

CORREÇÃO DE DADOS DE FLUXOS TURBULENTOS ENTRE O OCEANO E A ATMOSFERA COLETADOS POR NAVIO

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Joel Rubert (UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: tchejr@gmail.com

Ronald Buss de Souza (CRS/INPE, Orientador)
E-mail: ronald@dsr.inpe.br

Julho de 2014

RESUMO

CORREÇÃO DE DADOS DE FLUXOS TURBULENTOS ENTRE O OCEANO E A ATMOSFERA COLETADOS POR NAVIO

O projeto ACEx (Estudo observacional e numérico dos fluxos de calor, momentum e CO₂ na interface oceano-atmosfera do Oceano Atlântico Sul - *Atlantic Ocean Carbon Experiment*) tem o propósito de fazer medidas oceânicas *in situ* de fluxos de calor, momentum e CO₂ no Atlântico Sudoeste que é uma região de suma importância para o sequestro do dióxido de carbono atmosférico. Durante os dias 11 a 21 de junho de 2012, este projeto realizou medidas *in situ* a partir do Navio Hidroceanográfico (NHo) Cruzeiro do Sul (H38) na costa sul brasileira entre a zona costeira e o oceano profundo obtendo dados micrometeorológicos completos que incluem os fluxos turbulentos de calor, momentum e CO₂, além dos dados de posicionamento (latitude, longitude, tempo) e inclinação do navio nos eixos x, y, z. A região do experimento é um dos locais do oceano global que desempenha um papel importante na absorção de CO₂ atmosférico, mas com grandes incertezas nos dados, devido principalmente à pequena amostragem existente (SCHUSTER et al., 2012).

Estudos continuados dos fluxos em diversas regiões de interesse são limitados por dificuldades operacionais e financeiras, então como alternativa a essas dificuldades, as medidas *in situ* podem ser realizadas a partir de torres micrometeorológicas instaladas em navios. No entanto, as observações realizadas em tais experimentos estão sujeitas a interferências do movimento do navio, sendo este fator responsável pela maior parte da incerteza nas medidas dos fluxos obtidas sobre o oceano.

Frente à grande importância de medidas mais precisas nessa região de estudo, a correção de dados coletados por torres micrometeorológicas instaladas em navios é uma necessidade, para que os fluxos calculados com estes dados sejam mais representativos para região de estudo. (MILLER et al., 2008) propõem um algoritmo operacional, com procedimentos que servem como referência para execução da proposta deste trabalho.

Palavras-chave: Fluxos turbulentos, observações em navios, covariância dos vórtices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	NHo Cruzeiro do Sul atracado no porto de Paranaguá (PR)	09
Figura 2 –	Detalhes da torre na proa do navio.....	10
Figura 3 –	Componente zonal (u), meridional (v) e vertical do vento, para o dia 17 de junho de 2012.....	11
Figura 4 –	Aceleração linear das componentes x, y e z	11
Figura 5 –	Aceleração angular das componentes x, y e z.....	12
Figura 6 –	Componente zonal do vento, dado observado e dado corrigido	12
Figura 7 –	Componente meridional do vento, dado observado e dado corrigido	13
Figura 8 –	Componente vertical do vento, dado observado e dado corrigido.....	13

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	05
2 DESENVOLVIMENTO.....	06
2.1 Revisão bibliográfica.....	06
2.2 Materiais e métodos	08
2.3 Resultados e discussão	10
3 CONCLUSÃO.....	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14

