

HENRIQUE FERRO DUARTE

**UM MÉTODO PARA MEDIÇÕES DE FLUXO DE CALOR
LATENTE A PARTIR DE SENSORES DE UMIDADE
CAPACITIVOS**

Curitiba

2006

HENRIQUE FERRO DUARTE

**UM MÉTODO PARA MEDIÇÕES DE FLUXO DE CALOR
LATENTE A PARTIR DE SENSORES DE UMIDADE
CAPACITIVOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Mestre em Ciências,
Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéri-
cos em Engenharia, Setores de Tecnologia e Ci-
ências Exatas, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Nelson Luís Dias.

Curitiba

2006

TERMO DE APROVAÇÃO

HENRIQUE FERRO DUARTE

UM MÉTODO PARA MEDIÇÕES DE FLUXO DE CALOR LATENTE A PARTIR DE SENSORES DE UMIDADE CAPACITIVOS

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia dos Setores de Tecnologia e de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná pela seguinte banca examinadora:

Orientador:

Nelson Luís Dias

Nelson Luís Dias, PhD.

Departamento de Transportes, UFPR

Otávio Costa Acevedo

Otávio Costa Acevedo, PhD.

Departamento de Física, UFSM

Liliana Madalena Gramani Cumin

Liliana Madalena Gramani Cumin, DSc.

Departamento de Matemática, UFPR

Afonso Augusto Magalhães de Araujo

Afonso Augusto Magalhães de Araujo, DSc.

Departamento de Transportes, UFPR

Curitiba, 13 de setembro de 2006.

Agradecimentos

Aos meus pais, Carlos Augusto Duarte e Maristela Barbosa Ferro, o meu eterno agradecimento por terem conseguido me propiciar, apesar de todas as dificuldades, um ensino fundamental e médio de boa qualidade que possibilitou a minha entrada na Universidade Federal do Paraná, no curso de Engenharia Ambiental, início de minha jornada acadêmica.

Se no presente estou finalizando um mestrado, devo isto em grande parte ao professor Nelson Dias, que me abriu as portas da Pesquisa logo em meu segundo ano de graduação, com uma bolsa de iniciação científica que culminou no meu ingresso no Programa de Pós Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia. A ele sou também imensamente grato por todas as aulas ministradas tanto na graduação quanto na pós-graduação, por todas as discussões acadêmicas e não acadêmicas, pela orientação deste trabalho e por todo o conhecimento técnico e científico passado, que me engrandeceram como pessoa e como profissional. Ao Nelson o meu sincero muito obrigado.

Gostaria de agradecer também a todos os integrantes do Lemma a ajuda, o companheirismo e todos os impagáveis momentos de descontração. Agradeço especialmente ao Leocádio Grodski, à Selma Regina Maggiotto e ao Sandro Vissotto a condução dos experimentos de campo cujos dados foram de extrema importância para este trabalho.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos cada uma das mensagens de incentivo, que me deram forças para prosseguir nesta caminhada. Agradeço especialmente à minha namorada Diana Cancelli, companheira durante toda a minha jornada na Engenharia Ambiental e no mestrado no PPGMNE, nos momentos bons e nos momentos difíceis.

Agradeço aos professores Otavio Acevedo, Liliana Gramani e Afonso Araujo o interesse e a disponibilidade de participarem da banca argüidora, além de todas as críticas e sugestões propostas, que colaboraram para o aprimoramento deste trabalho.

Para finalizar, agradeço ao Simepar a infra-estrutura oferecida e as bolsas de auxílio que possibilitaram a minha dedicação à pesquisa em tempo integral.

Sumário

Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	xi
Abstract	xii
Resumo	xiii
1 Introdução	1
1.1 Objetivo geral	2
1.2 Objetivo específico	2
1.3 Metodologia do trabalho	3
1.4 Importância do trabalho	3
1.5 Organização do trabalho	3
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Conceitos básicos	5
2.2 Correções de fluxos	9
2.2.1 Método das Covariâncias Turbulentas Passa Banda	11
2.2.2 Correções no domínio do tempo	14
3 Teoria para a correção do fluxo LE	16
3.1 Funções de autocovariância (ideal e atenuada) e caracterização do sensor capacitivo	17

3.2	Funções de covariância cruzada (ideal e atenuada) e dedução do fator de correção	22
4	Aplicação do método de correção desenvolvido	28
4.1	Sítios experimentais e conjunto de dados	28
4.2	Preparação dos dados	34
4.2.1	Formatação e controle de qualidade	34
4.2.2	Pré-processamento	39
4.2.2.1	Rotação de coordenadas	40
4.2.2.2	Flutuações via filtro autorecursivo	43
4.3	Calibração do modelo de correção	44
4.3.1	Funções de autocovariância amostrais e ajuste dos parâmetros $\mathcal{I}_{rr}$, T e Λ <i>run a run</i>	44
4.3.2	Função de covariância cruzada amostral e ajuste do parâmetro $\mathcal{I}_{wr}$ <i>run a run</i>	60
4.3.3	Equações e parâmetros finais	77
4.4	Resultados e análise	81
5	Conclusões e recomendações	90
	Apêndice A – Sonda CS500 adaptada para medições em alta frequência	94
	Apêndice B – O formato de arquivo <i>turb</i>	97
	Apêndice C – Higrômetro infravermelho Campbell Sci. KH20	106
	Apêndice D – Integração numérica — Método de Romberg	110
	Apêndice E – Algoritmo de Levenberg-Marquardt	115
	Referências Bibliográficas	119

Lista de Figuras

- 3.1 Espectros da densidade de vapor d'água registrada por um higrômetro infravermelho $S_{r\alpha, r\alpha}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e da densidade registrada por um sensor capacitivo $S_{r\beta, r\beta}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) durante experimento no Lago de Furnas em 11/06/2003 05:00-06:00h. Para um gráfico mais limpo foram plotadas somente as médias para faixas de frequência (pontos); para $S_{r\alpha, r\alpha}$ ainda foram plotados os desvios-padrão. As curvas foram ajustadas utilizando o modelo $S_{r,r} = c_1 / (1 + c_2^{5/3})$, através dos parâmetros c_1 e c_2 18
- 3.2 Função de covariância cruzada $C_{w\alpha, r\alpha}$ amostral, obtida através de medições com instrumentos de resposta rápida (anemômetro sônico para a velocidade vertical do vento e higrômetro infravermelho para a densidade de vapor d'água) durante experimento no Lago de Furnas, 24/07/2005 04:00-04:30h.: note que a mesma é par (de forma geral), evidenciando que $Q_{w, r\alpha}$ é muito próximo de zero. 24
- 3.3 Função de covariância cruzada $C_{w\alpha, r\alpha}$ amostral, obtida através de medições com instrumentos de resposta rápida (anemômetro sônico para a velocidade vertical do vento e higrômetro infravermelho para a densidade de vapor d'água) durante experimento no Lago de Furnas, 24/07/2005 16:30-17:00h.: neste caso, o espectro de quadratura $Q_{w, r\alpha}$ é claramente diferente de zero, uma vez que não há paridade na função amostral $C_{w\alpha, r\alpha}$ 24
- 4.1 Estação micrometeorológica de Ponta Grossa, palco do Exfu-2. 29
- 4.2 Configuração dos instrumentos utilizados no Exfu-2, na estação micrometeorológica de Ponta Grossa: anemômetro Young 81000 e sonda Campbell Sci. CS500 no abrigo de PVC (primeiro plano); anemômetro Campbell Sci. CSAT-3 e higrômetro infravermelho Campbell Sci. KH20 (segundo plano). 30
- 4.3 Estação micrometeorológica no Lago de Furnas (Guapé, Minas Gerais). 31

4.4	Configuração dos equipamentos após o Exfu-3, na estação micrometeorológica de Guapé: anemômetro Young 81000 e sonda Campbell Sci. CS500 no abrigo de PVC à esquerda; analisador de $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ Campbell Sci. Licor-7500 à direita.	31
4.5	Configuração dos instrumentos utilizados no Exfu-4, na estação micrometeorológica de Guapé.	34
4.6	Referencial para o cálculo da direção do vento (padrão meteorológico): vento norte (<i>i.e.</i> oriundo do norte) corresponde a 0° ; vento leste corresponde a 90° e assim por diante.	38
4.7	Intervalo problemático de direções do vento na estação micrometeorológica de Guapé (Lago de Furnas): <i>runs</i> de 30 minutos cujo vetor velocidade média do vento incide neste intervalo são desconsiderados.	38
4.8	Rotação de eixos para alinhar o vetor velocidade média do vento com Ox : a linha pontilhada OP no plano Ox_0y_0 indica a direção da velocidade do vento horizontal em relação a Ox_0 , α_x ; em seguida, uma rotação α_z em torno de Oy (que também está no plano Ox_0y_0 , e que é perpendicular a OP) torna $\bar{W} = 0$	41
4.9	Ilustração da janela de Parzen (equação 4.22) para a condição particular $t_0 = 50\text{s}$.	46
4.10	Exemplo de aplicação da janela de Parzen: função de autocovariância amostral C_{r_α, r_α} antes e depois da suavização (Exfu-2, 17/01/2004 08:30 $\rightarrow$ 09:00 h).	47
4.11	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 16/01/2004 07:00-07:30h.	52
4.12	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 16/01/2004 15:00-15:30h.	53
4.13	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 17/01/2004 09:30-10:00h.	53
4.14	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 17/01/2004 15:00-15:30h.	54

4.15	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 19/01/2004 10:00-10:30h.....	54
4.16	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 19/01/2004 12:00-12:30h.....	55
4.17	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 20/07/2005 12:30-13:00h.	55
4.18	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 20/07/2005 19:30-20:00h.	56
4.19	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 21/07/2005 04:00-04:30h.	56
4.20	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 21/07/2005 20:30-21:00h.	57
4.21	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 25/07/2005 06:30-07:00h.	57
4.22	Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 25/07/2005 17:30-18:00h.	58
4.23	Tempo de resposta ajustado <i>versus</i> temperatura média do <i>run</i> , para os experimentos Exfu-2 (círculos pintados e linha cheia ($\bar{T} = 0,478$ s)) e Exfu-4 (círculos vazios e linha tracejada ($\bar{T} = 3,669$ s)).	59
4.24	Parâmetro Λ^2 ajustado <i>versus</i> temperatura média do <i>run</i> , para os experimentos Exfu-2 (círculos pintados e linha cheia ($\Lambda^2 = 0,0219711\bar{\Theta} + 0,330065$)) e Exfu-4 (círculos vazios e linha tracejada ($\Lambda^2 = 0,0645030\bar{\Theta} - 0,707952$)).	60

4.25	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 15/01/2004 20:30-21:00h.....	70
4.26	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 16/01/2004 18:30-19:00h.....	70
4.27	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 17/01/2004 14:30-15:00h.....	71
4.28	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 19/01/2004 12:00-12:30h.....	71
4.29	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 19/01/2004 19:30-20:00h.....	72
4.30	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 20/01/2004 06:30-07:00h.....	72
4.31	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 22/07/2005 02:30-03:00h.....	73
4.32	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 22/07/2005 10:30-11:00h.....	73
4.33	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 23/07/2005 13:30-14:00h.....	74
4.34	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 24/07/2005 07:30-08:00h.....	74
4.35	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 25/07/2005 19:00-19:30h.....	75
4.36	Função estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 26/07/2005 21:30-22:00h.....	75
4.37	Escala integral $\mathcal{T}_{wr}$ em função da velocidade média horizontal do vento dividida pela altura de medição, para os experimentos Exfu-2 (círculos pintados e linha cheia (ajuste)) e Exfu-4 (círculos vazios e linha tracejada (ajuste)).	77
4.38	Superfície- K para a sonda CS500 <i>desencapada</i> .	79
4.39	<i>Contour plot</i> da função K para a sonda CS500 <i>desencapada</i> .	79
4.40	Superfície- K para a sonda CS500 <i>encapada</i> .	80

4.41	<i>Contour plot</i> da função K para a sonda CS500 <i>encapada</i>	80
4.42	Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha}$ (anemômetro CSAT3 + higrômetro KH20) ao longo do Exfu-2.	83
4.43	Fluxo corrigido $KLE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha}$ (anemômetro CSAT3 + higrômetro KH20) ao longo do Exfu-2.	83
4.44	Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\beta\alpha 2}$ (anemômetro Young 81000 + analisador Licor-7500) ao longo dos 10 primeiros dias do Exfu-3b.	84
4.45	Fluxo corrigido $KLE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\beta\alpha 2}$ (anemômetro Young 81000 + analisador Licor-7500) ao longo dos 10 primeiros dias do Exfu-3b.	84
4.46	Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha 2}$ (anemômetro CSAT3 + analisador Licor-7500) ao longo do Exfu-4.	85
4.47	Fluxo corrigido $KLE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha 2}$ (anemômetro CSAT3 + analisador Licor-7500) ao longo do Exfu-4.	85
4.48	Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) <i>versus</i> fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha}$ (anemômetro CSAT3 + higrômetro KH20) — Exfu-2.	86
4.49	Fluxo corrigido $KLE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) <i>versus</i> fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha}$ (anemômetro CSAT3 + higrômetro KH20) — Exfu-2.	86
4.50	Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) <i>versus</i> fluxo ideal $LE_{\beta\alpha 2}$ (anemômetro Young 81000 + analisador Licor-7500) — Exfu-3b.	87
4.51	Fluxo corrigido $KLE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) <i>versus</i> fluxo ideal $LE_{\beta\alpha 2}$ (anemômetro Young 81000 + analisador Licor-7500) — Exfu-3b.	87
4.52	Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) <i>versus</i> fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha 2}$ (anemômetro CSAT3 + analisador Licor-7500) — Exfu-4.	88
4.53	Fluxo corrigido $KLE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) <i>versus</i> fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha 2}$ (anemômetro CSAT3 + analisador Licor-7500) — Exfu-4.	88
A.1	Sonda Campbell Sci. CS500 com seu conjunto protetor (na extremidade): <i>grid</i> de plástico ABS e membrana de teflon.	95

