplicando um limiar aos coeficientes wavelet no primeiro nível de resolução do sinal.

No contexto de turbulência, as distorções são analisadas em respeito ao componente flutuante da velocidade, calculada por $u_i = U_i - \bar{U}_i$, em que u_i é a componente flutuante da velocidade turbulenta, U_i é a medida instantânea da velocidade turbulenta e \bar{U}_i é a componente média da velocidade turbulenta, todos na direção i .

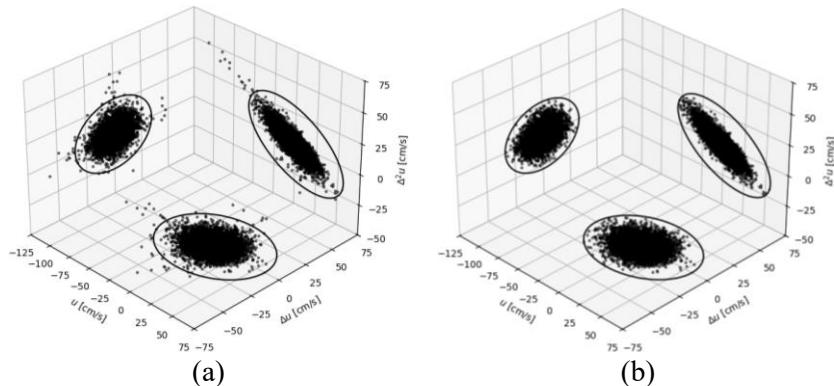
Limiar no Espaço de Fases

A derivação de um sinal realça componentes de alta frequência. Com base nisso, o método do Limiar no Espaço de Fases explora o fato de que a diferenciação das séries de velocidade acentua a presença de picos gerados por medições anômalas do ADV. O procedimento é dividido em duas etapas: identificação e substituição dos picos.

Na primeira etapa, a identificação de picos anômalos é realizada a partir de uma análise conjunta da flutuação da velocidade u_i e suas derivadas Δu_i e $\Delta^2 u_i$, formando os espaços de fases $u_i \times \Delta u_i$, $u_i \times \Delta^2 u_i$ e $\Delta u_i \times \Delta^2 u_i$. Assume-se que os dados válidos estão contidos dentro de uma elipsoide em cada um desses espaços. Valores que se encontram fora dessa região são classificados como picos anômalos. Para a construção da elipsoide, os semieixos maiores e menores estão relacionados ao limiar do critério universal $\lambda_U \sigma$, proposto em Donoho e Johnstone (1994), no qual $\lambda_U = \sqrt{2 \ln n}$, sendo n o número de amostras e σ o desvio padrão da amostra. Esse limiar estabelece uma fronteira para definir a parte relevante de um sinal de maneira universal e assintótica (Van Fleet, 2019). Para o valor de σ são utilizados σ_{u_i} , $\sigma_{\Delta u_i}$ e $\sigma_{\Delta^2 u_i}$ para cada espaço de fase correspondente.

Na segunda etapa, os valores identificados como anômalos são substituídos por meio de uma interpolação cúbica, utilizando 12 pontos de cada lado da amostra afetada. Como a interpolação pode gerar novos valores fora dos limites da elipsoide, o processo é iterativo, sendo repetido até que nenhum novo valor seja classificado como pico. Mais detalhes sobre o método podem ser encontrados em Goring e Nikora (2002). Um exemplo da aplicação está ilustrado na Fig. 1, em que fica visível a fronteira estabelecida pelo limiar universal.