1 INTRODUÇÃO

As transferências de energia e dióxido de carbono (CO_2) entre o oceano e a atmosfera constituem uma parte fundamental do balanço de energia e carbono global. Sabe-se que grande parte da absorção de CO_2 pelos oceanos ocorre no Oceano Austral (SARMIENTO et al., 2001) e dessa forma, as respostas futuras sobre a transferência deste gás no Oceano Austral é uma das maiores fontes de incerteza para previsões futuras do comportamentos do CO_2 atmosférico (QUÉRÉ; METZL, 2004). O Atlântico Sul também desempenha um papel importante na absorção de CO_2 atmosférico, mas com grandes incertezas nos dados, devido principalmente à pequena amostragem existente (SCHUSTER et al., 2012). Estudos continuados dos fluxos turbulentos na interface entre o oceano e a atmosfera nesta região, são limitados por questões financeiras e operacionais, pois a alternativa ideal para substituir as torres micrometeorológicas fixas, é a utilização de grandes boias estabilizadas que além de alto custo de instalação não permitem acesso, manutenção ou calibração constante. Estudos encontrados na bibliografia que abordam este tema, na sua grande maioria, envolvem medidas realizadas em boias ou em instrumentos instalados em navios. Dessa forma, as observações realizadas em tais experimentos estão fortemente sujeitas às condições ambientais únicas dos oceanos tais como jatos de água salgada, que interferem drasticamente no desempenho de alguns equipamentos, e o stress causado pelas colisões das ondas (EDSON et al., 1998). Além dos problemas decorrentes das condições ambientais dos oceanos, podemos atribuir ao movimento das boias e navios a maior parte da incerteza nas medidas da turbulência obtidas sobre o oceano. Medias tridimensionais do campo vento realizadas por anemômetros fixados em plataformas móveis apresentam contribuições espúrias devido ao movimento dos instrumentos que contaminam as propriedades estatísticas dessas séries temporais, principalmente as correlações que estão diretamente associadas aos fluxos turbulentos de momento e escalares (MILLER et al., 2008). Uma estimativa confiável do fluxo de qualquer escalar, principalmente CO_2 , nessas condições exige além da correção do vetor velocidade medido pelos anemômetros, uma série de procedimentos operacionais e de pós-processamento do sinal de tal forma que a contaminação dos dados pelas condições ambientais e experimentais adversas, relacionadas acima, sejam eliminadas, ou reduzidas a níveis desprezíveis. O objetivo deste trabalho é realizar a avaliação de diferentes métodos de correção de dados de fluxos turbulentos coletados *in situ* por torre micrometeorológica instalado em navio e aplicar estes métodos dos métodos no cálculo dos fluxos turbulentos de calor, momentum e dióxido de carbono (CO_2) entre o oceano e a atmosfera.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

O método mais utilizado pela comunidade científica, para o cálculo dos fluxos turbulentos a partir de medidas realizadas *in situ* é conhecido como método da Covariância dos Vórtices (CV). A abordagem a partir deste método permite a associação direta dos fluxos turbulentos reais de escalares (calor sensível, calor latente, umidade ou densidade de CO₂) com a covariância estatística das variáveis obtidas pelos instrumentos de medidas. Dessa forma, definimos fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (Le) e fluxo de dióxido de carbono (F_c), respectivamente como:

$$H = \overline{\rho_a} C_p \overline{w' T'}$$

$$Le = \overline{\rho_a} L_v \overline{w' r'}$$

$$F_c = \overline{\rho_a} \overline{w' c'}$$

onde $\overline{\rho_a}$ é a densidade do ar seco, C_p é o calor específico do ar, L_v é o calor latente de vaporização da água e w' , T' , r' e c' são, respectivamente, a flutuação da componente vertical do vento, temperatura, e as razões de mistura do ar seco com H₂O e CO₂. Dessa forma, as estimativas de fluxos turbulentos serão tão precisas, quanto melhor for a qualidade das medidas realizadas. No entanto, a qualidade dos resultados dos fluxos estimados é limitada pelas interferências ambientais e experimentais, no caso de medidas realizadas em navios surgem incertezas adicionais, como:

- a) Contaminação do vetor velocidade do vento pelo movimento do navio;
- b) O fluxo de CO₂ é determinado pela flutuação da componente vertical da velocidade do vento e da flutuação da razão de mistura, definida como a razão da densidade molar de CO₂, pela densidade molar do ar seco. No entanto, os Analisadores de Gases Infra-Vermelho (AGIV) comumente usados medem densidade molar de CO₂, e por consequência disso, flutuações de temperatura, pressão e vapor d'água alteram a densidade do ar comprometendo a medida deste constituinte o que afeta drasticamente as estimativas dos fluxos calculados (MILLER et al., 2004);