A.2	Abrigo de PVC ventilado desenvolvido pelo Lemma para a sonda Campbell Sci. CS500.	96
D.1	O refinamento seqüencial na regra do trapézio incorpora a informação dos estágios anteriores e calcula o integrando somente nos pontos necessários para o refinamento da malha. A última linha traz o número total de cálculos da função após o estágio de refinamento #3 (figura adaptada de Press et al. (1992)).	112

Lista de Tabelas

4.1	Relação dos equipamentos para medição de fluxos utilizados nos experimentos Exfu-2, Exfu-3b e Exfu-4 e variáveis associadas.	33
4.2	Valores ajustados via Levenberg-Marquardt para $\mathcal{T}_{rr}$, T e Λ^2 , <i>run a run</i> — Exfu-2	48
4.3	Valores ajustados via Levenberg-Marquardt para $\mathcal{T}_{rr}$, T e Λ^2 , <i>run a run</i> — Exfu-4	49
4.4	Valores ajustados via Levenberg-Marquardt para $\mathcal{T}_{wr}$ <i>run a run</i> — Exfu-2	61
4.5	Valores ajustados via Levenberg-Marquardt para $\mathcal{T}_{wr}$ <i>run a run</i> — Exfu-4	65
4.6	Número total de <i>runs</i> que passaram pelo controle de qualidade (dados brutos sem falhas e direção de vento favorável) e quantidade de <i>runs</i> empregada nas fases de calibração e de validação da nova função de correção proposta. Os números entre parênteses correspondem ao número de <i>runs</i> estáveis associados. .	82
4.7	Viés (VIES), raíz do erro médio quadrático (REMQ) e erro médio absoluto (EMA) dos fluxos $LE_{\beta\beta}$ antes e após correção, comparados aos fluxos ideais. ...	82

Abstract

The eddy covariance method has been in widespread use in the last decades as the micrometeorological method of choice for latent heat flux measurements above natural surfaces. It is based on the high-frequency joint measurement of vertical velocity and water vapor density made with fast-response sensors (usually, sonic anemometers and infrared hygrometers). The use of relatively slow capacitive hygrometers is a cost-effective and robust alternative, which however comes at the cost of flux attenuation in the high frequencies. A new methodology has been developed which aims at restoring the time-domain measured fluxes by taking into account the humidity sensor's response time and a temperature-dependent attenuation factor which uniformly dampens all frequencies. The response of the capacitive sensor has been modeled so that its sample autocovariance function can be reproduced from the autocovariance measured by a fast-response infrared hygrometer, by means of a suitable transfer function whose parameters are the capacitive sensor's time response and attenuation factor. With the sensor's characteristics correctly modelled, it is then possible to predict analytically a correction factor for the time-domain water vapor flux measured with the slower sensor. The methodology has been tested with field data from 3 different micrometeorological experiments — two over water, at Furnas' Lake (Minas Gerais State, Southeastern Brazil) and one over land at Ponta Grossa (Paraná State, Southern Brazil). Two configurations of the humidity sensor have been tested, both with and without a protective cap; the "uncapped" version has better response characteristics, but is also less robust and therefore not able to withstand long unattended measurement periods in the field. Correction factors for both versions were calculated and tested against standard measurements with infrared hygrometers, with satisfactory results and mean square errors no greater than 21 W m^{-2} .

Resumo

O Método das Covariâncias Turbulentas vem sendo amplamente utilizado nas últimas décadas para a medição micrometeorológica do fluxo de calor latente em superfícies naturais, baseando-se em medições conjuntas de alta frequência da velocidade vertical do vento e da densidade de vapor d'água, realizadas com o auxílio de sensores de resposta rápida (usualmente anemômetros sônicos e higrômetros infravermelhos). A utilização de higrômetros capacitivos relativamente lentos é uma alternativa acessível e robusta, mas que implica na atenuação dos fluxos nas altas frequências. Uma nova metodologia foi desenvolvida visando à restauração no domínio do tempo dos fluxos medidos, considerando o tempo de resposta do sensor de umidade e um fator de atenuação dependente da temperatura do ar, que amortece todas as frequências uniformemente. A resposta do sensor capacitivo foi modelada de modo que sua função de autocovariância amostral possa ser reproduzida a partir da autocovariância medida por um higrômetro infravermelho de resposta rápida, através de uma função de transferência adequada cujos parâmetros são o tempo de resposta do sensor capacitivo e o fator de atenuação. Com as características do sensor corretamente modeladas, é então possível prever analiticamente um fator de correção no domínio do tempo para o fluxo de vapor d'água medido com o sensor mais lento. A metodologia foi testada com dados de campo obtidos em três experimentos micrometeorológicos diferentes — dois sobre água, no Lago de Furnas (Estado de Minas Gerais) e um sobre terra na cidade de Ponta Grossa (Estado do Paraná). Duas configurações para o sensor capacitivo foram testadas, com e sem uma capa protetora; a versão “desencapada” apresenta características de resposta melhores, mas é menos robusta e portanto incapaz de permanecer em campo durante longos períodos de medição sem assistência. Os fatores de correção para ambas as versões foram calculados e testados contra as medições padrão realizadas através de higrômetros infravermelhos, com resultados satisfatórios e erro médio quadrático inferior a 21 W m^{-2} .

1 Introdução

A medição dos fluxos de calor superficiais é fundamental para a compreensão do balanço de energia superficial, que além de ser um termo chave no ciclo hidrológico, controla toda a dinâmica da camada limite atmosférica. Dos métodos disponíveis para a medição meteorológica do fluxo de calor latente LE (fluxo de calor associado à evaporação E , onde L é o calor latente de evaporação da água), o Método das Covariâncias Turbulentas (MCT) vem sendo amplamente utilizado nas últimas décadas, no lugar de outras opções tais como o Método do Balanço de Energia (razão de Bowen), uma vez que o MCT é considerado mais preciso e que os sensores de resposta rápida necessários para o mesmo foram relativamente popularizados.

Para o cálculo de LE com o MCT são necessárias medições em alta frequência da velocidade vertical do vento e da densidade de vapor d'água, realizadas usualmente através de anemômetros sônicos e higrômetros infravermelhos de resposta rápida. Este modelo de higrômetro providencia leituras precisas, porém é de difícil operação quando são desejadas medições a longo prazo. Além de sua curva de calibração geralmente depender da própria densidade de vapor d'água, seu funcionamento é prejudicado na ocorrência de chuva ou de orvalho. Os anemômetros sônicos também não funcionam corretamente nestas condições, porém se “recuperam” mais rapidamente que os higrômetros infravermelhos, que dependem da evaporação da água acumulada em seu caminho óptico para voltarem a funcionar de maneira apropriada. As impurezas que ao longo do tempo se acumulam na janela dos sensores ópticos também devem ser removidas periodicamente. Por todos estes motivos, o emprego deste tipo de equipamento em campanhas de medição de longa duração é muito difícil. Outro fator importante é o custo do equipamento, que apesar de sua relativa popularização, ainda é elevado.

Uma alternativa de custo mais acessível e mais robusta para os higrômetros infravermelhos são os sensores capacitivos de umidade, embora apresentem uma resposta mais lenta às variações da grandeza no ambiente. O revés da utilização de tais sensores, assim como de qualquer sensor de resposta lenta, consiste na atenuação dos fluxos obtidos, devido à insensibilidade dos mesmos às componentes de mais alta frequência.

Diversas metodologias já foram desenvolvidas para a correção dos fluxos atenuados devido à utilização de sensores de escalares com resposta inadequada. A maioria das correções propostas trabalham no domínio da frequência (co-espectros entre velocidade vertical do vento e densidade de vapor d'água), e requerem um grande trabalho computacional devido às transformadas de Fourier e integrações numéricas associadas, o que acaba por impossibilitar a utilização das mesmas em tempo real (*i.e.* obtenção do fator de correção e do fluxo atenuado de forma simultânea).

1.1 Objetivo geral

Tendo em vista o problema abordado no início deste capítulo, o objetivo geral deste trabalho é propor uma metodologia para a correção, no domínio do tempo, do fluxo de calor latente monitorado por um anemômetro sônico em conjunto com um sensor capacitivo de umidade de resposta lenta, de modo que tal correção possa ser programada em um dispositivo de coleta de dados para a restauração imediata dos fluxos atenuados medidos, se for desejado.

1.2 Objetivo específico

O objetivo específico deste trabalho é propor um modelo que descreva o comportamento de um sensor de umidade capacitivo genérico, e a partir do mesmo propor um fator de correção $K = LE_\alpha / LE_\beta$, onde LE_α indica o fluxo de calor latente real e LE_β indica o fluxo de calor latente atenuado. Conhecendo-se o fator K , o fluxo atenuado pode ser restaurado a partir da relação KLE_β .

1.3 Metodologia do trabalho

A partir da definição de um modelo para o comportamento do sensor capacitivo, em função de um tempo de resposta fixo e de um fator de atenuação dependente da temperatura média do ar, foi deduzido analiticamente o fator de correção K . Foram também deduzidas analiticamente as funções de autocovariância ideal e atenuada (associadas respectivamente à densidade de vapor d'água real e à densidade obtida através de um sensor capacitivo) e a função de covariância cruzada ideal (associada à velocidade vertical do vento e à densidade de vapor d'água real), que em conjunto com as respectivas funções amostrais obtidas em dois experimentos intensivos de campo, permitiram a calibração dos parâmetros utilizados na função K para um modelo de sensor capacitivo. Os dados destes experimentos, somados aos dados de um terceiro, foram utilizados para a validação do fator de correção K .

1.4 Importância do trabalho

Uma vez disponível um fator de correção confiável, os sensores capacitivos com resposta limitada podem ser utilizados proporcionando resultados igualmente satisfatórios comparados aos higrômetros infravermelhos, que são equipamentos de custo muito mais elevado, além de serem pouco robustos. Um equipamento mais robusto e de preço mais acessível, aliado a um fator de correção confiável, pode viabilizar a construção ou ampliação de redes de monitoramento de fluxos, relevantes para o setor elétrico e para modelos de previsão do tempo, dentre outras aplicações.

1.5 Organização do trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos, incluindo o presente de caráter introdutório.

No capítulo 2 serão revistos alguns conceitos básicos visando ambientar o leitor ao tema abordado, dentre eles a equação do balanço de energia, a definição de camada limite atmosférica.

rica, a Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov, a decomposição de Reynolds e finalmente o Método das Covariâncias Turbulentas para medições de fluxos, a “pedra fundamental” deste trabalho. No mesmo capítulo ainda serão revistas diversas metodologias disponíveis na literatura para a correção de fluxos atenuados, que atuam tanto no domínio da frequência quanto do tempo.

No capítulo 3 será desenvolvida a nova metodologia de correção para o fluxo LE atenuado. Serão deduzidas as funções de autocovariância e de covariância cruzada ideais e atenuadas, visando à caracterização do sensor capacitivo e à obtenção do fator de correção K .

O capítulo 4 será reservado à validação da nova metodologia de correção. Serão detalhados os sítios experimentais e o conjunto de dados utilizados, o procedimento de preparação, formatação, controle de qualidade e de pré-processamento dos mesmos, o procedimento de calibração dos parâmetros da função de correção e serão mostrados e analisados os resultados obtidos.

O capítulo 5 finaliza o trabalho com as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Conceitos básicos

Nesta seção serão introduzidos alguns conceitos básicos, visando ambientar o leitor ao tema abordado e facilitar a leitura da sequência deste trabalho.

As trocas de radiação na superfície da Terra são compostas dos fluxos de radiação de onda curta (0,1 a 4 μm) e dos fluxos de radiação térmica de onda longa (4 a 100 μm). Os fluxos em direção à superfície são constituídos pela radiação solar incidente global R_{si} (radiação direta somada à difusa) em ondas curtas e pela radiação de onda longa emitida pela atmosfera R_{ai} , que tem como principal origem a agitação térmica das moléculas de vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio. Já os fluxos que saem da superfície são constituídos pelas radiações de onda curta e longa refletidas (R_{sr} e R_{ar} respectivamente), além da radiação de onda longa emitida pela superfície R_e , proporcional à sua temperatura absoluta elevada à quarta potência (FONTANA et al., 1991; AMARAKOON; CHEN, 1999). O saldo de todas as componentes é chamado de radiação líquida (R_l)

$$R_l = R_{si} - R_{sr} + R_{ai} - R_{ar} - R_e, \quad (2.1)$$

que na superfície terrestre é utilizado para os processos de evaporação e transpiração das plantas, para os processos de aquecimento do ar, do solo e das plantas, e também para o processo de fotossíntese (FONTANA et al., 1991). Estes processos são equacionados por

$$R_l = H + LE + G, \quad (2.2)$$

onde H é o fluxo de calor sensível, L é o calor latente de evaporação da água, E é a evapotranspiração da superfície (evaporação somada à transpiração da cobertura vegetal) e G é o fluxo de calor da superfície para a base do volume de controle (solo ou água). O termo LE corresponde ao fluxo de calor latente associado ao fluxo de massa E .

Estes fluxos superficiais são os principais forçantes das mudanças do estado da atmosfera que ocorrem na Camada Limite Atmosférica (CLA). A CLA é compreendida pelos primeiros 1000-2000 metros da atmosfera, onde sua altura e estrutura são determinadas pelas propriedades físicas e térmicas da superfície que repousa abaixo, em conjunto com a dinâmica e a termodinâmica da troposfera. Acima da CLA está a atmosfera livre, onde o escoamento não é influenciado pelas propriedades da superfície. Variações temporais na altura da camada limite são forçadas pelo ciclo diário de aquecimento e resfriamento da superfície e pela passagem de sistemas de mesoescala, enquanto variações espaciais ocorrem devido a mudanças no tipo de cobertura (que pode ser por exemplo uma floresta, uma pastagem, um lago, etc.) e na topografia do terreno (STULL, 1988).