Figura 1 – (a) Iteração inicial e (b) iteração final do método Limiar no Espaço de Fases (Elaborado pelo autor)



Supressão dos Coeficientes Wavelet

A Transformada Wavelet Discreta permite a decomposição de um sinal X gerando vetores de coeficientes wavelet (alta frequência) e de coeficientes escala (baixa frequência). Para o primeiro nível de resolução, o vetor de coeficientes wavelet W_1 é calculado por:

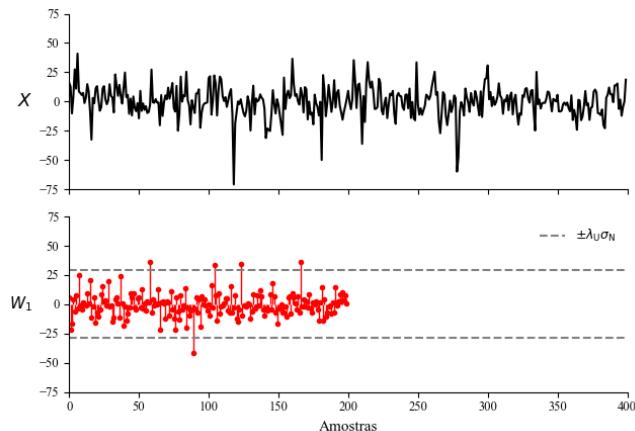
$$W_1 = \mathcal{W}_1 X \quad (1)$$

em que \mathcal{W}_1 é uma matriz construída a partir dos coeficientes passa-alta da wavelet mãe. O método Supressão dos Coeficientes Wavelet consiste em aplicar o limiar universal $\lambda_U \sigma$ no vetor W_1 . O parâmetro λ_U segue definição já apresentada. Como o objetivo é remover ruído, o desvio padrão utilizado é o do ruído σ_N , estimado por meio do desvio absoluto da mediana (MAD), conforme a Eq. (2). Todos os coeficientes de W_1 , sendo W_1 um vetor de k coeficientes, que satisfaçam a condição $|W_{1k}| \leq \lambda_U \sigma_N$ são zerados, técnica essa denominada *hard threshold*.

$$\sigma_N \approx \text{MAD}(W_1)/0,6745 \quad (2)$$

Mais detalhes sobre o método podem ser encontrados em Donoho e Johnstone (1994). A Fig. 2 apresenta um exemplo da aplicação, em que os pontos do vetor W_1 dentro do intervalo delimitado pelo limiar universal $[-\lambda_U \sigma_N, \lambda_U \sigma_N]$ são zerados.

Figura 2 – Supressão dos Coeficientes Wavelet (Elaborado pelo autor)



MATERIAIS E MÉTODO

Canal experimental e coleta de dados

As medições de velocidades foram realizadas em um canal experimental localizado no Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (FT – UnB). O canal possui 15 m de comprimento e seção retangular de 30 cm de largura e aproximadamente 40 cm de profundidade. Para o caso estudado, o escoamento foi mantido em regime permanente, com lâmina d'água H de 11,7 cm e velocidade média de 85 cm/s, medida a 40% da superfície livre, resultando em uma vazão de aproximadamente 30 L/s e número de Reynolds na faixa de $2 \cdot 10^5$. O fundo do canal foi revestido com placas rugosas, conforme ilustrado na Fig 3.

O equipamento utilizado foi o modelo 16-MHz microADV (SonTek), operando com frequência de amostragem de 50 Hz. Fixado em uma estrutura metálica para garantir estabilidade à haste de medição, o equipamento foi alocado no centro da seção transversal do canal durante a realização do experimento, representado também na Fig. 3. Foram realizadas medições em alturas z de 7 mm e 27 mm, medida do centro do volume amostral até o fundo do canal.

Figura 3 – Aparato experimental



Método de pós-processamento e parâmetros de avaliação

O método de pós-processamento proposto é realizado em duas etapas sucessivas. Primeiramente, é aplicado o método Limiar no Espaço de Fases para remoção e substituição de picos anômalos. Posteriormente, o ruído de alta frequência (Doppler) é atenuado por meio do método Supressão dos Coeficientes Wavelet com a utilização da família Daubechies 4 (db4) devido a sua capacidade de detecção de alterações de alta frequência. A ordem de aplicação é relevante, pois a presença de picos anômalos pode distorcer o cálculo do limiar no domínio wavelet, podendo levar à remoção indevida de flutuações naturais da turbulência.

