

Figura 14: Comparação entre uma série turbulenta sem tratamento e após a remoção linear de tendência com RLT.

que o proposto por McMillen [26].

Esta correção permite uma estimativa das flutuações, com maior confiabilidade em relação ao método FDR, pois subtrai-se um sinal com menor defasagem em relação ao sinal amostrado.

É possível, ainda analisando a figura (15), notar que a magnitude das flutuações calculadas pelo método FDR, estarão sendo superestimadas, uma vez que não há coerência de fase entre o sinal amostrado e o filtro passa-baixa.

Para se ter uma estimativa do erro sistemático, associado a cada processo de filtração, Rannik e Vesala (1999), sugerem como estimativa dos erros para cada uma das técnicas, as seguinte expressões:

$$F - \langle F(T) \rangle_{MS} \approx 2F \left(\frac{\tau_{w\theta}}{T} - \frac{\tau_{w\theta}^2}{T^2} \right), \quad (4.1)$$

para o tratamento com médias simples (MR), onde $\tau_{w\theta}$ é escala de tempo integral de correlação das variâncias da velocidade e temperatura.

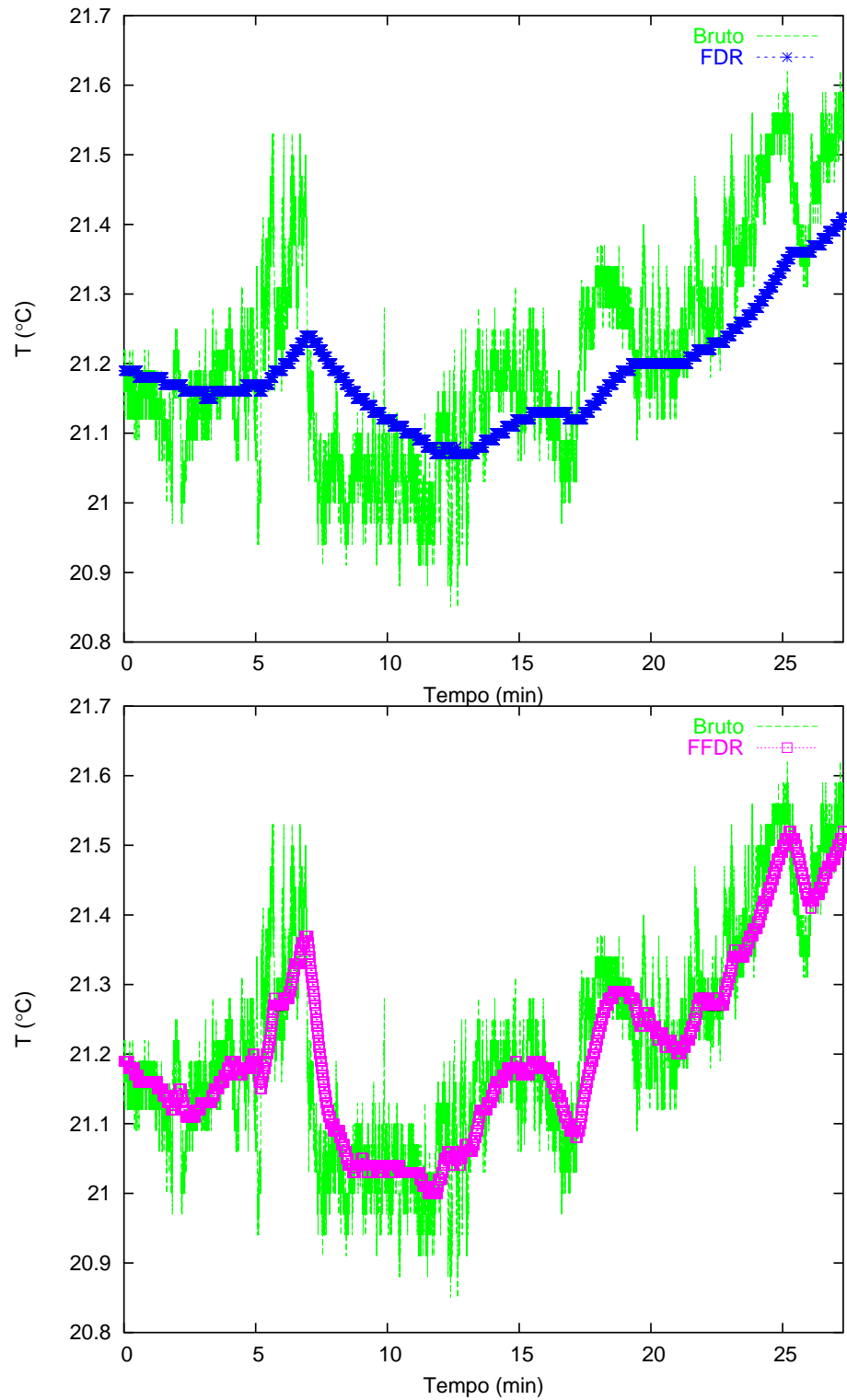


Figura 15: Comparação entre a filtragem por FDR e FFDR, com $\tau_R = 200$ s.

$$F - \langle F(T) \rangle|_{RLT} \approx 4F \left(\frac{\tau_{w\theta}}{T} - 2\frac{\tau_{w\theta}^2}{T^2} \right), \quad (4.2)$$

para o tratamento com removedor linear de tendência (RLT).

$$F - \langle F(T) \rangle|_{FDR} \approx F \left(\frac{\tau_{w\theta}}{\tau_R + \tau_{w\theta}} \right), \quad (4.3)$$

para o tratamento com removedor linear de tendência (RLT), onde τ_R é a escala de tempo do FDR.