A região mais externa da CLA é conhecida como Camada de Ekman (CE), e nela os fluxos turbulentos variam com a altura (em geral diminuem com o aumento da altura). Aumentando a altura, a influência da superfície (fricção) decresce em favor do efeito de Coriolis, e no limite superior da CE a direção do vento muda para a direção geostrófica. A dinâmica desta camada é dominada tanto pelos fluxos superficiais (de quantidade de movimento τ , de calor sensível H e de vapor d'água E) quanto pela convecção térmica. Já na camada mais interna da CLA, conhecida como Camada Superficial (CS), os fluxos turbulentos podem ser considerados constantes na vertical e os efeitos de Coriolis podem ser negligenciados em favor das forças de atrito. Sua dinâmica é controlada pelos fluxos superficiais τ , H e E (FEIGENWINTER, 1999; DOP, 2005).

A Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov (MONIN; OBUKHOV, 1954), que ao longo do texto será referenciada pela sigla TSMO, foi desenvolvida na extinta União Soviética para explicar a dinâmica da Camada Superficial, tornando-se conhecida no Ocidente durante os anos 50 e sendo adotada desde a década de 60 como um instrumento padrão de análise micrometeoro-

lógica (DIAS, 1996). Para separar processos de diferentes escalas, a decomposição de Reynolds é normalmente aplicada, onde uma determinada variável de interesse X é dividida em uma componente média $\bar{X}$ e em uma componente turbulenta, ou flutuação, denotada por x (GARRATT, 1992):

$$X = \bar{X} + x, \quad (2.3)$$

onde valem as propriedades

$$\bar{x} = 0, \quad (2.4)$$

$$\overline{XY} = \bar{X} \bar{Y} + \overline{xy},$$

$$\overline{X+Y} = \bar{X} + \bar{Y},$$

$$\overline{aX} = a\bar{X}.$$

No conjunto de equações acima Y é uma variável (como X) e a é uma constante qualquer. **Nota importante:** no decorrer deste trabalho, em se tratando de variáveis *turbulentas*, serão empregados símbolos gregos/romanos maiúsculos para representar os valores instantâneos e símbolos minúsculos correspondentes para representar as flutuações. As médias serão representadas pelos mesmos símbolos maiúsculos, com o sinal “—” sobrescrito.

Na TSMO, são definidas as escalas de velocidade u_* , de temperatura potencial θ_* , e de umidade q_* . As relações entre as escalas e os fluxos superficiais são dadas a seguir (STULL, 1988):

$$\tau = \rho u_*^2 = -\rho \overline{wu_h}, \quad (2.5)$$

$$H = \rho c_p u_* \theta_* = \rho c_p \overline{w\theta}, \quad (2.6)$$

$$E = \rho u_* q_* = \rho \overline{wq}, \quad (2.7)$$

onde ρ e c_p são respectivamente a densidade e o calor específico do ar, e $\overline{wu_h}$, $\overline{w\theta}$, e $\overline{wq}$ são as covariâncias entre a componente vertical da velocidade do vento W e a velocidade horizontal U_h , a temperatura potencial Θ e a umidade específica Q respectivamente, observadas próximo à superfície (normalmente a menos de 10 metros).

Pela definição da TSMO, qualquer parâmetro que descreve o escoamento turbulento na CS, adimensionalizado por sua escala oportuna, pode ser descrito como uma função universal de ζ , a variável de estabilidade de Monin-Obukhov:

$$\zeta = \frac{z}{L_O} = \frac{-\kappa g z \theta_{v*}}{\overline{\Theta_v} u_*^2}, \quad (2.8)$$

onde z é a altura acima da superfície, L_O é o comprimento de estabilidade de Obukhov, $\kappa \approx 0,4$ é a constante de von Kármán, g é a aceleração da gravidade, $\Theta_v = \Theta(1 + 0,61Q)$ é a temperatura potencial virtual e $\theta_{v*} = \overline{w\theta_v}/u_*$ é a sua respectiva escala.

A variável adimensional de Monin-Obukhov indica a magnitude relativa da produção de energia cinética turbulenta por empuxo (numerador) e por atrito (denominador). A atmosfera é instável quando $\zeta < 0$ (situação comum durante o dia), neutra quando $\zeta = 0$ e estável quando $\zeta > 0$ (situação dominante durante à noite e em casos de inversão térmica).

A partir de medições das flutuações de W , U_h , Θ e Q (e do cálculo das covariâncias $\overline{wu_h}$, $\overline{w\theta}$ e $\overline{wq}$), os fluxos τ , H e E podem ser obtidos pelas equações 2.5, 2.6 e 2.7 respectivamente. A esta metodologia dá-se o nome de Método das Covariâncias Turbulentas — MCT (BRUT-SAERT, 1982).

O MCT implica na medição em alta frequência (*i.e.*, da ordem de 10 Hz ou mais) de W e do escalar relativo ao fluxo que se deseja obter (ou de U_h no caso do fluxo de quantidade de movimento). Para as componentes de velocidade do vento, é comum a utilização de anemômetros sônicos tridimensionais; para a temperatura do ar, são empregados termopares de fio fino ou os mesmos anemômetros sônicos 3D; já para a umidade do ar costuma-se empregar higrômetros infravermelhos.

A vantagem de se conseguir medir diretamente os fluxos com o MCT tem o seu preço: o custo dos instrumentos sônicos e infravermelhos mencionados é elevado e ambos deixam de funcionar corretamente quando seus sensores estão molhados (chuva/orvalho). Além disso, o volume de dados é muito maior do que o gerado em medições meteorológicas convencionais, o que requer dispositivos especiais para coleta e armazenamento, além de técnicas estatísticas

relativamente sofisticadas para o seu processamento, que se expressam na dificuldade em se obter um fechamento observacional do balanço de energia superficial.

2.2 Correções de fluxos

A atenuação de fluxos medidos com o método das covariâncias turbulentas, devido à utilização de sensores não ideais, não é um problema novo em micrometeorologia, e na literatura estão disponíveis diversas metodologias que visam à restauração dos fluxos originais.

Antes da disseminação do uso de anemômetros sônicos, trabalhos envolvendo o MCT eram freqüentemente desenvolvidos utilizando anemômetros de hélice para a medição da velocidade vertical do vento (*e.g.* Blanford e Gay (1992) utilizaram um anemômetro de hélice em conjunto com um termopar de fio fino para a medição do fluxo de calor sensível H). Este tipo de anemômetro apresenta um atraso em sua resposta devido à inércia da hélice, e o seu uso no MCT implica na deterioração dos fluxos turbulentos medidos. Até aquele momento, a maioria das correções aplicadas nos fluxos eram relacionadas ao comportamento não ideal dos anemômetros (em 1972 já havia uma teoria para tal correção, desenvolvida por Hicks (1972)).

Com a relativa popularização do uso dos anemômetros sônicos, o alvo das correções passou a ser o sensor de escalar. Correções generalizadas para sensores lentos foram desenvolvidas por Moore (1986), baseadas na integração numérica dos espectros/co-espectros afetados pelo tempo de resposta limitado e de modelos analíticos para os mesmos (*e.g.* Kaimal et al. (1972) e Kaimal (1973)).

Para o cálculo do fluxo de calor sensível, a medição das flutuações de temperatura com o auxílio de um termopar de fio fino é uma prática comum e sem maiores problemas associados, o mesmo não ocorrendo para o fluxo de calor latente (escalar dado pela umidade do ar) e para o fluxo de determinados gases (escalar dado pela concentração do gás).

Nos últimos anos, devido à crescente pesquisa relacionada ao aquecimento global, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos na área de medição de fluxo de CO_2 com a utilização do

MCT (Soegaard et al. (2003), Yasuda et al. (2003) e Kato et al. (2004), dentre outros), visando uma melhor compreensão dos processos de emissão e fixação do carbono para diversos tipos de cobertura (uma revisão interessante dos métodos de medição de CO₂ pode ser encontrada em Massman e Lee (2002) e em Baldocchi (2003)). O fluxo é obtido através da covariância entre a velocidade vertical do vento e a concentração do gás, sendo esta última medida com analisadores infravermelhos. Boa parte dos analisadores de CO₂ que vêm sendo empregados em pesquisa são de caminho fechado, isto é, o equipamento succiona o ar ambiente para seu interior para a obtenção da concentração. Analisadores de caminho aberto existem (o ar ambiente é analisado ao passar livremente pelos sensores na parte externa do equipamento), porém apresentam custos muito elevados. Ainda em relação aos analisadores de caminho fechado, não é difícil perceber que o ar ambiente chega com um certo atraso no interior do equipamento, o que implica na atenuação do fluxo medido. Várias correções para os fluxos de CO₂ atenuados foram propostas, por exemplo: Leuning e Judd (1996), Moncrieff et al. (1997), Yasuda e Watanabe (2001) e Massman e Lee (2002).

Quanto ao fluxo de calor latente, começaram a serem utilizados sensores capacitivos e de bulbo úmido de resposta lenta para a medição das flutuações de umidade do ar, no lugar dos sensores infravermelhos, na tentativa de obtê-lo de uma forma mais econômica. Hicks e McMillen (1988) e Hogström et al. (1989) desenvolveram de forma independente um método de correção para fluxos atenuados, chamado de MCTPB — Método das Covariâncias Turbulentas Passa Banda, onde os co-espectros entre a velocidade vertical do vento e a umidade (ou algum outro escalar) atenuados nas altas frequências são corrigidos através de medições rápidas da temperatura do ar, utilizando a hipótese de similaridade entre os escalares. Dentre diversos trabalhos onde foram empregados o MCTPB, pode-se citar Horst et al. (1997), Watanabe et al. (2000) e Asanuma et al. (2005).

Todos os métodos de correção mencionados até este ponto operam no domínio da frequência, o que implica em transformadas de Fourier e em integrações numéricas. As correções são realizadas, portanto, *a posteriori*, o que pode não ser interessante do ponto de vista operacio-

nal. Seguindo outra vertente, Horst (1997) desenvolveu uma simples fórmula para a correção de fluxos de escalares no domínio do tempo, a partir da suposição de um modelo co-espectral de fácil integração analítica e de um modelo linear para o comportamento do sensor do escalar. Em Dias et al. (2002) um fator de correção no domínio do tempo também é apresentado, porém para um caso específico (fluxo LE medido por um anemômetro de hélice em conjunto com um sensor capacitivo de umidade relativa). A magnitude da correção proposta por Dias et al. é função da temperatura do ar, por acreditarem que a resposta do sensor capacitivo é dependente desta variável.

Na sequência desta seção o MCTPB e as metodologias de correção no domínio do tempo de Horst (1997) e de Dias et al. (2002) serão detalhados.

2.2.1 Método das Covariâncias Turbulentas Passa Banda

Conforme já foi mencionado, este método visa restaurar a componente de alta frequência do fluxo do escalar em questão, que não é detectada devido à resposta inadequada do sensor. Esta restauração é realizada com o auxílio de um escalar “perfeitamente” medido, usualmente a temperatura virtual de um anemômetro sônico (ASANUMA et al., 2005).

A única consideração desta técnica é a similaridade espectral entre os escalares. Partindo deste princípio, a contribuição para o fluxo turbulento, oriunda de variações de alta frequência, pode ser relacionada às componentes de baixa frequência pela relação

$$\frac{\overline{wf}|_{hp}}{\overline{w\theta}|_{hp}} = \frac{\overline{wf}|_{bp}}{\overline{w\theta}|_{bp}}. \quad (2.9)$$

$\overline{wf}$ e $\overline{w\theta}$ são as covariâncias entre a componente vertical da velocidade do vento W e um escalar F (e.g. densidade de vapor d’água, concentração de CO_2) e entre a componente vertical de velocidade e a temperatura do ar Θ , respectivamente. O índice hp (*high pass*) indica a componente de alta frequência, que somente um sensor de resposta rápida consegue detectar. O índice bp (*bandpass*) indica a componente de baixa frequência que um sensor resposta mais lenta consegue detectar.

A idéia é portanto estimar a componente de alta frequência do fluxo do escalar F , que não pode ser medida com um sensor de resposta lenta, através da relação

$$\overline{wf}|_{hp} = \overline{w\theta}|_{hp} \frac{\overline{wf}|_{bp}}{\overline{w\theta}|_{bp}}, \quad (2.10)$$

sendo W e Θ medidos por sensores de resposta rápida (anemômetro sônico e termopar de fio fino). Como foi mencionado acima, pode-se também utilizar a temperatura virtual Θ_v medida pelo anemômetro sônico.

O fluxo do escalar é então calculado pela relação

$$\overline{wf} = \overline{wf}|_{lp} + \overline{wf}|_{bp} + \overline{wf}|_{hp}, \quad (2.11)$$

onde lp (*lowpass*) indica a região de mais baixa frequência onde a similaridade espectral pode não ser efetiva na prática, uma vez que variações turbulentas em baixas frequências são inevitavelmente misturadas com variações temporais nas condições “de fundo”, onde a similaridade não pode ser esperada (WATANABE et al., 2000). Tal componente é detectada pelo sensor de resposta lenta, mas não é considerada no cálculo da razão entre o fluxo do escalar com o fluxo de calor sensível (equação 2.10).

A frequência limite entre as regiões de passa baixa e de passa banda é determinada pela resposta espectral do sensor do escalar, e depende de muitos fatores que podem caracterizar as variações temporais em escalas de tempo maiores, como efeitos de circulação local, atividade convectiva perto da superfície, morfologia da superfície, estabilidade atmosférica, altura de medição dentre outros (WATANABE et al., 2000).

A fronteira entre as regiões de passa banda e de passa alta é dada pela máxima frequência em que o sensor lento responde corretamente às variações da concentração do escalar no ambiente. O limite inferior da região de passa baixa é relacionado com o tamanho do período de amostragem, e o limite superior da região de passa alta é dado pela metade da frequência de medição (frequência de Nyquist).