A avaliação do método se deu pela comparação de parâmetros turbulentos antes e após sua implementação. Primeiramente, foi analisada a redução nas flutuações das componentes tridimensionais da velocidade. Para isso, foram utilizados como referência a intensidade turbulenta total (IT_t) e a energia cinética turbulenta de cada componente (k_i), as quais foram calculadas pelas Eq. (3) e Eq. (4), respectivamente. A velocidade média do escoamento no ponto de medição é \bar{U} .

$$IT_t = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sigma_{u_i}^2 / \bar{U}} \quad (3)$$

$$k_i = \frac{1}{2} \sigma_{u_i}^2 \quad (4)$$

Foi analisado também o impacto da filtragem no espectro de energia turbulenta. Primeiramente, foi obtido o espectro de potência do sinal de velocidade por meio do Método de Welch. A conversão para o espectro de energia foi realizada admitindo a Hipótese de Taylor a partir de $\kappa = 2\pi f / \bar{U}$ e $E(\kappa) = S(f) \bar{U} / 2\pi$ (De Kat e Ganapathisubramani, 2015), sendo f a frequência, κ o número de onda, $S(f)$ o espectro de potência e $E(\kappa)$ o espectro de energia. Quando a análise do espectro de energia é realizada em respeito a apenas um componente da velocidade, é denominado espectro unidimensional da energia turbulenta. Segundo Pope (2015), a lei de $-5/3$ de Kolmogorov para a componente longitudinal do escoamento (E_{11}) é calculada por:

$$E_{11}(\kappa_1) = C_1 \varepsilon^{2/3} \kappa_1^{-5/3} \quad (5)$$

em que ε é a taxa de dissipação de energia e $C_1 \approx 0,49$ é a constante de Kolmogorov para o espectro unidimensional de energia E_{11} . Assim, estimando a taxa de dissipação de energia por meio do espectro unidimensional da energia turbulenta da componente longitudinal de velocidade do escoamento, foi possível calcular a escala de comprimento de Kolmogorov por:

$$\eta = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4} \quad (6)$$

sendo ν a viscosidade cinemática da água. Tennekes e Lumley (1972) explicam que ε pode ser estimado, ao menos em termos de escala, utilizando as escalas integrais de velocidade, u , e de comprimento, ℓ , pela relação $\varepsilon \sim u^3 / \ell$. Foi admitida a velocidade média do escoamento como sendo a escala u , enquanto para a escala ℓ foi utilizada a altura da lâmina d'água H . Com isso, foi utilizado esse parâmetro como referência.

Por fim, foi calculado o parâmetro adimensional y^+ com o objetivo de identificar a posição relativa das medidas de z em relação à camada limite. Para isso, estimou-se a velocidade de fricção u_τ com base na tensão de Reynolds. De acordo com Launder e Spalding (1973) *apud* Bredberg (2000), u_τ pode ser estimado por meio da energia cinética turbulenta total, resultando no parâmetro y^* , e sugerem que, para grande parte dos cenários, $y^* \approx y^+$. Dessa forma, y^+ e y^* foram calculados pelas Eq. (7) e Eq. (8) respectivamente, em que $C_\mu = 0,09$.

$$y^+ = z\sqrt{-\bar{u}_1 u_3} / \nu \quad (7)$$

$$y^* = z C_\mu^{1/4} \sqrt{(k_1 + k_2 + k_3)} / \nu \quad (8)$$

RESULTADOS

Conforme apresentado, foram utilizadas medições em duas alturas distintas para analisar os efeitos do método de pós-processamento da velocidade turbulenta proposto. Com “(PP)” indicando que houve a etapa de pós-processamento de dados, a Fig. 4 e a Fig. 5 demonstram visualmente o efeito nas velocidades u_1 (componente longitudinal), u_2 (componente transversal) e u_3 (componente vertical) para as alturas de 7 mm e 27 mm distantes do fundo do canal, respectivamente.