Para determinar as escalas integrais nas expressões 4.1, 4.2 e 4.3, utilizamos o cálculo da função de correlação 4.4 de w e θ dos dados experimentais.

$$R_{w\theta} = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) \theta(t + \tau) d\tau, \quad (4.4)$$

Ao invés de fazer a integração numérica de 4.4, supomos que $\rho_{w\theta}(\tau)$ tem uma forma exponencial (Degrazia et al. 2004) [34]. Ajustando esta curva exponencial aos dados experimentais de correlação, e resolvendo esta expressão analiticamente, encontramos que $R_{(\tau=T)} = 0,37$, ou seja, neste ponto, a função de correlação pode ser empiricamente representada por uma função exponencialmente ajustada, conforme se demonstra a seguir:

$$R_{w\theta} = \frac{1}{T} \int_0^T w(t) \theta(t + \tau) dt = \overline{w'\theta'} \rho_{w\theta}(\tau), \quad (4.5)$$

seja:

$$\tau_{w\theta} \equiv \int_0^\infty \rho_{w\theta}(\tau) d\tau, \quad (4.6)$$

se:

$$\rho_{w\theta}(\tau) \equiv e^{-\tau/\tau_{w\theta}}, \quad (4.7)$$

teremos:

$$\rho_{w\theta}(\tau = \tau_{w\theta}) = e^{-1} \simeq 0,37. \quad (4.8)$$

No gráfico (Figura 16) estão representadas a correlação experimental e a curva de ajuste, onde inferimos que $\tau_{w\theta} = 5.30$ s, representa o tempo de correlação a ser utilizado nas expressões da estimativa do erro sistemático, no caso da série mostrada nesta figura.

Este procedimento foi executado em todas as séries e o erro sistemático calculado utilizando as expressões 4.1, 4.2 e 4.3.