Uma vez calculados os co-espectros entre W e F (utilizando um sensor escalar de resposta lenta), e entre W e Θ , os fluxos para cada região (passa baixa, passa banda e passa alta) são calculados integrando os mesmos, respeitando os limites de frequência mencionados anteriormente. Sendo n_1 o limite inferior da região de passa baixa, n_2 a fronteira entre as regiões de passa baixa e de passa banda, n_3 a fronteira entre as regiões de passa banda e passa alta, e n_4 o limite superior da região de passa alta, e $S_{w,x}(n)$ o co-espectro *one-sided* entre W e um escalar X (F ou Θ), os fluxos são dados por:

$$\overline{wx}|_{lp} = \int_{n_1}^{n_2} S_{w,x}(n) \, dn, \quad (2.12)$$

$$\overline{wx}|_{bp} = \int_{n_2}^{n_3} S_{w,x}(n) \, dn, \quad (2.13)$$

$$\overline{wx}|_{hp} = \int_{n_3}^{n_4} S_{w,x}(n) \, dn. \quad (2.14)$$

Para corrigir o fluxo $\overline{wf}$ obtido através de um sensor de escalar lento, uma vez conhecendo os fluxos $\overline{wf}|_{lp}$, $\overline{wf}|_{bp}$, $\overline{w\theta}|_{bp}$, $\overline{w\theta}|_{hp}$, basta portanto utilizar a equação 2.11, estimando $\overline{wf}|_{hp}$ pela equação 2.10.

Watanabe et al. (2000) reportaram que o MCTPB resultou em erros elevados em períodos em que o fluxo de calor sensível era pequeno e o fluxo de calor latente era elevado. Os autores afirmam que o método de correção é vantajoso para medições em florestas, onde turbilhões de grande escala (e por conseguinte componentes de mais baixa frequência) contribuem massivamente para os fluxos e o fluxo de calor sensível geralmente é elevado, ao contrário de superfícies com vegetação mais baixa ou superfícies aquáticas.

Em resumo, o MCTPB é um método de correção que atua no domínio da frequência. Vale a pena lembrar que se a função de resposta do sensor do escalar é conhecida (*i.e.* sua função de transferência $H_f(n)$), tal que $\overline{wf}_\beta = \int_0^{+\infty} H_f(n) S_{w,f}(n) \, dn$, onde $\overline{wf}_\beta$ é o fluxo atenuado), a correção pode ser feita diretamente aplicando a sua inversa ($1/H_f(n)$) no co-espectro (*one-sided*) medido ($S_{w,f}(n)_\beta$)

$$\overline{wf} = \int_0^{+\infty} \frac{S_{w,f}(n)_\beta}{H_f(n)} \, dn, \quad (2.15)$$

sem a necessidade da hipótese de similaridade de escalares.

2.2.2 Correções no domínio do tempo

Horst (1997) desenvolveu a sua metodologia de correção para um sensor de escalar de primeira ordem, ou seja, o comportamento da saída do sensor F_β (onde β indica uma componente atenuada) ao longo do tempo t é modelado por uma equação diferencial linear de primeira ordem:

$$\frac{dF_\beta}{dt} + \frac{F_\beta}{T} = \frac{F}{T}, \quad (2.16)$$

cujas função de transferência é dada por

$$H_f(n) = \frac{1}{1 + (2\pi nT)^2}. \quad (2.17)$$

Nas duas equações anteriores, T é o tempo de resposta do sensor.

Pela possibilidade de integração analítica e por ser semelhante ao co-espectro real, Horst supõe o seguinte modelo para o co-espectro *one-sided*:

$$S_{w,f}(n) = \frac{\overline{wf}}{\pi n} \left[\frac{n/n_m}{1 + (n/n_m)^2} \right], \quad (2.18)$$

onde n_m corresponde à frequência na qual o co-espectro atinge o seu valor máximo.

As relações obtidas para $H_f(n)$ e $S_{w,f}(n)$ são aplicadas na equação

$$\overline{wf}_\beta = \int_0^{+\infty} H_f(n) S_{w,f}(n) dn, \quad (2.19)$$

cujas integral pode ser resolvida analiticamente, resultando em

$$\frac{\overline{wf}_\beta}{\overline{wf}} = \frac{1}{1 + 2\pi n_m T}. \quad (2.20)$$

Comparando o co-espectro modelado com os observados para várias condições de estabilidade, Horst propõe empiricamente a sua função de correção final:

$$\frac{\overline{wf}_\beta}{\overline{wf}} = \frac{1}{1 + (2\pi n_m^* T^*)^\gamma}, \quad (2.21)$$

onde $n_m^* = n_m z / \overline{U}_h$ e $T^* = T \overline{U}_h / z$ ($\overline{U}_h$ é a velocidade horizontal média do vento e z é a altura de medição). Para uma atmosfera instável ou neutra ($\zeta \leq 0$) o autor recomenda $\gamma = 7/8$ e $n_m^* = 0,085$; já para uma atmosfera estável ($\zeta > 0$), $\gamma = 1$ e $n_m^* = 2,0 - 1,915 / (1 + 0,5\zeta)$. Segundo o autor, o uso desta fórmula para um escalar diferente da temperatura requer a suposição de similaridade co-espectral.

Em resumo, o método de Horst é atraente do ponto de vista prático, pois os fluxos podem ser corrigidos no domínio do tempo e de forma imediata, sem a necessidade de análise espectral. Dias et al. (2002) também desenvolveram um fator de correção para utilização no domínio do tempo, porém de forma específica para o fluxo de calor latente LE . Estes autores obtiveram o fluxo atenuado (LE_β) com um conjunto formado por um anemômetro de hélice e um sensor capacitivo de umidade relativa, enquanto que o fluxo de referência (LE) foi obtido com um anemômetro sônico somado a um higrômetro infravermelho. Dias et al. propuseram um fator de correção $K = LE / LE_\beta$ dependente da temperatura média do ar $\overline{\Theta}$, de modo a acompanhar a mudança de comportamento do sensor capacitivo em função de tal variável:

$$K(\overline{\Theta}) = 8,5279 - \ln(\overline{\Theta}). \quad (2.22)$$

É importante frisar que neste fator está embutida a correção das atenuações impostas tanto pelo anemômetro de hélice quanto pelo sensor capacitivo, que possuem tempos de resposta limitados.

3 Teoria para a correção do fluxo LE

Como já foi mencionado, o objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para correção do fluxo de calor latente atenuado — devido à utilização de um sensor capacitivo de umidade relativa com tempo de resposta limitado — no domínio do tempo. Pela seção 2.2.2, não é difícil perceber que as correções no domínio do tempo propostas por Horst (1997) e Dias et al. (2002) são de certa forma complementares: enquanto o primeiro trabalho propõe uma correção para um sensor de escalar genérico de primeira ordem (um sensor capacitivo pode ser modelado como tal), o último propõe uma correção específica para um sensor capacitivo em função da temperatura do ar, apesar de incluir também a correção devido ao emprego de um anemômetro de hélice. De um lado temos uma metodologia de correção com boa fundamentação teórica, mas que não traz explicitamente a dependência da temperatura do ar, variável de grande importância em se tratando da resposta de sensores capacitivos. De outro lado temos uma metodologia essencialmente empírica, mas que utiliza tal variável de forma explícita. A metodologia a ser desenvolvida na sequência deste capítulo pode ser vista a grosso modo como uma mescla entre as duas anteriores. Apesar da semelhança conceitual com o trabalho de Horst, o procedimento a ser utilizado irá por um caminho particular: serão utilizadas funções de autocovariância para a caracterização do sensor capacitivo, *i.e.*, para a determinação de seu tempo de resposta e da dependência de sua resposta em relação à temperatura do ar, e serão utilizadas funções de covariância cruzada para a obtenção do fator de correção propriamente dito.

3.1 Funções de autocovariância (ideal e atenuada) e caracterização do sensor capacitivo

Conforme já foi mencionado anteriormente, um sensor capacitivo (de umidade neste caso) pode ser modelado como um sensor de primeira ordem, ou seja, a sua resposta segue o comportamento

$$\frac{dR_\beta}{dt} + \frac{1}{T}R_\beta = \frac{1}{T}R_\alpha, \quad (3.1)$$

onde R_β é a densidade de vapor d'água medida por um sensor capacitivo, R_α é a densidade de vapor d'água real (que consegue ser satisfatoriamente medida por um higrômetro infravermelho) e T é o tempo de resposta do sensor capacitivo, usualmente considerado como uma função da temperatura média do ar $\bar{\Theta}$ (*e.g.* Miloshevich et al. (2004)).

A suposição de que $T = T(\bar{\Theta})$ está associada à atenuação de uma maior faixa de componentes de alta frequência do espectro de R_β quanto menor a temperatura (*i.e.* tempo de resposta maior quanto menor a temperatura). No decorrer deste estudo, porém, pôde-se confirmar um indício levantado em estudos anteriores realizados pelo Lemma (Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental — convênio UFPR/SIMEPAR/IAPAR) de que o efeito da temperatura estava relacionado à uma atenuação uniforme de todo o espectro de R_β (em todas as bandas de frequência), e que este efeito era somado a uma atenuação mais intensa das componentes de mais alta frequência, relacionada a um tempo de resposta fixo.

A figura 3.1 deixa essa idéia mais clara, trazendo dois espectros de densidade de vapor d'água obtidos através de um sensor infravermelho ideal e através de um sensor capacitivo durante um estudo realizado pelo Lemma no Lago de Furnas, em Minas Gerais. Primeiramente pode-se observar uma atenuação uniforme do espectro do sensor capacitivo até 0,3 Hz (verificou-se em outros espectros que esta atenuação é maior quanto menor a temperatura do ar); de 0,3 a 2 Hz pode-se notar uma atenuação mais acentuada devido ao tempo de resposta, e após 2 Hz fica evidente o ruído branco do sensor capacitivo.

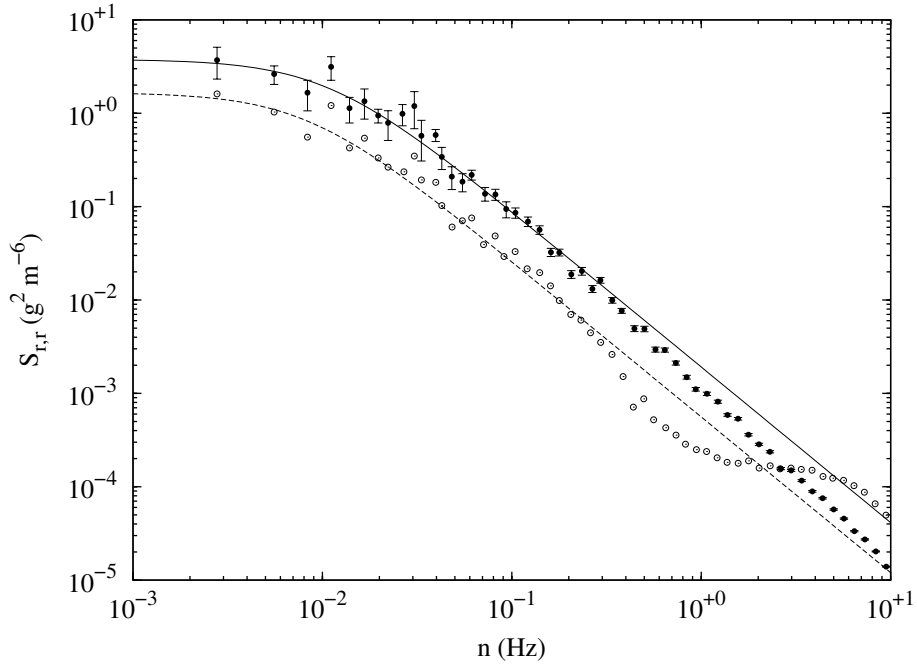


Figura 3.1: Espectros da densidade de vapor d'água registrada por um higrômetro infravermelho $S_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e da densidade registrada por um sensor capacitivo $S_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) durante experimento no Lago de Furnas em 11/06/2003 05:00-06:00h. Para um gráfico mais limpo foram plotadas somente as médias para faixas de frequência (pontos); para $S_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ ainda foram plotados os desvios-padrão. As curvas foram ajustadas utilizando o modelo $S_{r,r} = c_1 / (1 + c_2^{5/3})$, através dos parâmetros c_1 e c_2 .

A partir dessas constatações, decidiu-se alterar a equação 3.1 de forma a refletir o que foi observado experimentalmente:

$$\frac{dR_{\beta}}{dt} + \frac{1}{T}R_{\beta} = \frac{\Lambda(\bar{\Theta})}{T}R_{\alpha}, \quad (3.2)$$

onde o efeito da temperatura, dado por $\Lambda(\bar{\Theta})$, é desacoplado do tempo de resposta T . Esta equação servirá de base para toda a metodologia a ser desenvolvida.

Na sequência será mostrado o procedimento passo a passo para a obtenção das funções de autocovariância, que servirão para a determinação dos parâmetros T e Λ para um sensor capacitivo de umidade.

Calculando a transformada de Fourier em ambos os lados da equação 3.2, obtém-se

$$\begin{aligned} 2\pi in\widehat{R}_\beta + \frac{1}{T}\widehat{R}_\beta &= \frac{\Lambda(\overline{\Theta})}{T}\widehat{R}_\alpha \\ \therefore \frac{2\pi inT + 1}{T}\widehat{R}_\beta &= \frac{\Lambda(\overline{\Theta})}{T}\widehat{R}_\alpha, \end{aligned} \quad (3.3)$$

onde n é a frequência cíclica, $i = \sqrt{-1}$ e o símbolo “ $\widehat{}$ ” indica a transformada de Fourier.

Multiplicando ambos os lados por seus respectivos conjugados complexos, tirando o valor esperado e dividindo pela função de distribuição δ de Dirac ($\delta(0)$), chega-se em

$$\begin{aligned} \frac{1 - 2\pi inT}{T} \frac{1 + 2\pi inT}{T} \frac{1}{\delta(0)} \langle \widehat{R}_\beta^* \widehat{R}_\beta \rangle &= \frac{\Lambda^2(\overline{\Theta})}{\delta(0)} \frac{\langle \widehat{R}_\alpha^* \widehat{R}_\alpha \rangle}{T^2} \\ \therefore \frac{1}{\delta(0)} \langle \widehat{R}_\beta^* \widehat{R}_\beta \rangle &= \frac{1}{1 + (2\pi nT)^2} \frac{\Lambda^2(\overline{\Theta})}{\delta(0)} \langle \widehat{R}_\alpha^* \widehat{R}_\alpha \rangle, \end{aligned} \quad (3.4)$$

onde “ $\langle \rangle$ ” denota o valor esperado e $\widehat{R}_\alpha^*$ e $\widehat{R}_\beta^*$ são os conjugados complexos de R_α e R_β respectivamente.