- c) Assim como ocorre nas medidas do vento, dados obtidos por AGIV também são contaminados por sinais espúrios devidos o movimento do navio. Este efeito pode ser encontrado em medidas feitas tanto por AGIV de caminho aberto quanto de caminho fechado, sendo este último o mais sensível a esse tipo de contaminação (MCGILLIS et al., 2001);
- d) Em sistemas AGIV de caminho fechado, a parcela de ar medida no anemômetro é transportada, com a ajuda de uma bomba de sucção, por um duto até o equipamento de medida, fazendo que a medida de densidade de CO₂ ocorra com certo tempo de atraso em relação à medida de velocidade. No método das CV assume-se que as medições das variáveis tenham sido realizadas no mesmo ponto no espaço, e por esse motivo, é fundamental determinar precisamente esse intervalo de tempo entre as medidas. Outra limitação no uso desse tipo de instrumentação é o fato de que as flutuações de alta frequência são amortecidas enquanto viajam pelo duto até a estação de medição comprometendo a representação dos fluxos associados a essas pequenas escalas turbulentas (LENSCHOW et al., 1991).

Para melhorar a correção do sinal utiliza-se a técnica de decomposição de sinais conhecida como transformada de Hilbert-Huang (HUANG et al., 1998), pois esta técnica além de utilizada em diversas áreas da ciência, apresenta-se mais eficiente que as técnicas clássicas como a decomposição de Fourier. Uma das principais vantagens dessa decomposição, em relação às decomposições clássicas, é a sua capacidade de representar sinais complexos em um número finito e reduzido de componentes, chamadas de funções de modo intrínsecas. Uma função de modo intrínseco representa um modo oscilatório característico do sinal e, por definição, tem as seguintes propriedades:

- a) para toda função, o número de extremos locais (máximos e mínimos) deve ser igual ao número de vezes que o sinal cruza o zero ou diferentes de uma unidade;
- b) para qualquer ponto, o valor médio do “envelope” definido superiormente e inferiormente pelas curvas “spline” cúbicas que interpolam, respectivamente, os valores máximos e mínimos da função de modo intrínseco é igual a zero.

Este método de decomposição é muito eficiente e adaptável, uma vez que a decomposição é baseada na escala de tempo local característica dos dados, podendo ser aplicada a processos não lineares e não estacionária.

Dessa forma, a decomposição do sinal é feito através de um processo chamado peneiramento, sendo que primeiramente encontramos os valores máximos e mínimos locais dos dados originais e através desses extremos determinamos a curva superior e inferior do envelope que limita o sinal. O valor médio m_1 do envelope é subtraído do sinal original $u(t)$, dando origem ao “protomodo” h_1 , desta forma:

$$h_1 = u(t) - m_1$$

Esse procedimento pode ser repetido inúmeras vezes até que o resultado apresente as condições definidas para uma função de modo intrínseco.

2.2 Materiais e métodos

A correção do vetor velocidade do vento está baseada na proposta de (FUJITANE., 1981). Essa proposta assume que o vetor velocidade real pode ser definido como a soma da velocidade medida pelo sensor (velocidade aparente) com a velocidade do movimento do próprio sensor, considerando que ambas estejam no mesmo sistema de coordenadas (x, y, z). Dessa forma, escrevemos a velocidade real como:

$$\vec{v}_t = T_{as} \vec{v}_m + T_{as} (\vec{v}_a + \vec{\Omega}_a \times \vec{r}) + \vec{v}_s$$

Sendo \vec{v}_t o vetor velocidade real no momento da medida, \vec{v}_m é a velocidade medida pelo sensor, \vec{v}_a é a velocidade linear e $\vec{\Omega}_a$ velocidade angular do sensor, \vec{v}_s é a velocidade de deslocamento do navio, \vec{r} é o raio vetor posição do anemômetro em relação ao sensor de movimento e T_{as} é a matriz de transformação de coordenadas do sistema de referência do anemômetro para o sistema de coordenada da terra, considerando o eixo x na direção da proa, eixo y a bombordo e z na vertical. Para determinarmos o movimento do próprio anemômetro utilizamos um sensor de movimento, referenciado com o anemômetro no sistema de coordenada da Terra, que fornece a cada instante de medição, a aceleração na direção de três eixos (x, y, z), e a variação angular da rotação em torno desses mesmos eixos ($\vec{\Omega} = [\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}]$) no sistema de coordenadas do anemômetro. A matriz de rotação de coordenadas, é definida em função dos ângulos de Euler (GOLDSTEIN; POOLE; SAFKO, 1965), e representa a sequência de três rotações planares, onde a primeira é realizada em relação ao eixo x(ϕ), a segunda em relação ao y(θ) e a terceira em relação ao eixo z(ψ). Desta maneira, T_{as} é definida como:

$$T_{as} = C(\psi)B(\theta)A(\phi)$$

$$C(\psi) = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\text{sen}(\psi) & 0 \\ \text{sen}(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \text{sen}(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

$$A(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\text{sen}(\phi) \\ 0 & \text{sen}(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix}$$