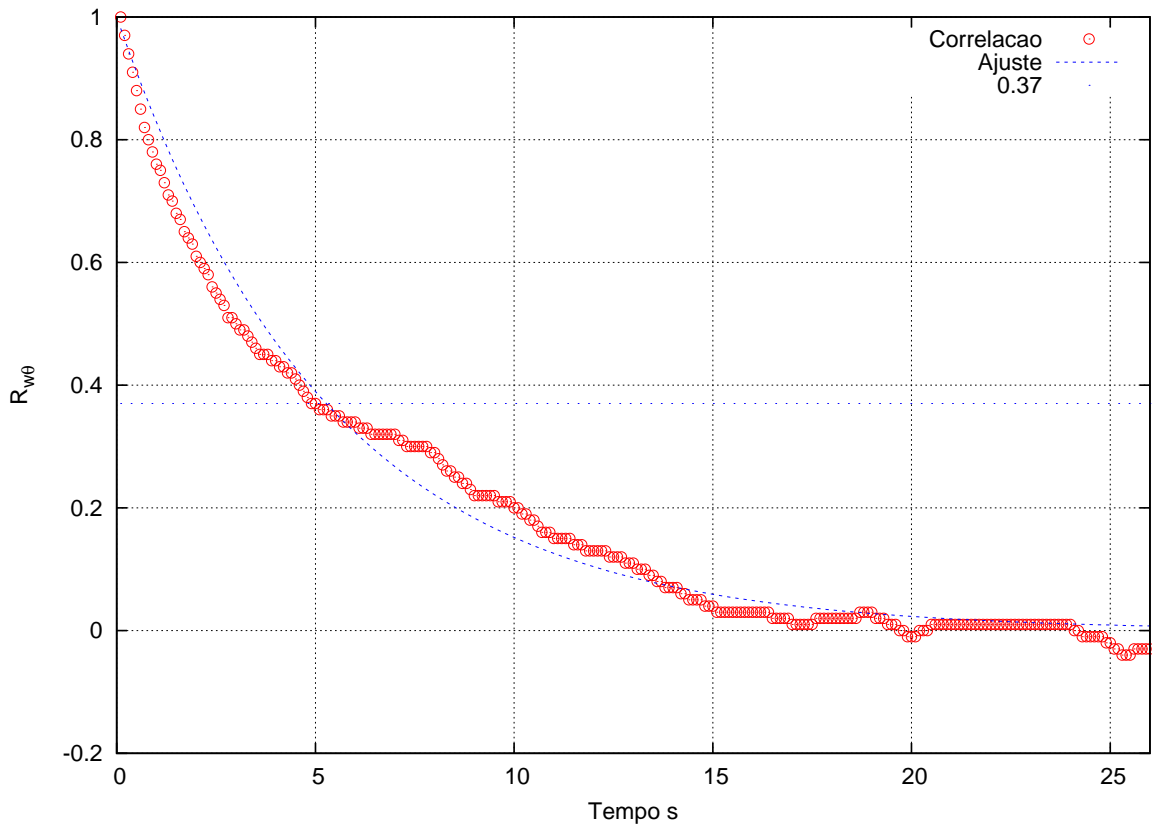


Figura 16: Gráfico da correlação da covariância de w e T (vermelho) e ajuste exponencial (azul), período de 25 seg.

A tabela 4 mostra uma comparação do erro sistemático, calculado após a aplicação de cada tratamento. Assim como nos estudos de Rannick e Vesala (1999), o erro sistemático após aplicar filtro digital recursivo, com escala de tempo de tempo $\tau_R = 400$ s é muito próximo de erro quando aplicamos a técnica RLT.

Na (Figura 17), uma série temporal turbulenta da velocidade vertical do vento, observamos o comportamento do FFDR com várias escalas de tempo τ_R . É importante notar que à medida que se vai aumentando o tempo de escala, o FFDR vai definindo uma série de baixa-freqüência, ou seja, vai selecionando as baixas-freqüências a serem filtradas. Quando o subtraír-mos da série original, deixará como resultado apenas aquelas altas freqüências sobrepostas a ele.

Visto da forma acima, entendemos o FFDR como um filtro passa-alta, quando nos referimos ao resultado de sua aplicação em uma série temporal turbulenta. O mesmo pode ser visto na (Figura 18), aplicado à uma série temporal turbulenta de temperatura.

Tabela 4: Comparativo do erro sistemático após o tratamento de séries temporais, com diferentes tipos e escala de filtro digital recursivo, no período das 12:00 hs até as 12:28 hs nos dias 04/02/02 e 30/08/02.

Tratamento	04/02/02		30/08/02	
	Escala Integral $\tau_{w\theta}$	ϵ %	Escala Integral $\tau_{w\theta}$	ϵ %
MS	4,50	0,41	5,30	0,52
RLT	4,14	0,82	5,38	1,07
FFDR(50)	1,53	2,96	2,00	3,84
FFDR(100)	2,21	2,16	2,85	2,77
FFDR(200)	2,93	1,44	3,66	1,79
FFDR(300)	3,20	1,05	4,10	1,34
FFDR(400)	3,31	0,82	4,41	1,09
FFDR(450)	3,35	0,73	4,54	0,99
FFDR(500)	3,36	0,66	4,64	0,91
FFDR(1000)	3,31	0,32	5,33	0,53

Nas (Figura 19) e (Figura 20), observamos a comparação entre as flutuações da velocidade vertical e temperatura respectivamente. Sem nenhum tratamento (Bruta), e estimadas com FFDR utilizando várias escalas de tempo para o filtro. É possível notar que à medida que aumentamos τ_R , a amplitude das flutuações também aumenta proporcionalmente.