Uma vez que o espectro de R é dado por (LESIEUR, 1993)

$$S_{r,r}(n) = \frac{1}{\delta(0)} \langle \widehat{R}^*(n) \widehat{R}(n) \rangle, \quad (3.5)$$

pode-se concluir a partir do resultado anterior que

$$S_{r_\beta, r_\beta}(n) = \frac{\Lambda^2(\Theta)}{1 + (2\pi nT)^2} S_{r_\alpha, r_\alpha}(n), \quad (3.6)$$

ou ainda

$$S_{r_\beta, r_\beta}(n) = \Lambda^2(\Theta) \widehat{G}(n) S_{r_\alpha, r_\alpha}(n), \quad (3.7)$$

onde $\widehat{G}(n) = 1/(1 + (2\pi nT)^2)$. Eis a relação entre os espectros ideal e atenuado; o objetivo agora é obter as funções de autocovariância, que nada mais são do que as transformadas inversas de Fourier dos espectros.

Pelo Teorema da Convolução, sabe-se que

$$\mathfrak{F}^{-1} \left\{ \widehat{X}(n) \widehat{Y}(n) \right\} = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\tau) Y(t - \tau) d\tau, \quad (3.8)$$

onde $\mathfrak{F}^{-1}$ denota a transformada inversa de Fourier.

Calculando a transformada inversa de Fourier de ambos os lados da equação 3.7, utilizando o Teorema da Convolução, chega-se em

$$\begin{aligned}\mathfrak{F}^{-1}\{S_{r_\beta, r_\beta}\} &= \mathfrak{F}^{-1}\{\Lambda^2(\overline{\Theta})\widehat{G}(n)S_{r_\alpha, r_\alpha}(n)\} \\ \therefore C_{r_\beta, r_\beta}(t) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \Lambda^2(\overline{\Theta})G(t-\tau)C_{r_\alpha, r_\alpha}(\tau)d\tau.\end{aligned}\quad (3.9)$$

A transformada inversa de Fourier da função $\widehat{G}(n)$ pode ser calculada facilmente:

$$\begin{aligned}\mathfrak{F}^{-1}\{\widehat{G}(n)\} &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{1+(2\pi nT)^2} e^{2\pi i n t} dn \\ \therefore G(t) &= \frac{1}{2T} e^{-|t|/T}.\end{aligned}\quad (3.10)$$

Reescrevendo a equação 3.9 com o resultado anterior, chega-se finalmente na relação entre as funções de autocovariância ideal e atenuada:

$$C_{r_\beta, r_\beta}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Lambda^2(\overline{\Theta})}{2T} e^{-|t-\tau|/T} C_{r_\alpha, r_\alpha}(\tau) d\tau. \quad (3.11)$$

Para o cálculo da integral acima, decidiu-se modelar a função de autocovariância ideal C_{r_α, r_α} a partir do espectro clássico proposto por Kaimal et al. (1972) e Kaimal (1973), amplamente utilizado pela comunidade científica:

$$S_{r_\alpha, r_\alpha}(n) = \frac{2\overline{r_\alpha r_\alpha} \mathcal{T}_{rr}}{1 + (2\pi \alpha_{rr} |n| \mathcal{T}_{rr})^{\frac{5}{3}}}, \quad (3.12)$$

onde $\mathcal{T}_{rr}$ é a escala integral associada ao espectro e $\alpha_{rr} = (12/5)\sqrt{2/(5+\sqrt{5})} = 1,261755$ é uma constante para garantir que a integral do espectro S_{r_α, r_α} de $n = -\infty$ a $n = +\infty$ seja igual à variância $\overline{r_\alpha r_\alpha}$.

Com o espectro de Kaimal, a função de autocovariância ideal é dada por

$$\begin{aligned}
 C_{r_\alpha, r_\alpha}(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} S_{r_\alpha, r_\alpha} e^{2\pi i n \tau} dn \\
 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\bar{r}_\alpha r_\alpha \mathcal{T}_{rr}}{1 + (2\pi \alpha_{rr} |n| \mathcal{T}_{rr})^{\frac{5}{3}}} \cos(2\pi n \tau) dn \\
 &= \int_0^{+\infty} \frac{4\bar{r}_\alpha r_\alpha \mathcal{T}_{rr} \cos(2\pi n \tau)}{1 + (2\pi \alpha_{rr} n \mathcal{T}_{rr})^{\frac{5}{3}}} dn \\
 &= \int_0^{+\infty} \frac{4\bar{r}_\alpha r_\alpha \mathcal{T}_{rr} \cos(2\pi n \mathcal{T}_{rr} \frac{\tau}{\mathcal{T}_{rr}})}{1 + (2\pi \alpha_{rr} n \mathcal{T}_{rr})^{\frac{5}{3}}} dn.
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

Fazendo a mudança de variável $x = 2\pi n \mathcal{T}_{rr}$, chega-se em

$$\begin{aligned}
 C_{r_\alpha, r_\alpha}(\tau) &= \int_0^{+\infty} \frac{4\bar{r}_\alpha r_\alpha \mathcal{T}_{rr} \cos(x \frac{\tau}{\mathcal{T}_{rr}})}{1 + (\alpha_{rr} x)^{\frac{5}{3}}} \frac{dx}{2\pi \mathcal{T}_{rr}} \\
 &= \frac{2\bar{r}_\alpha r_\alpha}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\cos(x \frac{\tau}{\mathcal{T}_{rr}})}{1 + (\alpha_{rr} x)^{\frac{5}{3}}} dx.
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Fazendo $\xi = \tau / \mathcal{T}_{rr}$, ainda pode-se escrever

$$C_{r_\alpha, r_\alpha}(\xi) = \frac{2\bar{r}_\alpha r_\alpha}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\cos(x \xi)}{1 + (\alpha_{rr} x)^{\frac{5}{3}}} dx. \tag{3.15}$$

Voltando agora para o cálculo de C_{r_β, r_β} (eq. 3.11), algumas modificações podem ser feitas a fim de utilizar o resultado anterior:

$$\begin{aligned}
 C_{r_\beta, r_\beta}(t) &= \frac{\Lambda^2(\bar{\Theta})}{2T} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{|t-\tau|}{T}} C_{r_\alpha, r_\alpha}(\tau) d\tau \\
 &= \frac{\Lambda^2(\bar{\Theta})}{2T} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\mathcal{T}_{rr}}{T} \frac{|t-\tau|}{\mathcal{T}_{rr}}} C_{r_\alpha, r_\alpha}(\tau) d\tau \\
 &= \frac{\Lambda^2(\bar{\Theta})}{2T} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\mathcal{T}_{rr}}{T} |\frac{t}{\mathcal{T}_{rr}} - \frac{\tau}{\mathcal{T}_{rr}}|} C_{r_\alpha, r_\alpha}(\tau) d\tau.
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Fazendo a mudança de variável $\xi = \tau / \mathcal{T}_{rr}$ pode-se obter

$$C_{r_\beta, r_\beta}(t) = \frac{\Lambda^2(\bar{\Theta}) \mathcal{T}_{rr}}{2T} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\mathcal{T}_{rr}}{T} |\frac{t}{\mathcal{T}_{rr}} - \xi|} C_{r_\alpha, r_\alpha}(\xi) d\xi, \tag{3.17}$$

que ainda pode ser escrita como

$$C_{r_\beta, r_\beta}(\eta) = \frac{\Lambda^2(\bar{\Theta}) \mathcal{T}_{rr}}{2T} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\mathcal{T}_{rr}}{T} |\eta - \xi|} C_{r_\alpha, r_\alpha}(\xi) d\xi, \tag{3.18}$$

com a mudança de variável $\eta = t/\mathcal{T}_{rr}$.

As equações 3.15 e 3.18 são a base para a obtenção dos parâmetros T e Λ do sensor capacitivo de umidade. A partir da função de autocovariância C_{r_α, r_α} amostral (*i.e.*, obtida através dos dados de R medidos com um equipamento de resposta rápida, como um higrômetro infravermelho) pode-se ajustar a escala integral $\mathcal{T}_{rr}$ com a equação 3.15. Com a função de autocovariância C_{r_β, r_β} amostral e com o $\mathcal{T}_{rr}$ ajustado no passo anterior, os parâmetros T e Λ podem ser ajustados através da equação 3.18 (que também utiliza a equação 3.15).

3.2 Funções de covariância cruzada (ideal e atenuada) e dedução do fator de correção

O caminho para a caracterização do sensor capacitivo já está traçado, agora resta a dedução do fator de correção. Partindo da equação 3.3

$$(2\pi inT + 1)\widehat{R}_\beta = \Lambda(\overline{\Theta})\widehat{R}_\alpha, \quad (3.19)$$

pré-multiplicando a mesma pelo conjugado complexo de $\widehat{W}$, dividindo pela função de distribuição δ de Dirac e tirando o valor esperado, chega-se em

$$(2\pi inT + 1) \frac{\langle \widehat{W}^* \widehat{R}_\beta \rangle}{\delta(0)} = \frac{\Lambda(\overline{\Theta}) \langle \widehat{W}^* \widehat{R}_\alpha \rangle}{\delta(0)}. \quad (3.20)$$

Dado que o espectro cruzado de W com R é (LESIEUR, 1993)

$$[S_{w,r} + iQ_{w,r}](n) = \frac{1}{\delta(0)} \langle \widehat{W}^*(n) \widehat{R}(n) \rangle, \quad (3.21)$$

onde $S_{w,r}$ é o co-espectro e $Q_{w,r}$ é o espectro de quadratura, a equação 3.20 pode ser re-escrita da seguinte forma:

$$(2\pi inT + 1)[S_{w,r_\beta} + iQ_{w,r_\beta}] = \Lambda(\overline{\Theta})[S_{w,r_\alpha} + iQ_{w,r_\alpha}]. \quad (3.22)$$

Supondo que $Q_{w,r\alpha} = 0$ (uma justificativa será mencionada na sequência), podemos re-escrever a equação como

$$\begin{aligned}
 (2\pi inT + 1)[S_{w,r\beta} + iQ_{w,r\beta}] &= \Lambda(\bar{\Theta})S_{w,r\alpha} \\
 \therefore [S_{w,r\beta} + iQ_{w,r\beta}] &= \frac{\Lambda(\bar{\Theta})}{1 + 2\pi inT} S_{w,r\alpha} \\
 &= \frac{\Lambda(\bar{\Theta})(1 - 2\pi inT)}{(1 + 2\pi inT)(1 - 2\pi inT)} S_{w,r\alpha} \\
 &= \frac{\Lambda(\bar{\Theta})(1 - 2\pi inT)}{1 + (2\pi nT)^2} S_{w,r\alpha}.
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

A função de covariância cruzada atenuada pode ser obtida aplicando-se a transformada inversa de Fourier na equação anterior:

$$C_{w,r\beta}(t) = \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \frac{\Lambda(\bar{\Theta})}{1 + (2\pi nT)^2} S_{w,r\alpha} \right\} - \mathfrak{F}^{-1} \left\{ \frac{2\pi inT \Lambda(\bar{\Theta})}{1 + (2\pi nT)^2} S_{w,r\alpha} \right\}. \tag{3.24}$$

Desenvolvendo o lado direito da equação anterior (note que o resultado da primeira transformada é totalmente análogo ao obtido para a função de autocovariância — equação 3.11), obtém-se

$$C_{w,r\beta}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Lambda(\bar{\Theta})}{2T} e^{-\frac{|t-\tau|}{T}} C_{w,r\alpha}(\tau) d\tau - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\pi inT \Lambda(\bar{\Theta})}{1 + (2\pi nT)^2} S_{w,r\alpha} e^{2\pi inT} dn. \tag{3.25}$$

O ponto de partida para a obtenção do fator de correção é analisar a função $C_{w,r\beta}$ no ponto $t = 0$, cujo valor corresponde ao fluxo $\overline{wr\beta}$:

$$C_{w,r\beta}(0) = \overline{wr\beta} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\Lambda(\bar{\Theta})}{2T} e^{-\frac{|\tau|}{T}} C_{w,r\alpha}(\tau) d\tau - \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\pi inT \Lambda(\bar{\Theta})}{1 + (2\pi nT)^2} S_{w,r\alpha} dn. \tag{3.26}$$

Voltando à questão do espectro de quadratura, a suposição de que $Q_{w,r\alpha} = 0$ é equivalente à suposição de que $S_{w,r\alpha}$ e conseqüentemente $C_{w,r\alpha}$ são funções pares. Este fato foi comprovado através dos dados utilizado neste trabalho (funções $C_{w,r\alpha}$ amostrais) na maioria dos casos (veja um destes casos na figura 3.2). Apesar desta paridade não ter sido encontrada em algumas situações (veja um exemplo na figura 3.3), a suposição de que $Q_{w,r\alpha} = 0$ fornece uma base suficiente para a obtenção do fator de correção.