Figura 4 – Medição de velocidades em z de 7 mm (a) sem e (b) com pós processamento

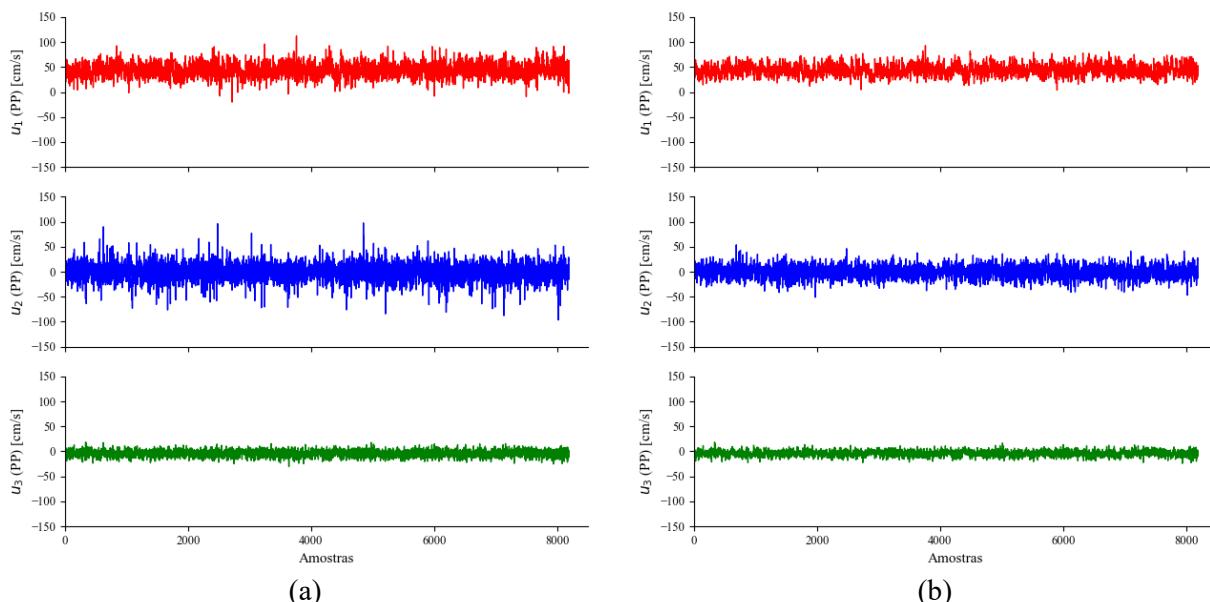
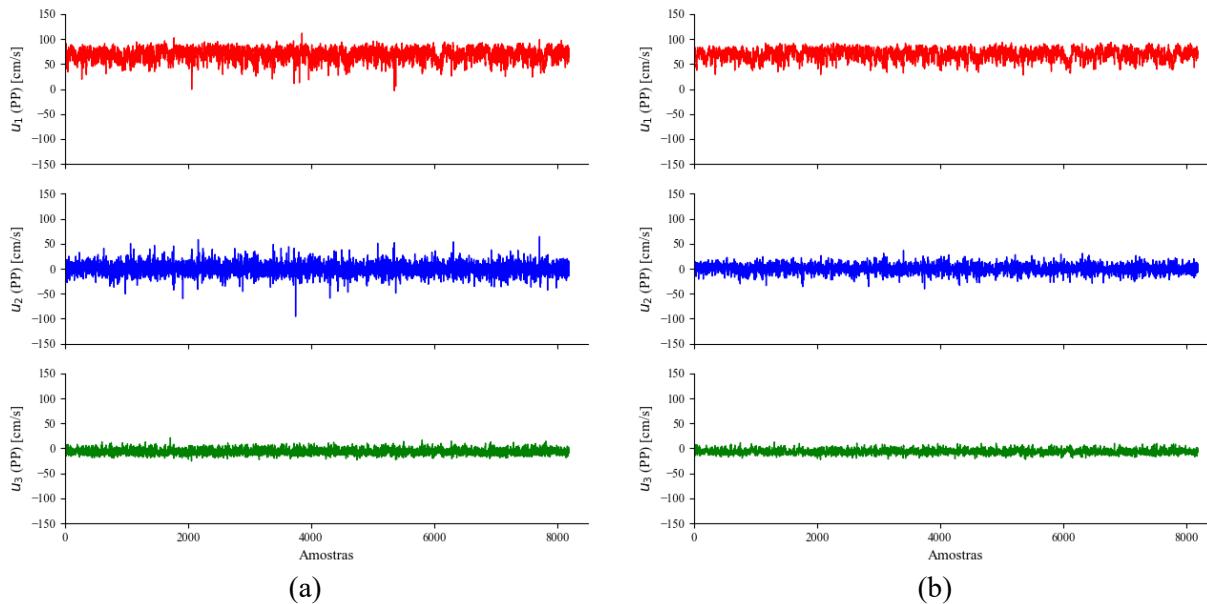