Os sinais de alta frequência dos ângulos de Euler são obtidos pela integração das velocidades angulares medidas pelo sensor de movimento, este método é apresentado por (EDSON et al., 1998). Os sinais de alta frequência são obtidos com a aplicação de um filtro passa alta e os sinais de baixa frequência são obtidos pela aplicação de um filtro passa baixa. As medidas de aceleração das componentes horizontais do sensor de movimento devido à inclinação dos instrumentos são determinadas através da contribuição da aceleração da gravidade (\vec{g}), definida como:

$$\theta = \frac{-\ddot{x}}{g}$$

$$\phi = \frac{\ddot{y}}{g}$$

A partir da proposta para a correção do vetor velocidade do vento descrita acima, será finalizado o algoritmo composto por essas definições e que permita executar a correção dos dados de velocidade do vento coletados pelo NHo Cruzeiro do Sul de forma sistemática, também permitindo que a aplicabilidade desse algoritmo seja possível em dados coletados por outros navios.



Figura 1: NHo Cruzeiro do Sul atracado no porto de Paranaguá (PR).



Figura 2: Detalhes da torre na proa do navio.

2.2 Resultados e discussão

Inicialmente realizou-se o tratamento e a análise dos dados para garantir que dados espúrios fossem retirados do conjunto, evitando que tais informações não interfiram na posterior correção destes dados. As figuras 3, 4 e 5 apresentam as variáveis vetor velocidade do vento e as acelerações linear e angular medidos pela torre, após o tratamento.

Os resultados iniciais obtidos neste trabalho, para a correção dos vetores velocidade do vento estão apresentados abaixo, como mostram as figuras 6, 7 e 8. Os resultados para as componentes horizontais (u e v) vertical (w) em principio apresentaram desvio padrão médio maior que os apresentados pelos dados medidos após o tratamento inicial. Porém, a componente vertical (w) apresentou o valor médio menor para o dado corrigido em relação ao dado medido, o que representa um fato favorável nos resultados iniciais, visto que a média da componente vertical deve tender a zero quando o dado apresenta boa qualidade. Dentre os fatores que levaram a estes resultados temos que os sinais medidos da aceleração linear e angular são amplificados pela operação de integração no uso desta técnica. Soma-se a este fator, a ocorrência de superposição dos sinais medidos devido ao movimento dos sensores no navio. Os resultados apresentados até o momento estão isentos da utilização de quaisquer métodos de decomposição de sinais.