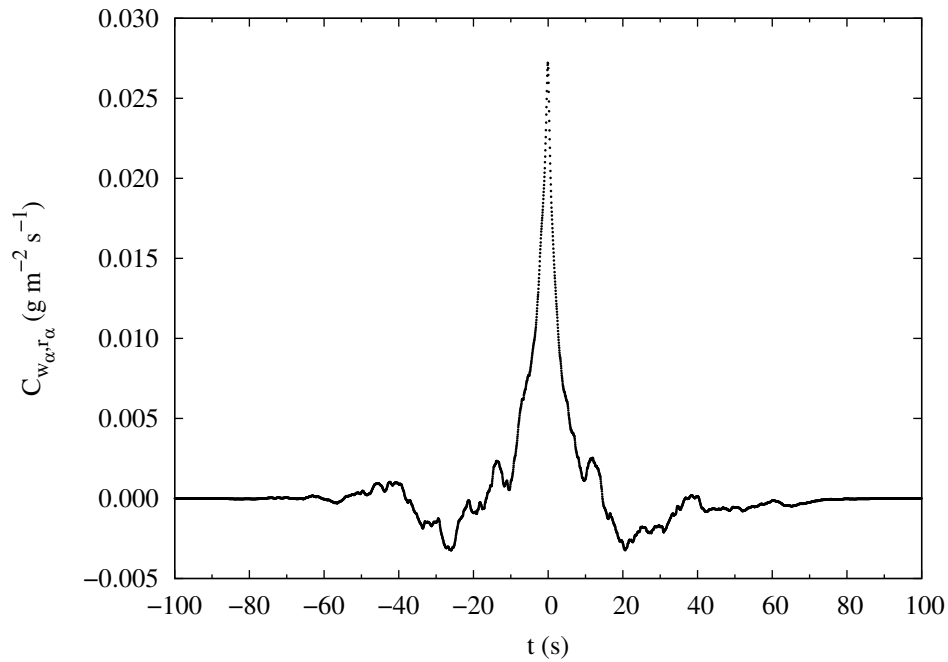


Figura 3.2: Função de covariância cruzada $C_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral, obtida através de medições com instrumentos de resposta rápida (anemômetro sônico para a velocidade vertical do vento e higrômetro infravermelho para a densidade de vapor d'água) durante experimento no Lago de Furnas, 24/07/2005 04:00-04:30h.: note que a mesma é par (de forma geral), evidenciando que $Q_{w, r_{\alpha}}$ é muito próximo de zero.

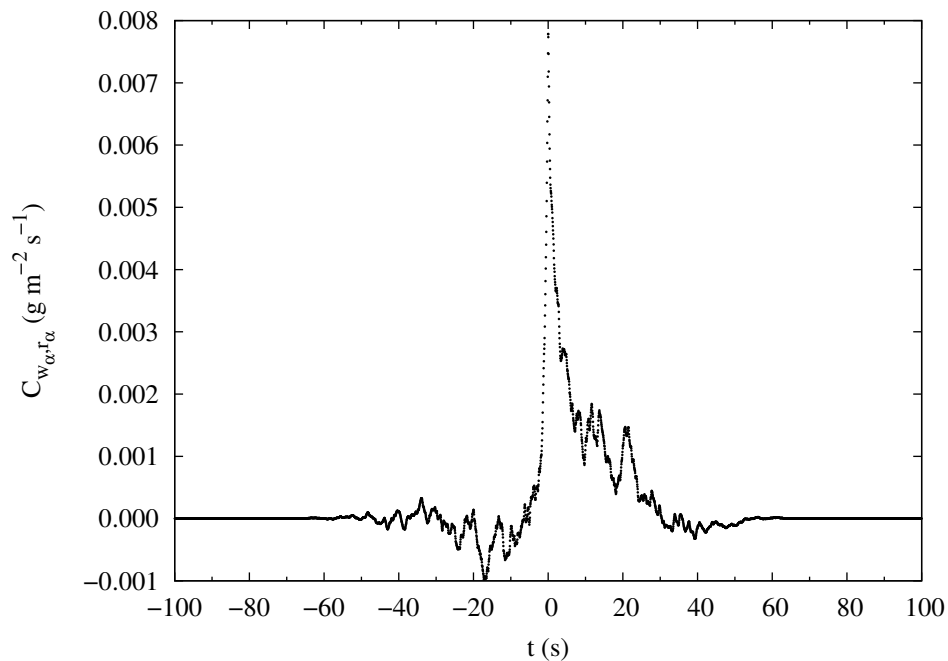


Figura 3.3: Função de covariância cruzada $C_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral, obtida através de medições com instrumentos de resposta rápida (anemômetro sônico para a velocidade vertical do vento e higrômetro infravermelho para a densidade de vapor d'água) durante experimento no Lago de Furnas, 24/07/2005 16:30-17:00h.: neste caso, o espectro de quadratura $Q_{w, r_{\alpha}}$ é claramente diferente de zero, uma vez que não há paridade na função amostral $C_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$.

Sendo par o co-espectro $S_{w,r\alpha}$, o segundo integrando da equação anterior é uma função ímpar, o que resulta em

$$C_{w,r\beta}(0) = \overline{wr\beta} = \int_0^{+\infty} \frac{\Lambda(\overline{\Theta})}{T} e^{-\frac{\tau}{T}} C_{w,r\alpha}(\tau) d\tau. \quad (3.27)$$

Para o cálculo da integral em 3.27, decidiu-se modelar a função de covariância cruzada ideal $C_{w,r\alpha}$ a partir do co-espectro proposto por Kaimal et al. (1972) e Kaimal (1973):

$$S_{w,r\alpha}(n) = \frac{2\overline{wr\alpha} \mathcal{T}_{wr}}{1 + (2\pi\alpha_{wr}|n|\mathcal{T}_{wr})^{7/3}}, \quad (3.28)$$

onde $\mathcal{T}_{wr}$ é a escala integral associada ao co-espectro e α_{wr} , de forma análoga ao α_{rr} utilizado para o espectro $S_{r\alpha,r\alpha}$, é uma constante utilizada para garantir que a integral do co-espectro $S_{w,r\alpha}$ de $n = -\infty$ a $n = +\infty$ resulte na covariância $\overline{wr\alpha}$. O valor de α_{wr} é igual a $6/(7 \sin(4\pi/7)) = 0,879186$.

Mesmo não sendo possível a integração analítica deste modelo de co-espectro, ao contrário do modelo simplificado proposto por Horst (1997), a escolha foi feita por se acreditar que tal modelo é mais fiel aos co-espectros observados. Em outras palavras, o expoente $7/3$ no modelo co-espectral é muito mais aceito na comunidade científica internacional do que o expoente 2 utilizado por Horst (veja a equação 2.18) para facilitar sua integração analítica.

Com o co-espectro de Kaimal, basta aplicar a transformada inversa de Fourier para a obtenção da função de covariância cruzada $C_{w,r\alpha}$:

$$\begin{aligned} C_{w,r\alpha}(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} S_{w,r\alpha} e^{2\pi i n \tau} dn \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\overline{wr\alpha} \mathcal{T}_{wr}}{1 + (2\pi\alpha_{wr}|n|\mathcal{T}_{wr})^{7/3}} e^{2\pi i n \tau} dn \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\overline{wr\alpha} \mathcal{T}_{wr}}{1 + (2\pi\alpha_{wr}|n|\mathcal{T}_{wr})^{7/3}} (\cos(2\pi n \tau) + i \sin(2\pi n \tau)) dn \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2\overline{wr\alpha} \mathcal{T}_{wr}}{1 + (2\pi\alpha_{wr}|n|\mathcal{T}_{wr})^{7/3}} \cos(2\pi n \tau) dn \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{4\overline{wr\alpha} \mathcal{T}_{wr}}{1 + (2\pi\alpha_{wr}n\mathcal{T}_{wr})^{7/3}} \cos(2\pi n \tau) dn. \end{aligned} \quad (3.29)$$

O resultado anterior pode ser escrito de outra forma:

$$C_{w,r\alpha}(\tau) = \int_0^{+\infty} \frac{4\overline{wr\alpha} \mathcal{T}_{wr}}{1 + (2\pi\alpha_{wr} \frac{nz}{\overline{U}_h} \frac{\mathcal{T}_{wr}\overline{U}_h}{z})^{7/3}} \cos\left(2\pi \frac{nz}{\overline{U}_h} \frac{\tau\overline{U}_h}{z}\right) dn, \quad (3.30)$$

onde $\overline{U}_h$ é a velocidade média horizontal do vento e z é a altura de medição.

Mudando a variável de integração para $n^* = nz/\overline{U}_h$, e fazendo $\mathcal{T}_{wr}^* = \mathcal{T}_{wr}\overline{U}_h/z$ e $\tau^* = \tau\overline{U}_h/z$ (o símbolo “*” indica uma variável adimensionalizada), obtém-se

$$\begin{aligned} C_{w,r\alpha}(\tau^*) &= \int_0^{+\infty} \frac{4\overline{wr\alpha} \mathcal{T}_{wr}}{1 + (2\pi\alpha_{wr} n^* \mathcal{T}_{wr}^*)^{7/3}} \cos(2\pi n^* \tau^*) \left(\frac{\overline{U}_h}{z} dn^*\right) \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{4\overline{wr\alpha} \mathcal{T}_{wr}^*}{1 + (2\pi\alpha_{wr} n^* \mathcal{T}_{wr}^*)^{7/3}} \cos(2\pi n^* \tau^*) dn^* \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{4\overline{wr\alpha} \mathcal{T}_{wr}^*}{1 + (2\pi\alpha_{wr} n^* \mathcal{T}_{wr}^*)^{7/3}} \cos\left(2\pi n^* \mathcal{T}_{wr}^* \frac{\tau^*}{\mathcal{T}_{wr}^*}\right) dn^*. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Fazendo mais uma mudança de variável ($x = 2\pi n^* \mathcal{T}_{wr}^*$), chega-se em

$$\begin{aligned} C_{w,r\alpha}(\tau^*) &= \int_0^{+\infty} \frac{4\overline{wr\alpha} \mathcal{T}_{wr}^*}{1 + (\alpha_{wr} x)^{7/3}} \cos\left(x \frac{\tau^*}{\mathcal{T}_{wr}^*}\right) \left(\frac{1}{2\pi \mathcal{T}_{wr}^*} dx\right) \\ &= \frac{2\overline{wr\alpha}}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\cos(x\tau^*/\mathcal{T}_{wr}^*)}{1 + (\alpha_{wr} x)^{7/3}} dx. \end{aligned} \quad (3.32)$$

Neste ponto, todas as relações para a obtenção do fator de correção estão determinadas, só restando algumas manipulações algébricas. Voltando à equação 3.27, pode-se escrever

$$\overline{wr\beta} = \int_0^{+\infty} \frac{\Lambda(\overline{\Theta})}{T} e^{-\frac{\tau\overline{U}_h/z}{T\overline{U}_h/z}} C_{w,r\alpha}(\tau) d\tau. \quad (3.33)$$

Mudando a variável de integração para $\tau^* = \tau\overline{U}_h/z$, a fim de utilizar o resultado obtido anteriormente para $C_{w,r\alpha}$, e fazendo $T^* = T\overline{U}_h/z$, chega-se em

$$\begin{aligned} \overline{wr\beta} &= \int_0^{+\infty} \frac{\Lambda(\overline{\Theta})}{T} e^{-\frac{\tau^*}{T^*}} C_{w,r\alpha}(\tau^*) \left(\frac{z}{\overline{U}_h} d\tau^*\right) \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{\Lambda(\overline{\Theta})}{T^*} e^{-\frac{\tau^*}{T^*}} C_{w,r\alpha}(\tau^*) d\tau^* \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{\Lambda(\overline{\Theta})}{T^*} e^{-\frac{\tau^*}{T^*}} \left[\frac{2\overline{wr\alpha}}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\cos(x\tau^*/\mathcal{T}_{wr}^*)}{1 + (\alpha_{wr} x)^{7/3}} dx \right] d\tau^*. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Uma última manipulação resulta finalmente no fator de correção K :

$$K^{-1} = \frac{\overline{wr\beta}}{\overline{wr\alpha}} = \frac{2\Lambda(\overline{\Theta})}{T^*\pi} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{\tau^*}{T^*}} \frac{\cos(x\tau^*/\mathcal{T}_{wr}^*)}{1 + (\alpha_{wr}x)^{7/3}} dx d\tau^*, \quad (3.35)$$

onde a integral dupla pode ser resolvida com o auxílio de um programa de processamento simbólico:

$$\begin{aligned} K^{-1} = & 0,316973 \frac{\Lambda(\overline{\Theta}) \alpha_{wr}^{13} \mathcal{T}_{wr}^{*14}}{\alpha_{wr}^{14} \mathcal{T}_{wr}^{*14} + T^{*14}} \left[2,77369 - 3,64289 T^{*4/3} \alpha_{wr}^{-4/3} \mathcal{T}_{wr}^{*-4/3} \right. \\ & + 3,45873 T^{*2} \alpha_{wr}^{-2} \mathcal{T}_{wr}^{*-2} - 6,30968 T^{*11/3} \alpha_{wr}^{-11/3} \mathcal{T}_{wr}^{*-11/3} \\ & + 6,23242 T^{*4} \alpha_{wr}^{-4} \mathcal{T}_{wr}^{*-4} - 6,23242 T^{*8} \alpha_{wr}^{-8} \mathcal{T}_{wr}^{*-8} \\ & + 6,30968 T^{*25/3} \alpha_{wr}^{-25/3} \mathcal{T}_{wr}^{*-25/3} - 3,45873 T^{*10} \alpha_{wr}^{-10} \mathcal{T}_{wr}^{*-10} \\ & + 3,64289 T^{*32/3} \alpha_{wr}^{-32/3} \mathcal{T}_{wr}^{*-32/3} - 2,77369 T^{*12} \alpha_{wr}^{-12} \mathcal{T}_{wr}^{*-12} \\ & + 3,15484 T^{*13} \alpha_{wr}^{-13} \mathcal{T}_{wr}^{*-13} - 0,143459 T^{*6} \alpha_{wr}^{-6} \mathcal{T}_{wr}^{*-6} \left(7,10543 \times 10^{-15} \right. \\ & \left. \left. + 14 \ln(T^{*-1}) - \ln(\alpha_{wr}^{-14} \mathcal{T}_{wr}^{*-14}) \right) \right]. \quad (3.36) \end{aligned}$$

O fator de correção proposto depende, portanto, da temperatura média do ar (parâmetro $\Lambda(\overline{\Theta})$), do tempo de resposta do sensor capacitivo, da velocidade média horizontal do vento, da altura de medição (estes três representados pelo termo T^*) e da escala integral adimensional relacionada ao co-espectro. Conforme mencionado na seção anterior, T e Λ podem ser determinados a partir das funções de autocovariância C_{r_α, r_α} e C_{r_β, r_β} amostrais. De forma semelhante, a função de covariância cruzada C_{w, r_α} amostral pode ser empregada para a obtenção da escala integral $\mathcal{T}_{wr}$ (ou $\mathcal{T}_{wr}^*$).