Figura 5 – Medição de velocidades em z de 27 mm (a) sem e (b) com pós processamento



Observa-se a remoção de diversos picos anômalos, identificados na primeira etapa do processamento, além da atenuação de componentes ruidosos, efeito da filtragem wavelet. Para quantificar essas mudanças, foram calculados os parâmetros de intensidade turbulenta total e energia cinética turbulenta, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Comparaçāo dos parāmetros turbulentos sem e com pós-processamento (PP)

Parāmetro	z			
	7 mm	7 mm (PP)	27 mm	27 mm (PP)
$IT_t (\%)$	45,7	38,2	23,2	20,3
$k_1 (\text{cm}^2/\text{s}^2)$	72,25	59,49	67,32	57,50
$k_2 (\text{cm}^2/\text{s}^2)$	108,00	66,87	51,09	32,23
$k_3 (\text{cm}^2/\text{s}^2)$	17,89	14,35	13,82	10,82

Como esperado, o pós-processamento aplicado reduziu significativamente as componentes turbulentas de velocidade medidas com o ADV. Isso confirma que, devido a erros associados à etapa experimental de aquisição de dados, como ruídos e *aliasing*, o equipamento tende a superestimar a intensidade da turbulência do escoamento.

Observa-se também que os valores de intensidade turbulenta total foram mais elevados na altura de 7 mm em comparação com 27 mm. Esse comportamento é atribuído à influência do fundo rugoso, que gera perturbações locais mais intensas no escoamento próximo ao leito. Além disso, o confinamento do escoamento em uma seção transversal estreita contribui para a dissipação prematura de grandes vórtices, devido à ação das paredes laterais do canal. Outro fator importante é a distribuição não uniforme de partículas em suspensão (*seeding*). A maior concentração de sedimentos no fundo do canal favorece medições mais representativas nessas regiões, enquanto a escassez de partículas próximas à superfície pode comprometer a qualidade dos dados obtidos pelo ADV.

Embora seja esperado que a componente longitudinal da energia cinética turbulenta (k_1) seja predominante, observou-se que a componente transversal (k_2) apresentou valores significativos para

a altura de 27 mm e até superiores para 7 mm. Esse comportamento é explicado pelas singularidades geométricas do canal experimental, que não configura um escoamento ideal entre placas planas paralelas. O encaixe das paredes laterais introduz obstáculos que geram escoamentos cruzados e fortes perturbações locais. Tais efeitos tendem a ser mais intensos em regiões com maior velocidade e, portanto, maior predominância de forças iniciais, e são atenuados nas proximidades do leito, onde a viscosidade do fluido promove maior dissipação de energia.