Um resultado importante a ser observado, tanto na (Figura 19) quanto na (Figura 20), é o comportamento semelhante àquele obtido quando aplicamos a técnica RLT, ou seja, a remoção da tendência linear presente na série original.

As (Figuras 21) e (Figura 22) respectivamente, apresentam uma comparação entre as flutuações da velocidade vertical do vento e temperatura, estimadas com RLT e FFDR.

Nas (Figura 21 a.) e (Figura 22 a.) respectivamente observamos a comparação entre as flutuações calculadas sem tratamento (média simples, série Bruta) e tratadas com RLT.

Nas (Figura 21 b.-f.) e (Figura 22 b.-f.) respectivamente observamos a comparação entre as flutuações calculadas após o tratamento com RLT e com FFDR.

A (Figura 22), realça o importante resultado citado anteriormente, pois comparando na mesma figura o comportamento da flutuação estimada com RLT e FFDR, fica nítido o fato de que à medida de que aumenta-se τ_R , as estimativas para as flutuações calculadas com FFDR convergem para os valores calculados com RLT.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 4, $\tau_R = 400 s$ apresenta um erro sistemático da mesma ordem de erro calculado com RLT.

Observando na (Figura 22 e.) nota-se, que aplicação do FFDR na estimativa da flutuação possui uma magnitude menor. Ao mesmo tempo, apresenta uma tendência linear menor na série de flutuação, em relação à calculada com RLT.

A observação acima pode ser explicada pelo fato de que, o comportamento médio da flutuação, obtida com RLT, contém contribuições escalas de baixas frequências com períodos menores que o intervalo de média (27,3 min).

No caso do FFDR, estas contribuições foram filtradas pela própria natureza do filtro, em função do τ_R escolhido. Assim, se acaso escolhêssemos um τ_R suficientemente grande, seu comportamento seria próximo ao de uma reta.

Quando esta reta atingisse a máxima semelhança à reta de ajuste linear (reta linearmente ajustada à evolução média da série temporal Cf. 2.42) teríamos uma série de flutuações coincidente com a série calculada com RLT.

A suposição acima, porém, não faz muito sentido quando observamos os gráficos das estimativas do fluxo de calor sensível. O gráfico inferior da (25) elucidada este aspecto, quando mostra que o valor médio do fluxo turbulento utilizando FFDR com $\tau_R = 1000 s$, já convergiu para o valor sem tratamento. Ou seja, a partir desta escala de tempo para o filtro, já estaríamos superestimando o fluxo naquele intervalo (janela).

4.2 Fluxos

As (Figura 23 - 25), mostram os efeitos de diferentes escolhas, na escala de tempo τ_R do FFDR, na estimativa das covariâncias e fluxo turbulento médio. O que doravante chamo de covariância instantânea, entenda-se por produto instantâneo entre duas perturbações de grandezas diferentes, uma vez que a correta definição de covariância é a média deste produto num intervalo de tempo.

Na (Figura 23), o gráfico superior mostra a comparação entre, as covariâncias instantâneas sem tratamento, e após a aplicação do FFDR com $\tau_R = 10 s$. No gráfico inferior, observamos a evolução do fluxo turbulento médio, sem tratamento e após o tratamentos com FFDR.

A (Figura 24) o mesmo que a (Figura 23), porém com $\tau_R = 200 s$.

A (Figura 25) o mesmo que a (Figura 24), porém com $\tau_R = 1000 s$. O gráfico na

parte inferior, serve para justificar o porquê não é possível aceitar a possibilidade de aumentar τ_R .

A (Figura 26) o mesmo que a (Figura 25), porém com $\tau_R = 5000 s$.

Conforme discutido antes, ao aproximar o sinal da flutuação calculada com FFDR ao do calculado com RLT, observando a (Figura 22 f.), notamos que com $\tau_R = 1000 s$, o traço da flutuação de T ainda não convergiu para o traço da flutuação calculada com o RLT. Porém, no gráfico inferior (Figura 25), nota-se que com $\tau_R = 1000 s$, os valores das covariâncias e do fluxo turbulento médio já convergiram para os estimados sem nenhum tratamento. Valores para $\tau_R > 1000 s$, já resultariam em estimativas de fluxo maiores em relação àquelas calculadas sem nenhum tratamento. Ou seja, erroneamente uma superestimativa dos fluxos turbulentos, conforme nota-se no gráfico inferior da figura (Figura 26).