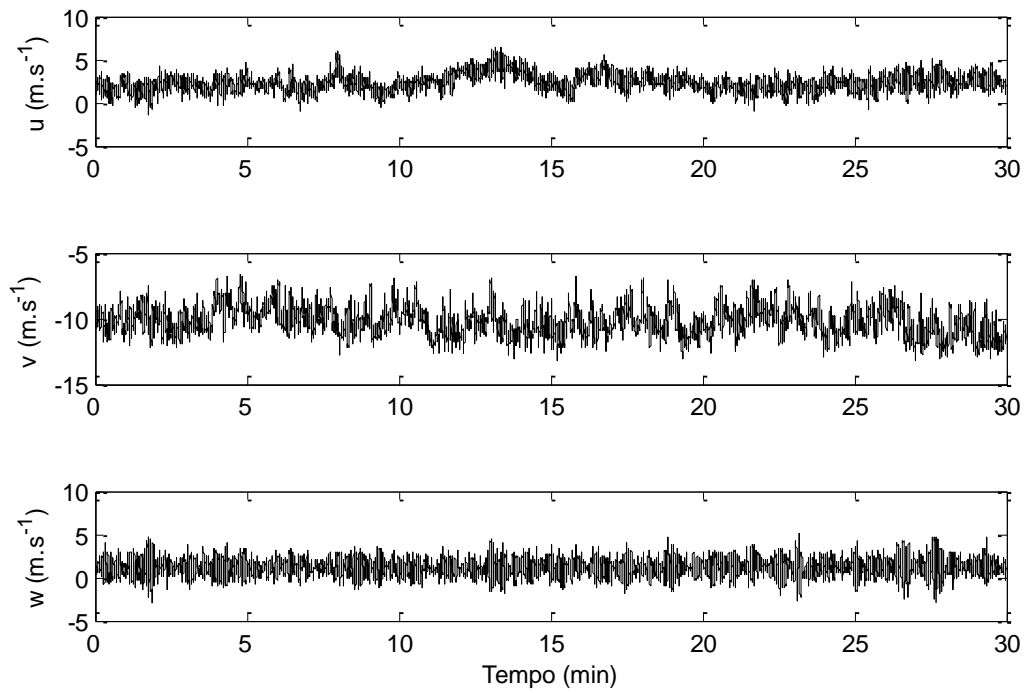


Figura 3: Componentes zonal (u), meridional (v) e vertical (w) da velocidade do vento, para o dia 17 de junho de 2012.

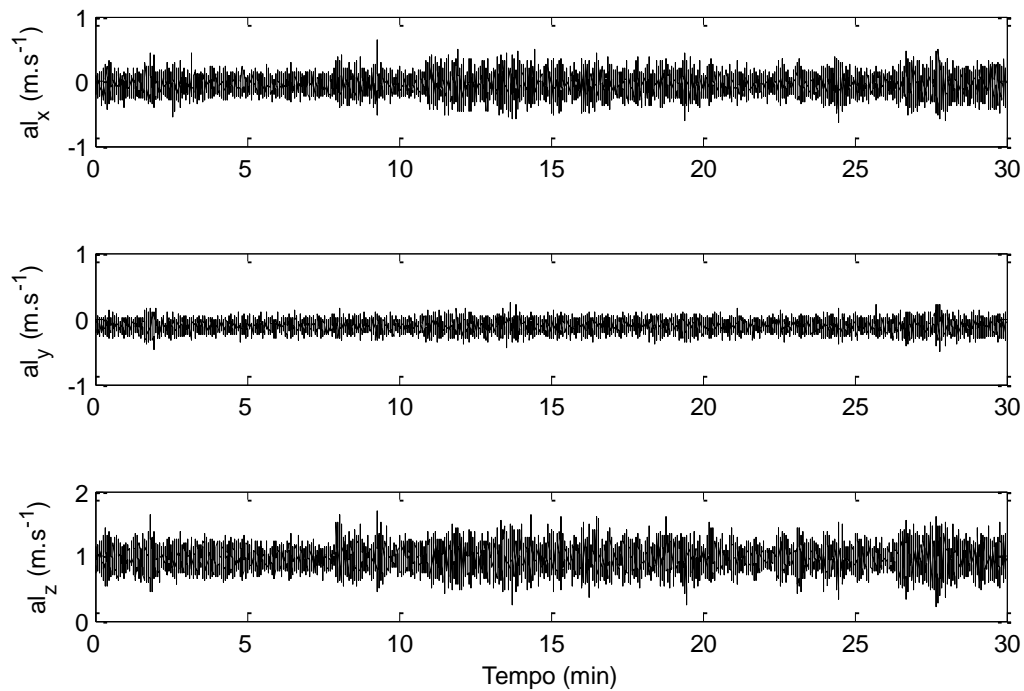


Figura 4: Aceleração linear das componentes x , y e z .