A Fig. 6 e a Fig. 7 mostram o espectro unidimensional de energia turbulenta, com e sem o pós-processamento, para as duas alturas estudadas. A linha com inclinação de $-5/3$ representa a lei de $-5/3$ de Kolmogorov, usada para estimar a taxa de dissipação de energia ε .

Figura 6 – Espectro de energia para z de 7 mm (a) sem e (b) com pós-processamento

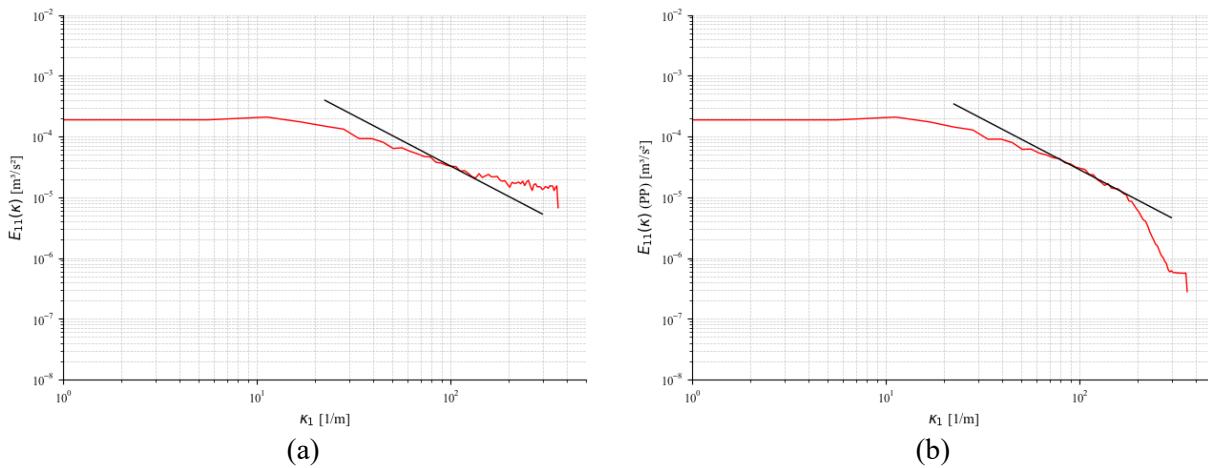
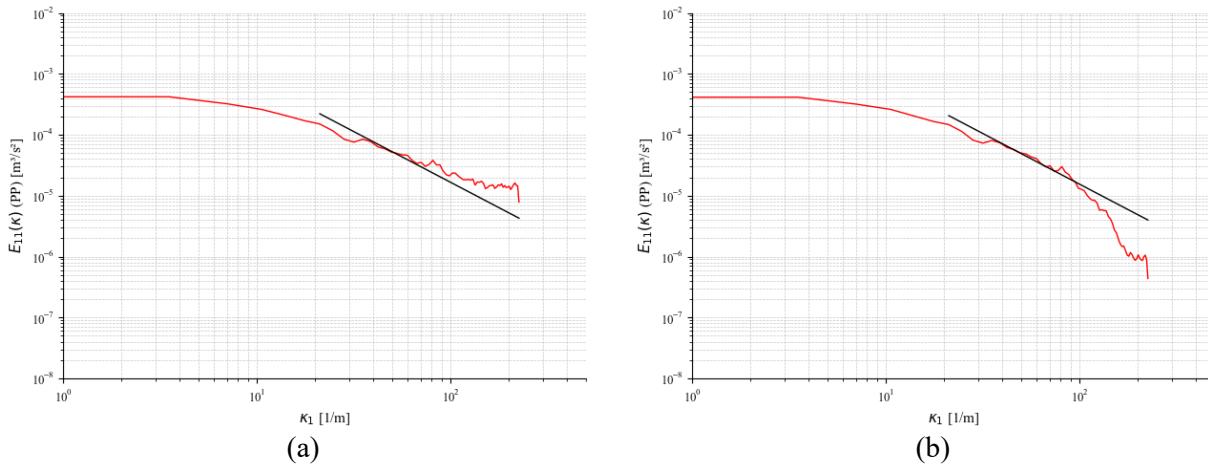