Estas figuras, (Figura 23 - 25), servem para demonstrar que a inadequada escolha de τ_R , pode gerar resultados completamente inconfiáveis, para a estimativa das covariâncias, e por conseqüente, os fluxos turbulentos.

4.3 Espectros

As (Figuras 27 e 28) mostram que os espectros, após os tratamentos dos dados, apresentam resultados em boa concordância com os espectros clássicos para uma camada limite superficial. Estes resultados são bem claros nas estimativas espectrais de velocidade vertical (28), exceto quando tratado com FFDR com τ_R muito grande, que é o caso dos gráficos (e.) em ambas as figuras.

Nota-se também, τ_R muito pequeno (a.) em ambas as figuras, as menores frequências são fortemente atenuadas.

A medida que se aumenta o valor de τ_R , progressivamente as escalas de baixas frequências, com períodos inferiores à janela de amostragem, vão sendo incorporadas na estimativa espectral.

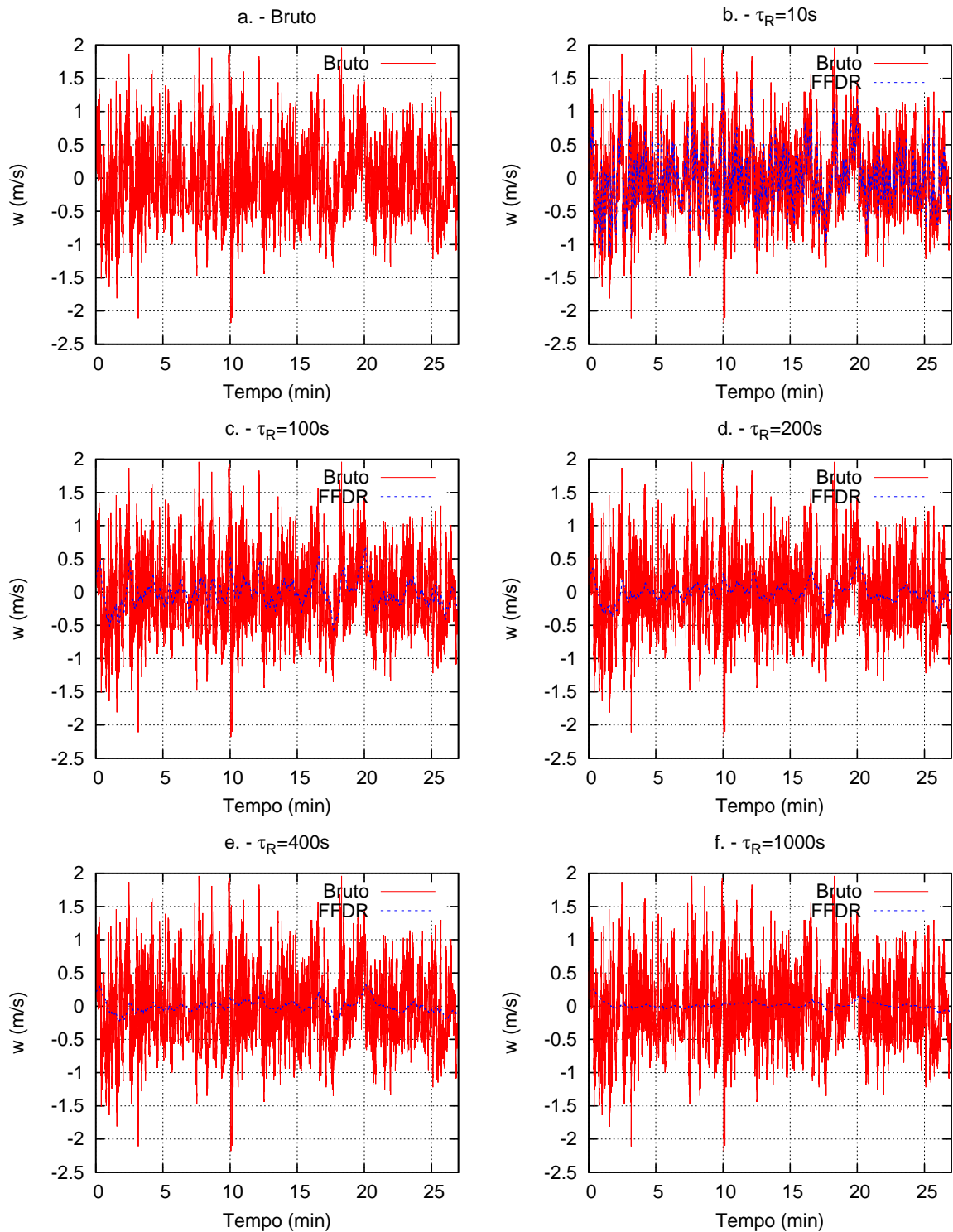


Figura 17: Velocidade vertical amostrada à 10 Hz, com $\tau_R = 10 - 1000$ s, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 04/02/02.

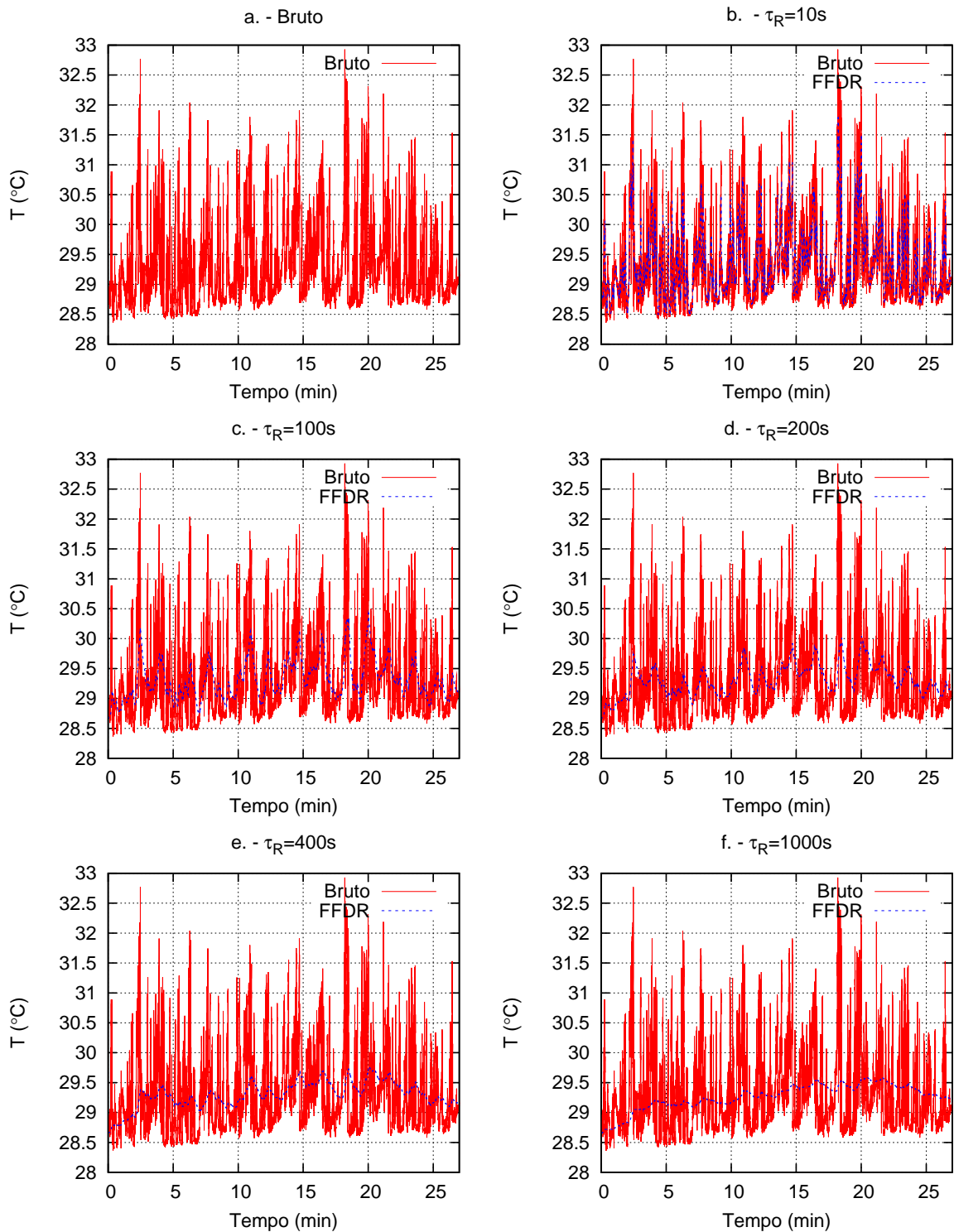


Figura 18: Temperatura amostrada à 10 Hz, com $\tau_R = 10 - 1000 s$, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 04/02/02.