O parâmetro $\mathcal{T}_{wr}^*$, no caso da Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov ser válida para as condições locais, é função de ζ . Segundo Moore (1986), o modelo co-espectral (3.28) com a suposição de similaridade $\mathcal{T}_{wr}^*(\zeta)$, possui melhor desempenho para condições estáveis. Apesar da maioria dos dados disponíveis para este trabalho serem associados a condições instáveis, como será visto no próximo capítulo, o modelo (3.28) foi mantido por ainda prover bons ajustes de forma geral e por acreditar-se que seja suficiente para modelar os efeitos de T e Λ em (3.34).

4 Aplicação do método de correção desenvolvido

4.1 Sítios experimentais e conjunto de dados

Neste trabalho foram utilizados dados obtidos em três experimentos de campo, chamados de Exfu-2, Exfu-3b e Exfu-4, que fizeram parte de um estudo encomendado por Furnas Centrais Elétricas ao Lemma (Laboratório de Estudos em Monitoramento e Modelagem Ambiental — convênio UFPR/IAPAR/SIMEPAR) relacionado à evaporação do Lago de Furnas. Na sequência desta seção serão detalhados cada um dos três experimentos.

O Experimento Intensivo de Campo #2 de Furnas — Exfu-2 — foi realizado entre os dias 13 e 23 de janeiro de 2004 no sítio experimental da Embrapa na cidade de Ponta Grossa, Paraná (latitude $25^{\circ}08'S$, longitude $50^{\circ}04'O$, altitude 890 m). Durante este período a estação micro-meteorológica estava envolta por uma plantação de soja de um mês de idade (aproximadamente 0,20 m de altura) nos quadrantes Oeste, Norte e Leste, e por milho (aproximadamente 1,80 m de altura) no quadrante Sul (para maiores informações sobre o sítio experimental, veja Chamecki e Dias (2004)). Foram utilizados dois anemômetros sônicos tridimensionais (um modelo CSAT-3 da Campbell Sci. e um modelo 81000 da Young) para medição da temperatura virtual e das componentes horizontal e vertical da velocidade do vento, um higrômetro infravermelho de criptônio modelo Campbell Sci. KH20 para a medição precisa da densidade de vapor d'água, uma sonda de temperatura e umidade relativa (resposta lenta) modelo Campbell Sci. CS500 *sem* a sua capa protetora (verifique no apêndice A informações detalhadas do equipamento e de seu abrigo desenvolvido pelo Lemma), e dois termopares modelo Campbell Sci. FWTC3



Figura 4.1: Estação micrometeorológica de Ponta Grossa, palco do Exfu-2.

para a medição da temperatura do ar junto aos anemômetros sônicos. Um *datalogger* Campbell Sci. CR23X foi utilizado para a coleta dos dados à frequência de 20 Hz, sendo transferidos e armazenados no cartão de memória de um PDA modelo Palm m125 no formato binário da Campbell. Todos os sensores foram instalados a uma altura de 6 metros. A figura 4.1 traz uma foto da estação micrometeorológica utilizada, e a figura 4.2 traz uma foto detalhando os equipamentos utilizados no experimento.

O Experimento Intensivo de Campo #3 de Furnas — Exfu-3 — foi realizado em julho de 2004 na estação de monitoramento localizada no interior da represa de Furnas, no município de Guapé, Minas Gerais (latitude $20^{\circ}44'S$, longitude $45^{\circ}58'O$, altitude de medição 776 m). A estação está localizada em uma região com grande pista de vento (aproximadamente 5 km) na direção do vento dominante (Leste), e o ponto de terra mais próximo está a aproximadamente 400 metros na direção NE. A figura 4.3 traz uma foto da estação de monitoramento.

Após o experimento intensivo Exfu-3, a estação foi mantida com seu conjunto básico de instrumentos para o monitoramento de fluxos: um anemômetro sônico Young 81000, uma sonda CS500 (desencapada) e dois termopares (um deles junto ao Young e outro acoplado ao abrigo de



Figura 4.2: Configuração dos instrumentos utilizados no Exfu-2, na estação micrometeorológica de Ponta Grossa: anemômetro Young 81000 e sonda Campbell Sci. CS500 no abrigo de PVC (primeiro plano); anemômetro Campbell Sci. CSAT-3 e higrômetro infravermelho Campbell Sci. KH20 (segundo plano).

PVC da sonda), acrescentado por um analisador infravermelho de $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ (caminho aberto) Campbell Sci. Licor-7500 (veja a configuração dos equipamentos na figura 4.4). Esta configuração foi mantida por aproximadamente 2 meses — do dia 22 de julho até o dia 14 de setembro de 2004 —, sendo somente as médias e outros dados estatísticos de 30 minutos armazenados no módulo de memória de um *datalogger* Campbell Sci. CR23X (este conjunto de dados será referido ao longo do texto como **Exfu-3b**). Devido à variação do nível d'água do lago, a altura de medição dos sensores variou entre 4 e 5 metros durante o período mencionado.

O Experimento Intensivo de Campo #4 de Furnas — Exfu-4 — foi realizado no período de 19 a 28 de julho de 2005 na estação micrometeorológica no interior da represa de Furnas, assim como no experimento Exfu-3. Foram utilizados os mesmos equipamentos do experimento Exfu-2 (anemômetros CSAT-3 e Young 81000, higrômetro KH20, sonda CS500, termopares e *datalogger* CR23X) além de um analisador de $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ Licor-7500, um segundo equipamento de alta confiabilidade para medições da densidade de vapor d'água. A altura de medição dos sensores se manteve em aproximadamente 4 metros durante toda a campanha (a variação do nível d'água da represa foi mínima). A figura 4.5 traz a configuração dos equipamentos durante a campanha.



Figura 4.3: Estação micrometeorológica no Lago de Furnas (Guapé, Minas Gerais).



Figura 4.4: Configuração dos equipamentos após o Exfu-3, na estação micrometeorológica de Guapé: anemômetro Young 81000 e sonda Campbell Sci. CS500 no abrigo de PVC à esquerda; analisador de CO₂/H₂O Campbell Sci. Licor-7500 à direita.

Além do novo sensor instalado, duas mudanças importantes ocorreram no experimento Exfu-4. Em primeiro lugar, a sonda CS500 voltou a ser utilizada *com* a sua capa protetora. Nos experimentos anteriores, tal capa fora retirada a fim de aumentar a sensibilidade do sensor capacitivo e de diminuir o seu tempo de resposta. Como a falta da capa implica na diminuição de sua vida útil, neste experimento optou-se por utilizar a sonda encapada. Em segundo lugar, neste experimento a coleta de dados foi realizada através de dois conjuntos *datalogger* + PDA, uma vez que o número de canais armazenados era muito elevado (19) e que o programa de coleta de dados do PDA (*ADT512.prc*) apresentou problemas em testes realizados com o número de canais superior a 10, armazenados à frequência de 20 Hz. Tal problema provavelmente decorreu de uma pequena incompatibilidade entre o programa e o PDA Palm Zire 71, utilizado no experimento. O programa foi desenvolvido para o modelo Palm m125, e adaptações deverão ser feitas para o seu correto funcionamento no Palm Zire 71.

Assim como no Exfu-2, os dados foram coletados à frequência de 20 Hz e armazenados nos cartões de memória dos Palms no formato binário da Campbell. A tabela 4.1 traz de forma resumida uma listagem com os equipamentos de medição utilizados em cada experimento, assim como as variáveis associadas.

Equipamento	Variáveis medidas / finalidade
Exfu-2*	
1 Anemômetro sônico Campbell Sci. CSAT-3	3 componentes da velocidade do vento ($U_{0\alpha}$, $V_{0\alpha}$ e $W_{0\alpha}$) e temperatura virtual $\Theta_{v\alpha}$
1 Anemômetro sônico Young 81000	3 componentes da velocidade do vento ($U_{0\beta}$, $V_{0\beta}$ e $W_{0\beta}$)
1 Higrômetro infravermelho Campbell Sci. KH20	Densidade de vapor d'água (R_α)
1 Sonda Campbell Sci. CS500 <i>desencapada</i> + abrigo	Temperatura (Θ) e umidade relativa do ar (Y)
2 Termopares Campbell Sci. FWTC3	Temperatura do ar junto aos anemômetros (não utilizada neste trabalho)
1 Datalogger Campbell Sci. CR23X	Sistema de coleta e armazenamento de dados
1 PDA Palm m125	Sistema de coleta e armazenamento de dados
Exfu-3b**	
1 Anemômetro sônico Young 81000	3 componentes da velocidade do vento ($U_{0\beta}$, $V_{0\beta}$ e $W_{0\beta}$) e temperatura virtual $\Theta_{v\beta}$
1 Analisador de CO ₂ /H ₂ O Campbell Sci. Licor-7500	Concentração de vapor d'água (C_{H_2O}) e de CO ₂ (C_{CO_2}) (esta última não foi utilizada neste trabalho)
1 Sonda Campbell Sci. CS500 <i>desencapada</i> + abrigo	Temperatura (Θ) e umidade relativa do ar (Y)
2 Termopares Campbell Sci. FWTC3	Temperatura do ar junto ao anemômetro e junto ao abrigo de PVC (não utilizada neste trabalho)
1 Datalogger Campbell Sci. CR23X	Sistema de coleta e armazenamento de dados
Exfu-4*	
1 Anemômetro sônico Campbell Sci. CSAT-3	3 componentes da velocidade do vento ($U_{0\alpha}$, $V_{0\alpha}$ e $W_{0\alpha}$) e temperatura virtual $\Theta_{v\alpha}$
1 Anemômetro sônico Young 81000	3 componentes da velocidade do vento ($U_{0\beta}$, $V_{0\beta}$ e $W_{0\beta}$) e temperatura virtual $\Theta_{v\beta}$ (não utilizada neste trabalho)
1 Higrômetro infravermelho Campbell Sci. KH20	Densidade de vapor d'água (R_α)
1 Analisador de CO ₂ /H ₂ O Campbell Sci. Licor-7500	Concentração de vapor d'água (C_{H_2O}) e de CO ₂ (C_{CO_2}) (esta última não foi utilizada neste trabalho)
1 Sonda Campbell Sci. CS500 <i>encapada</i> + abrigo	Temperatura (Θ) e umidade relativa do ar (Y)
1 Termopar Campbell Sci. FWTC3	Temperatura do ar junto ao abrigo de PVC (não utilizada neste trabalho)
2 Dataloggers Campbell Sci. CR23X	Sistema de coleta e armazenamento de dados
2 PDAs Palm Zire 71	Sistema de coleta e armazenamento de dados

* foram armazenados os valores instantâneos à frequência de 20 Hz

** foram armazenadas somente as médias e os desvios-padrão de 30 minutos, além das covariâncias entre as componentes de velocidade do vento e entre estas e os escalares

Tabela 4.1: Relação dos equipamentos para medição de fluxos utilizados nos experimentos Exfu-2, Exfu-3b e Exfu-4 e variáveis associadas.



Figura 4.5: Configuração dos instrumentos utilizados no Exfu-4, na estação micrometeorológica de Guapé.

4.2 Preparação dos dados

4.2.1 Formatação e controle de qualidade

Os dados dos experimentos intensivos Exfu-2 e Exfu-4 foram armazenados nos cartões de memória em arquivos de 15 minutos, no formato binário padrão da Campbell Sci.. Para cada instante de medição foram escritos no arquivo de saída a data, horário e uma sequência com todas as leituras dos equipamentos.

O Lemma desenvolveu um formato de arquivo binário otimizado para o armazenamento de dados de turbulência, tanto do ponto de vista de espaço utilizado em *bytes* quanto do ponto de vista da facilidade e praticidade de seu processamento. Estes arquivos, chamados de *turb*, são gerados a partir dos binários Campbell e também possuem 15 minutos de duração, porém apresentam o horário inicial e final múltiplos de 15 minutos (*e.g.* 10:00-10:15, 10:15-10:30, 10:30-10:45, 10:45-11:00) para facilitar a organização dos dados. Os arquivos *turb* trazem no cabeçalho informações úteis como frequência de medição, número de canais utilizados, nome

de cada canal (*i.e.* nome de cada variável medida e sua unidade) e data/horário da última medição do arquivo. Todos os dados de data/hora impressos para cada instante de medição nos binários Campbell são excluídos nos arquivos *turb*, o que significa economia de *bytes*. Dado que um arquivo *turb* possui 15 minutos de medições, as informações do cabeçalho são suficientes para localizar no tempo cada medição do arquivo. Para maiores detalhes sobre o formato, a geração e a leitura de um arquivo *turb*, consulte o apêndice B.

Com os dados do Exfu-2 e do Exfu-4 devidamente formatados em arquivos *turb*, e com os dados “convencionais” do Exfu-3b (médias e variáveis estatísticas de 30 minutos), deu-se início ao controle de qualidade dos mesmos. A fim de facilitar tal processo foi desenvolvido um programa em linguagem C chamado *turb2png-plus*, que plota uma determinada variável (escolhida pelo usuário) contida em um arquivo *turb* em um gráfico no formato *png*. A entrada do programa consiste em uma lista de arquivos *turb* que deseja-se processar, tornando rápida a geração dos gráficos. Maiores detalhes sobre o programa *turb2png-plus* podem ser também encontrados no apêndice B.