Figura 7 – Espectro de energia para z de 27 mm (a) sem e (b) com pós-processamento



O primeiro efeito da filtragem é percebido pelo melhor ajuste da Lei de $-5/3$ de Kolmogorov a partir de uma faixa inercial da escala turbulenta bem definida para ambas as alturas. Além disso, observou-se uma redução da energia em altas frequências (números de onda elevados), indicando a remoção eficaz de componentes ruidosos. Isso demonstra o quanto os componentes ruidosos compunham significativamente o valor da energia cinética turbulenta. No entanto, nem toda a energia de ruído foi eliminada, evidenciada por um patamar residual no final do espectro.

Com base na taxa de dissipação da energia turbulenta ε , obtida pelo ajuste da reta com inclinação de $-5/3$, foi calculada a escala de comprimento de Kolmogorov η . Como referência, o

mesmo parâmetro foi também estimado pela relação $\varepsilon \sim u^3/\ell$, em que os valores de u e ℓ foram abordados anteriormente. Os valores estão conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Cálculo da escala de comprimento de Kolmogorov

Parâmetro	7 mm (PP)	27 mm (PP)	Estimado
η (μm)	69,03	86,74	65,98

A escala de comprimento de Kolmogorov apresentou valores menores para a altura de 7 mm quando comparada com 27 mm. Sendo esse parâmetro inversamente proporcional à taxa de dissipaçāo de energia turbulenta, conclui-se que a taxa de dissipaçāo foi maior para a menor altura, em que essa observaçāo é explicada pela influênciā do fundo do canal na dimensão das forças viscosas (dissipativas) atuantes. Johnson e Cowen (2017) demonstram que, de fato, a taxa de dissipaçāo da energia turbulenta tende a aumentar conforme menor relaçāo z/H . Além disso, os valores de η calculados foram coerentes com o estimado.

Nota-se, portanto, que a etapa de pós-processamento proposta possibilitou tanto a identificaçāo da faixa inercial quanto o cálculo da escala de comprimento de Kolmogorov, sendo essa não apenas coerente com o estimado em termos de escala numérica, mas também apresentando valores consideravelmente próximos. O número de onda relativo ao valor de η , no entanto, não é representado no espectro de energia devido à limitaçāo da frequênciā de amostragem de 50 Hz do ADV, não sendo capaz de detectar alteraçāes que ocorrem em um espaço tão curto de tempo.

Por último, foi calculado os parâmetros y^+ e y^* com base nas tensões de Reynolds e energia cinética turbulenta total, respectivamente. Os resultados estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Cálculo da distância adimensional da parede

Parâmetro	7 mm	7 mm (PP)	27 mm	27 mm (PP)
y^+	432	406	1538	1455
y^*	544	455	1700	1483

Os valores confirmam a proposição de que $y^* \approx y^+$. Além disso, como ambos os parâmetros são diretamente proporcionais aos componentes turbulentos, a filtragem de dados resultou em uma diminuição de seus valores. Mesmo com uma distância de 7 mm, foi estimado que a medida foi realizada fora da camada limite, demarcada tipicamente por y^+ menor que 300.

CONCLUSÃO

O estudo teve como objetivo implementar um método de pós-processamento para sinais de velocidade tridimensionais obtidos pelo uso do Velocímetro Acústico Doppler (ADV). Para isso, foi implementada uma rotina de duas etapas sucessivas: primeiramente, é aplicado o método Limiar no Espaço de Fases (Goring e Nikora, 2002) para remoção de picos anômalos resultantes de *aliasing* do sinal e, em seguida, o ruído Doppler, inerente ao uso do efeito Doppler, é removido pelo método Supressão dos Coeficientes Wavelet (Donoho e Johnstone, 1994).