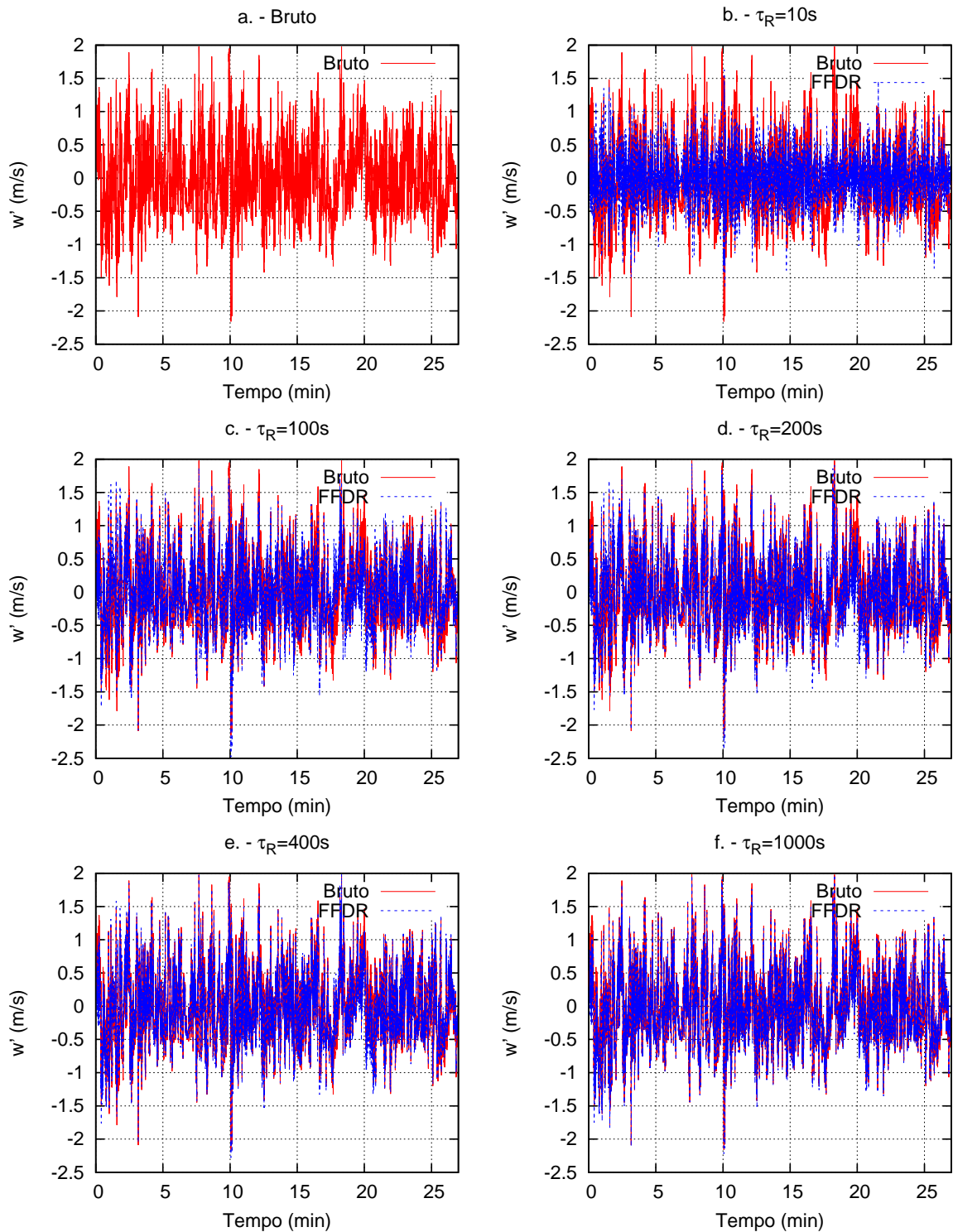


Figura 19: Flutuação da velocidade vertical amostrada à 10 Hz, com $\tau_R = 10 - 1000$ s, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 04/02/02.