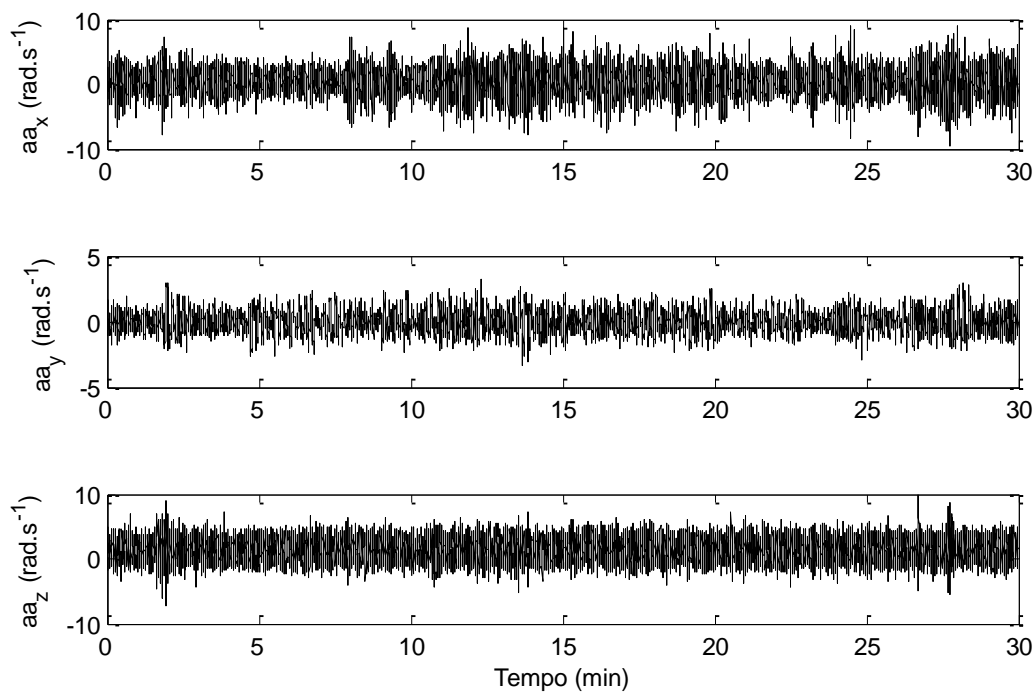


Figura 5: Aceleração angular das componentes x, y e z.

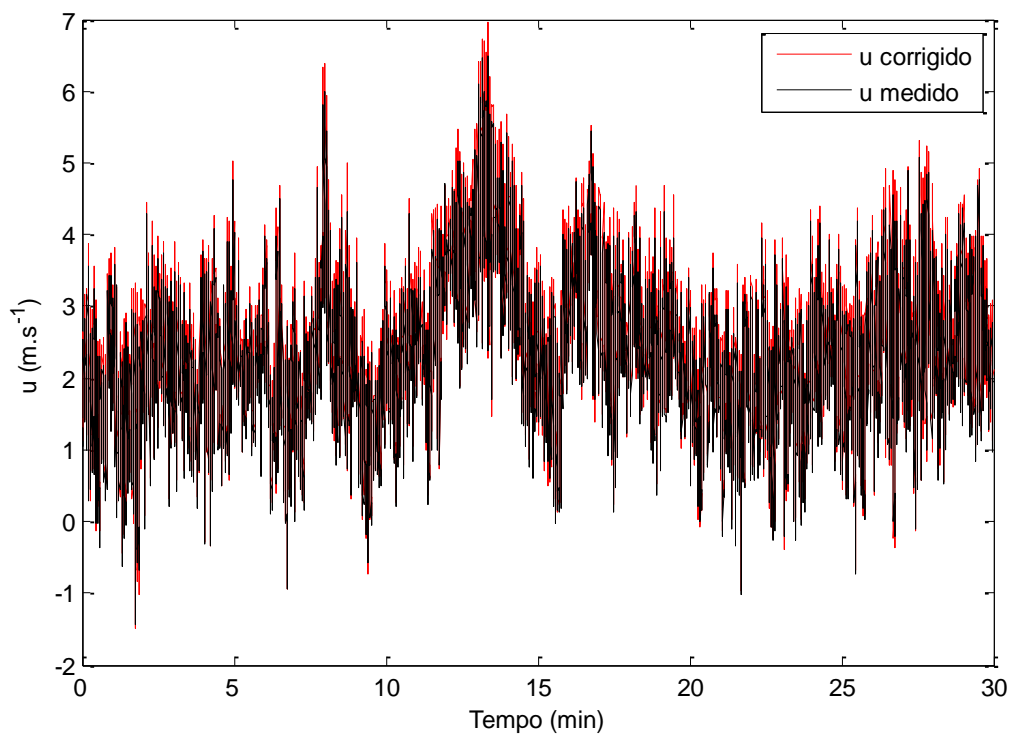


Figura 6: Componente zonal do vento, sendo em preto o dado medido e em vermelho o dado corrigido.