Os resultados demonstraram que o ADV, sem correções, superestima os parâmetros turbulentos devido a erros de medição. O processamento permitiu uma redução consistente da intensidade turbulenta e da energia cinética, além de uma melhor definição da faixa inercial no espectro de energia turbulenta.

Com isso, foi possível ajustar a lei de $-5/3$ de Kolmogorov e estimar a taxa de dissipação de energia ε . A partir disso, obteve-se a escala de Kolmogorov η , com valores próximos à estimativa teórica. Por fim, a análise dos parâmetros y^+ e y^* reforçou a coerência física dos resultados obtidos após a filtragem.

Conclui-se, portanto, que o método proposto é uma alternativa viável e eficaz para o pós-processamento de dados ADV, especialmente em estudos que requerem alta confiabilidade na caracterização de propriedades turbulentas do escoamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BREDBERG, J. (2000). *On the Wall Boundary Condition for Turbulence Models*. Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology. Internal Report 00/4.
- CEA, L.; PUERTAS, J.; PENA, L. (2007). *Velocity measurements on highly turbulent free surface flow using ADV*. *Exp Fluids*. 42(3):333–348. <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0237-3>.
- DE KAT, R.; GANAPATHISUBRAMANI, B. (2015). *Frequency-wavenumber mapping in turbulent shear flows*. *J Fluid Mech*. 783:166–190. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.558>.
- DONOHO, D.L.; JOHNSTONE, I.M. (1994). *Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage*. *Biometrika*. 81(3):425–455. <https://doi.org/10.1093/biomet/81.3.425>.
- GORING, D.G.; NIKORA, V.I. (2002). *Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data*. *J Hydraul Eng*. 128(1):117–126. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:1\(117\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:1(117)).
- JOHNSON, E.D.; COWEN, E.A. (2017). *Estimating bed shear stress from remotely measured surface turbulent dissipation fields in open channel flows*. *Water Resources Research*. 53(3):1982–1996. <https://doi.org/10.1002/2016WR018898>.
- KRAUS, N.C.; LOHRMANN, A.; CABRERA, R. (1994). *New Acoustic Meter for Measuring 3D Laboratory Flows*. *J Hydraul Eng*. 120(3):406–412. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1994\)120:3\(406\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:3(406)).
- LOHRMANN, A.; CABRERA, R.; NICHOLAS, K.C. (1994). *Acoustic Doppler Velocimeter for laboratory use*. Fundamentals and Advancements in Hydraulic Measurements and Experimentation Proceedings – ASCE.
- MCLELLAND, S.J.; NICHOLAS, A.P. (2000). *A new method for evaluating errors in high-frequency ADV measurements*. *Hydrol Process*. 14(2):351–366. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(20000215\)14:2<351::AID-HYP963>3.0.CO;2-K](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(20000215)14:2<351::AID-HYP963>3.0.CO;2-K).
- NIKORA, V.; GORING, D. (1998). *ADV Measurements of Turbulence: Can We Improve Their Interpretation?* *Journal of Hydraulic Engineering*.
- POPE, S.B. (2015). *Turbulent flows*. 1. publ., 12. print. Cambridge: Cambridge Univ. Press.
- SonTek/YSI. (2001a). *Acoustic Doppler Velocimeter Principles of Operation*.
- SonTek/YSI. (2001b). *ADVfiled Operation Manual*.
- TENNEKES, H.; LUMLEY, J.L. (1972). *A First Course in Turbulence*. The MIT Press.
- VAN FLEET, P.J. (2019). *Discrete Wavelet Transformations: An Elementary Approach with Applications*. 2nd ed. Wiley Telecom.
- VOULGARIS, G.; TROWBRIDGE, J.H. (1998). *Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements*. *J Atmos Oceanic Technol*. 15(1):272–289. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<0272:EOTADV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0272:EOTADV>2.0.CO;2).