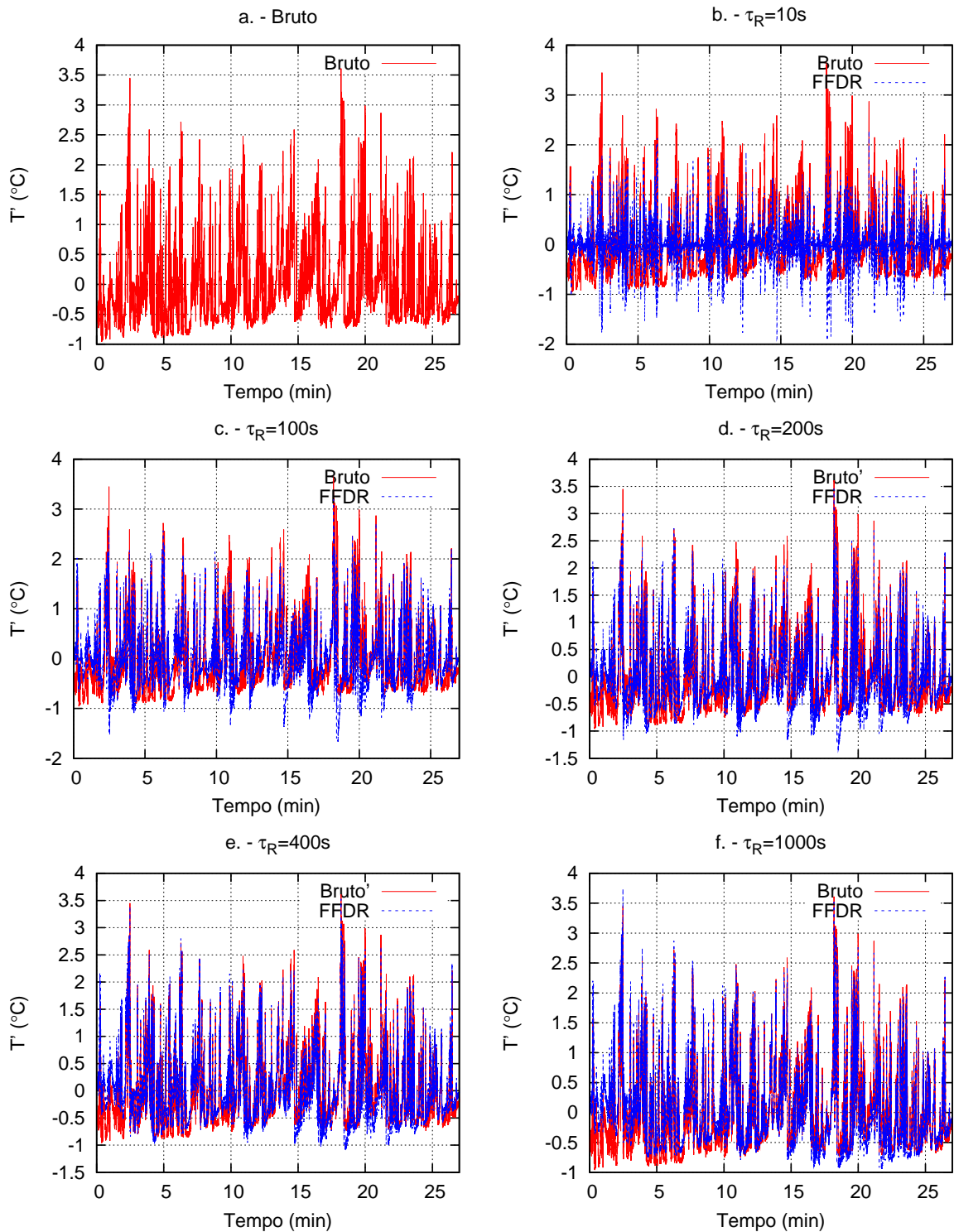


Figura 20: Flutuação da temperatura amostrada à 10 Hz, com $\tau_R = 10 - 1000$ s, entre 12:00 e 12:27 hs, dia 04/02/02.