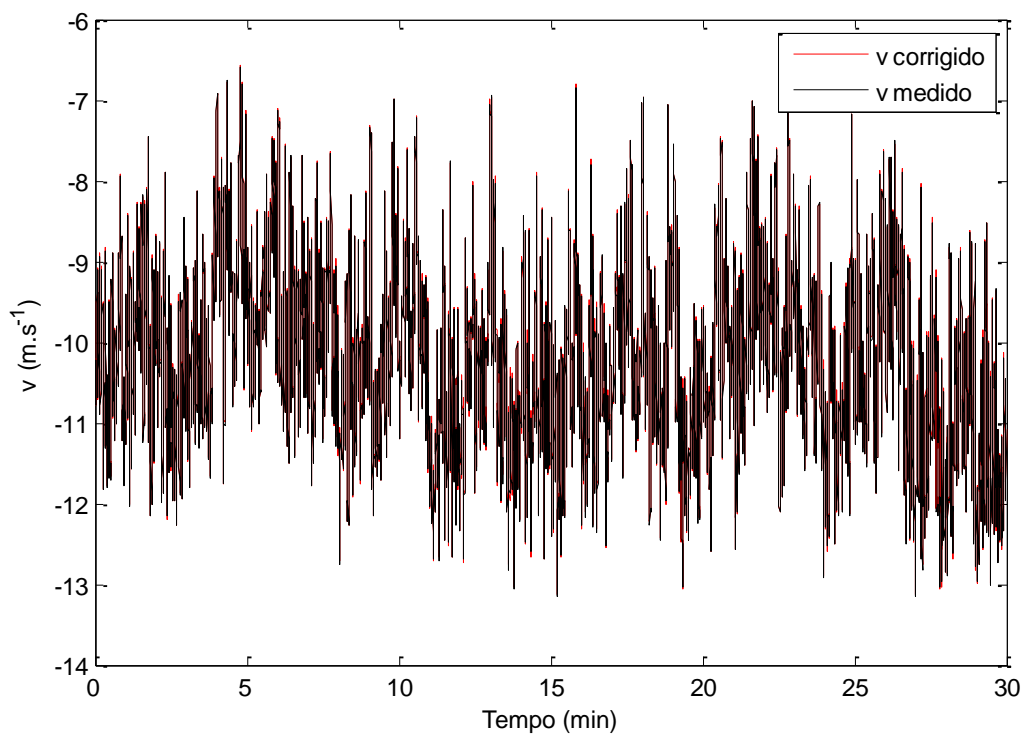


Figura 7: Componente meridional do vento, sendo em preto o dado medido e em vermelho o dado corrigido.

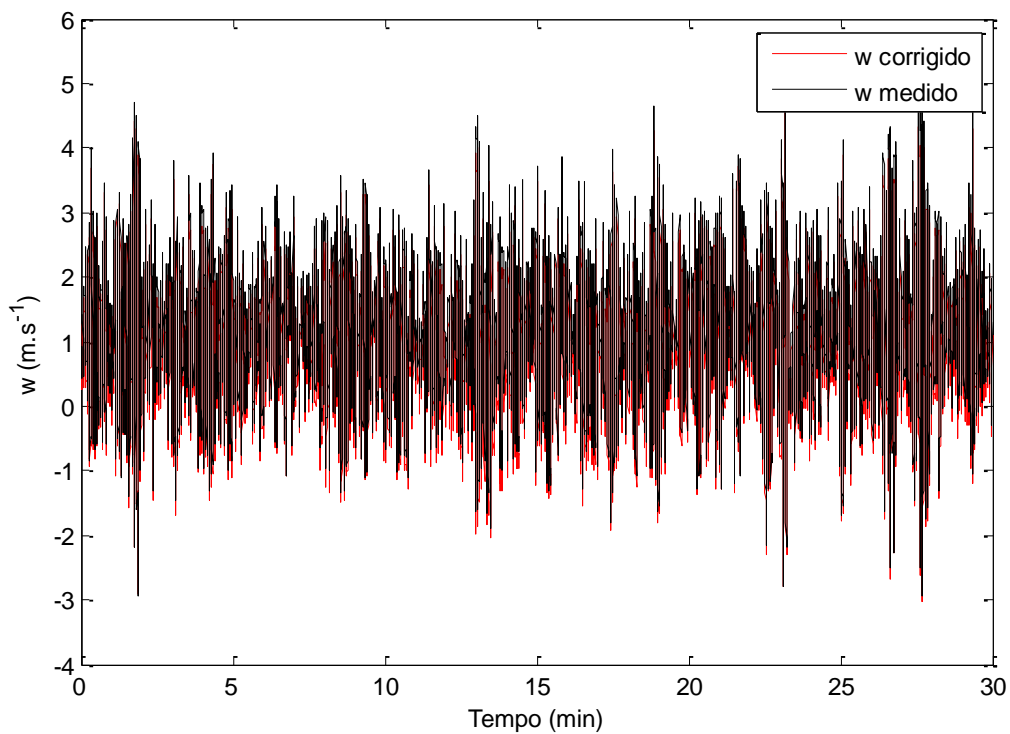


Figura 8: Componente vertical do vento, sendo em preto o dado medido e em vermelho o dado corrigido.

3 CONCLUSÃO

A metodologia apresentada neste trabalho, para correção do vetor velocidade do vento, demonstra-se uma teoria robusta, bem desenvolvida que aborda de modo satisfatório a proposta do trabalho. Dessa forma, acredita-se que os resultados podem ser melhorados através do uso de técnicas de análise de sinais, que sejam capazes de decompor os movimentos superpostos dos sensores e minimizar a resultados desprezíveis, a amplificação do sinal gerada pela operação de integração da técnica, dessa forma excluindo os fatores que levaram aos presentes resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EDSON, J.; HINTON, A.; PRADA, K.; HARE, J.; FAIRALL, C. Direct covariance flux estimates from mobile platforms at sea*. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 15, n. 2, p. 547–562, 1998.

GOLDSTEIN, H.; POOLE, C.; SAFKO, J. **Classical mechanics**. [S.l.]: Addison-esley, 1965. 398 p.

HUANG, N.; SHEN, Z.; LONG, S.; WU, M.; SHIH, H.; ZHENG, Q.; YEN, N.; TUNG, C.; LIU, H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, The Royal Society, v. 454, n. 1971, p. 903, 1998. ISSN 1364-5021.

LENSCHOW, D.; RAUPACH, M. The attenuation of fluctuations in scalar concentrations through sampling tubes. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union, v. 96, n. D8, p. 15259–15, 1991.

MCGILLIS, W.; EDSON, J.; HARE, J.; FAIRALL, C. Direct covariance air-sea co 2 fluxes. **Journal of Geophysical research**, v. 108, p. 16, 2001.

MILLER, S.; GOULDEN, M.; MENTON, M.; ROCHA, H. DA; FREITAS, H. DE; FIGUEIRA, A.; SOUSA, C. DIAS DE. Biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance. **Ecological Applications**, Eco Soc America, v. 14, n. sp4, p. 114–126, 2004.

MILLER, S.; HRISTOV, T.; EDSON, J.; FRIEHE, C. Platform motion effects on measurements of turbulence and air-sea exchange over the open ocean. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 25, n. 9, p. 1683–1694, 2008.

MILLER, S.; MARANDINO, C.; SALTZMAN, E. Ship-based measurement of air-sea CO₂ exchange by eddy covariance. **Journal of Geophysical Research, American Geophysical Union**, v. 115, n. D2, p. D02304, 2010.

PEZZI, L. P. Estudo observacional e numérico dos fluxos de calor, momentum e CO₂ na interface oceano-atmosfera do Oceano Atlântico Sul. Projeto Final. CNPq/PROANTAR, Edital 38/2009. 2009.

QUÉRÉ, C. L.; METZL, N. Natural processes regulating the ocean uptake of CO₂. **Scope-scientific Committee on Problems of the Environment International Council of Scientific Unions**, v. 62, p. 243–256, 2004.

SARMIENTO, J.; TOGGWEILER, J.; TAYLOR, N.; PALMER, J. Estimates of anthropogenic carbon uptake from four three-dimensional global ocean models. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, n. 1, p. 43–60, 2001.

SCHUSTER, U.; MCKINLEY, G.; BATES, N.; CHEVALLIER, F.; DONEY, S.; FAY, A.; LEFEVRE, N.; MANIZZA, M.; MATHIS, J.; METZL, N. et al. Atlantic and arctic sea-air CO₂ fluxes. **Atlantic**, v. 9, p. 10669–10724, 2012.

STULL, R. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Dordrecht: **Kluwer Academic Publishers**, 1988. 666 p