Utilizando o programa *turb2png-plus*, todas as variáveis armazenadas em cada arquivo *turb* dos experimentos Exfu-2 e Exfu-4 foram plotadas. A partir de uma análise visual dos gráficos, foram desconsiderados todos os arquivos *turb* nos quais havia ao menos uma variável com comportamento anômalo (*e.g.* componentes de velocidade do vento medidas com os sensores sônicos molhados devido à chuva ou orvalho, o mesmo valendo para a densidade de vapor d’água monitorada pelos sensores infravermelhos). Os arquivos com interrupções nas séries temporais armazenadas, devidas ao processo de troca diária dos cartões de memória dos PDAs, também foram desconsiderados.

O Exfu-2 foi realizado no verão, o que já implica em mais chuva e conseqüentemente mais falhas dos sensores sônicos e infravermelhos. Além deste fato, muitas falhas ocorreram devidas ao sistema de aquisição de dados. Na conversão dos dados brutos para o formato *turb*, foram evidenciadas várias perdas de *flags* e interrupções no armazenamento de dados no cartão de memória do PDA. Acredita-se que o problema estava na relação entre o PDA e

o cartão de memória, controlada pelo programa de aquisição. Além das perdas de *flags*, na maioria dos arquivos *turb* gerados notou-se uma falha de 1 segundo de duração (provavelmente no momento em que o programa iniciava a escrita de um arquivo no cartão de memória). Tal programa foi atualizado posteriormente (*ADT512* é a última versão) e utilizado sem nenhum problema nos experimentos Exfu-3 e Exfu-4. Os arquivos *turb* aprovados pela análise anterior e que apresentaram as falhas de 1 segundo foram considerados neste trabalho.

No Exfu-4 a qualidade dos dados coletados é excelente. De uma forma geral, as séries de medições foram interrompidas somente nos instantes de troca dos cartões de memória dos PDAs (*dataloggers* A e B) — algo por volta de 5 minutos — e durante uma forte chuva que ocorreu nas últimas 15 horas do experimento. Durante alguns instantes deste período os anemômetros chegaram a registrar valores inválidos, mas voltaram a funcionar adequadamente. Já o higrômetro KH20, depois de molhado, permaneceu inoperante durante todo o período.

Como já foi mencionado anteriormente, neste experimento foram utilizados 2 sistemas de aquisição de dados. Portanto, para cada intervalo de tempo, foram gerados 2 arquivos *turb*: um deles trazendo 10 canais e outro trazendo 9 canais. Como os *dataloggers* A e B não eram conectados/desconectados simultaneamente na hora da troca dos cartões de memória, o armazenamento dos dados em ambos os sistemas não se deu de forma idêntica. Os arquivos *turb* provenientes do sistema A sem os seus correspondentes no sistema B foram desconsiderados, e vice-versa.

Neste trabalho optou-se pela utilização de blocos de dados de 30 minutos (que serão chamados ao longo do texto de *runs*) para o cálculo dos fluxos e para o desenvolvimento da função de correção, sendo portanto necessário o agrupamento dos arquivos *turb* de 30 em 30 minutos (*e.g.* $\text{turb1015}(15\text{min}) + \text{turb1030}(15\text{min}) = \text{turb1030}(30\text{min})$; $\text{turb1045}(15\text{min}) + \text{turb1100}(15\text{min}) = \text{turb1100}(30\text{min})$), onde os horários correspondem ao final do arquivo *turb* e o número entre parênteses à duração do mesmo). Todos os arquivos *turb* órfãos (*i.e.* sem o seu complemento de 30 minutos) foram desconsiderados para o Exfu-2 e para o Exfu-4.

Quanto ao Exfu-3b, os dados anômalos de 30 minutos correspondentes principalmente aos sensores sônicos e infravermelhos molhados foram desconsiderados, da mesma forma que para os experimentos Exfu-2 e Exfu-4. A quantidade de dados desconsiderados foi pequena, uma vez que o tempo estava seco durante o experimento (segunda metade do inverno). A qualidade dos dados no geral é muito boa.

Para o Exfu-3b e para o Exfu-4 ainda foram desconsiderados todos os *runs* de 30 minutos cuja direção do vento médio horizontal ficou entre 120° e 240° (basicamente ventos oriundos de trás da torre de medição, que impõe uma grande perturbação ao escoamento antes do mesmo chegar nos anemômetros, orientados para Norte). A figura 4.6 traz o referencial utilizado para o cálculo da direção do vento (padrão meteorológico), e a figura 4.7 mostra o intervalo problemático. No Exfu-2 os anemômetros também estavam orientados para o Norte, e apesar da torre de medição empregada impor uma perturbação menor ao escoamento, foi utilizado o mesmo critério para a seleção dos *runs* bons.

Após todo o controle de qualidade realizado, restaram 214 de 362 (60%) *runs* para o Exfu-2, 260 de 371 (70%) para o Exfu-4 e 2139 de 2593 (82%) para o Exfu-3b, a serem utilizados no procedimento de calibração e validação da nova metodologia de correção de fluxos. Perdas da ordem de 30–40% não são atípicas em se tratando de medições realizadas com o MCT, *e.g.* Katul et al. (2001).

4.2.2 Pré-processamento

Para o processamento dos dados dos experimentos Exfu-2 e Exfu-4 foram desenvolvidos programas computacionais em linguagem C (todo o processamento de dados realizado neste trabalho utilizou-se desta ferramenta) que primeiramente armazenam em vetores de 36000 posições (*runs* de 30 minutos, com medições a 20 Hz) os valores de $U_{0\alpha}$, $V_{0\alpha}$, $W_{0\alpha}$, $\Theta_{v\alpha}$ (componentes de velocidade do vento e temperatura virtual registradas pelo anemômetro sônico Campbell Sci. CSAT3), $U_{0\beta}$, $V_{0\beta}$, $W_{0\beta}$ (componentes de velocidade do vento registradas pelo anemômetro sônico Young 81000), R_α (densidade de vapor d'água registrada pelo higrômetro infravermelho Campbell Sci. KH20 — sinal ainda em milivolt), R_β e Θ (respectivamente a densidade de vapor d'água e a temperatura do ar registrada pela sonda CS500). Como a sonda CS500 fornece apenas a temperatura e a umidade relativa do ar Y , a densidade de vapor d'água foi obtida do seguinte modo (STULL, 1995):

$$R_\beta = 1000 \frac{Y e_a^*}{\Re \Theta}, \quad (4.1)$$

onde e_a^* é a pressão de saturação de vapor d'água (Pa) à temperatura Θ (K), e $\Re = 461,5 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ é a constante dos gases para o vapor d'água; o resultado é dado em g m^{-3} . A pressão de saturação de vapor d'água foi obtida através de (BRUTSAERT, 1982)

$$e_a^* = 101325 \exp(a_1 t_r + a_2 t_r^2 + a_3 t_r^3 + a_4 t_r^4), \quad (4.2)$$

onde $a_1 = 13,3185$, $a_2 = -1,9760$, $a_3 = -0,6445$, $a_4 = -0,1299$ e $t_r = 1 - 373,15/\Theta$.

Após o armazenamento de R_β , sua média de 30 minutos $\bar{R}_\beta$ é calculada. Com este valor médio é escolhida, através da subrotina *setkh2o()*, a constante de calibração adequada do higrômetro infravermelho KH20. Tal constante é utilizada pela subrotina *kh2o()*, que por sua vez converte a leitura do sensor em mV para densidade de vapor d'água em g m^{-3} . A partir desta subrotina todos os valores previamente armazenados de R_α são “decodificados” para g m^{-3} . Para maiores detalhes sobre as subrotinas utilizadas para o processamento dos dados obtidos pelo higrômetro KH20, vide apêndice C.

No Exfu-4 também foi armazenada a densidade de vapor d'água monitorada pelo analisador infravermelho Campbell Sci. Licor-7500 ($R_{\alpha 2}$). Como o instrumento fornece a concentração de vapor d'água C_{H_2O} em mmol m^{-3} , a densidade foi obtida (em g m^{-3}) através de

$$R_{\alpha 2} = M_{H_2O} C_{H_2O}, \quad (4.3)$$

onde $M_{H_2O} = 18 \times 10^{-3} \text{ g mmol}^{-1}$ é a massa molar da água.

4.2.2.1 Rotação de coordenadas

No processo de instalação de um anemômetro sônico tridimensional, que possui um sistema coordenado fixo x_0 , y_0 e z_0 (associado às componentes de velocidade U_0 , V_0 e W_0 respectivamente), procura-se posicioná-lo de tal forma que seu eixo x_0 fique alinhado com a direção Norte-Sul ou com a direção Leste-Oeste. O alinhamento do eixo z_0 é feito com a direção vertical do local, dada por um nível de bolha.

Antes do cálculo de fluxos, costuma-se realizar uma rotação de coordenadas, alinhando o novo eixo x com a direção do vento médio (paralelo à superfície) e o novo eixo z com a direção normal à superfície, sendo este processo de grande importância para torres de medição instaladas em superfícies inclinadas.

Mesmo com os sítios experimentais apresentando inclinação do terreno pouco acentuada (no caso da fazenda da Embrapa, palco do Exfu-2) ou nula (no caso do Lago de Furnas, palco do Exfu-4 e do Exfu-3b), decidiu-se realizar a rotação de coordenadas, uma vez que a mesma acaba por corrigir pequenas inclinações dos anemômetros sônicos.

As componentes U , V e W no novo sistema de coordenadas podem ser escritas em função das componentes originais U_0 , V_0 e W_0 da seguinte forma (DIAS et al., 2003):

$$U = \cos \alpha_x \cos \alpha_z U_0 + \sin \alpha_x \cos \alpha_z V_0 + \sin \alpha_z W_0, \quad (4.4)$$

$$V = -\sin \alpha_x U_0 + \cos \alpha_x V_0, \quad (4.5)$$

$$W = -\cos \alpha_x \sin \alpha_z U_0 - \sin \alpha_x \sin \alpha_z V_0 + \cos \alpha_z W_0. \quad (4.6)$$

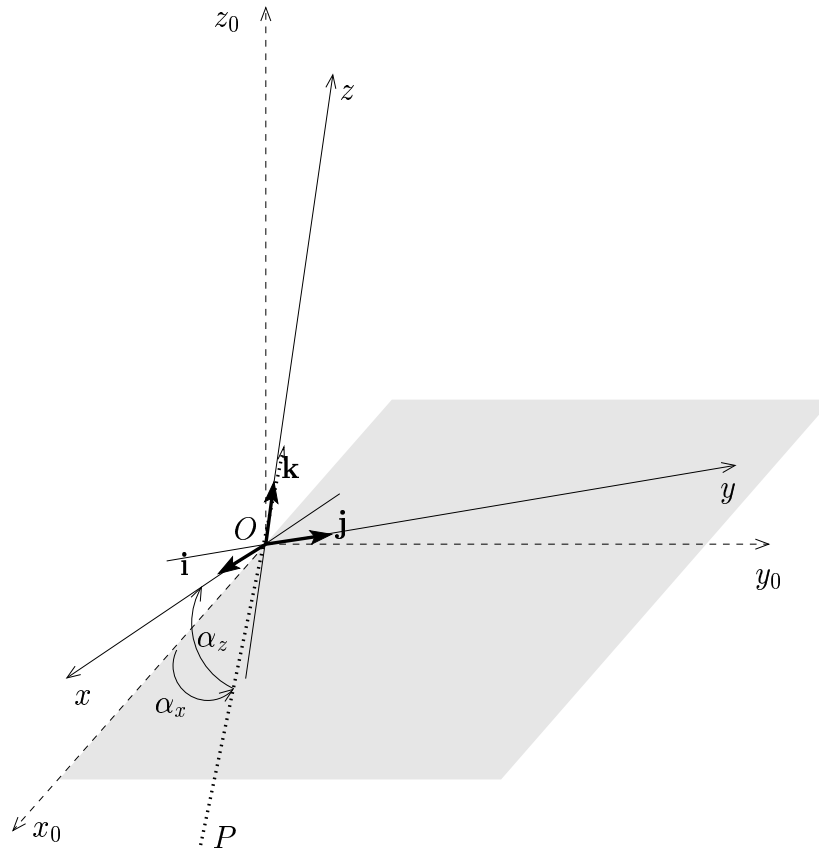


Figura 4.8: Rotação de eixos para alinhar o vetor velocidade média do vento com Ox : a linha pontilhada OP no plano Ox_0y_0 indica a direção da velocidade do vento horizontal em relação a Ox_0 , α_x ; em seguida, uma rotação α_z em torno de Oy (que também está no plano Ox_0y_0 , e que é perpendicular a OP) torna $\bar{W} = 0$.

Os ângulos α_x e α_z podem ser vistos respectivamente como a longitude e latitude do eixo x (alinhado com o vento médio) em relação às coordenadas x_0 , y_0 e z_0 :

$$\alpha_x = \text{arctg}_*(\bar{V}_0, \bar{U}_0), \quad (4.7)$$

$$\alpha_z = \text{arctg}_* \left[\bar{W}_0, \left(\bar{U}_0^2 + \bar{V}_0^2 \right)^{1/2} \right], \quad (4.8)$$

onde arctg_* é uma função arctg especial (em linguagem C é dada por $\text{atan2}()$), que analisa os sinais de seus argumentos para determinar o quadrante do ângulo, retornando um arco entre $-\pi$ e $+\pi$. Todo o procedimento de rotação pode ser melhor compreendido através da figura esquemática 4.8.

No novo sistema de coordenadas,

$$\bar{U} = \sqrt{\bar{U}_0^2 + \bar{V}_0^2 + \bar{W}_0^2}, \quad (4.9)$$

$$\bar{V} = 0, \quad (4.10)$$

$$\bar{W} = 0. \quad (4.11)$$

Foi desenvolvida uma subrotina chamada *roteixos()*, que a partir de vetores com N dados armazenados de U_0 , V_0 e W_0 (α ou β) calcula e armazena em novos vetores as componentes U , V e W no novo sistema de coordenadas. Com esta subrotina são calculadas e armazenadas as componentes U_α , V_α , W_α , U_β , V_β e W_β para os experimentos Exfu-2 e Exfu-4.

No caso do Exfu-3b, onde somente as médias e as covariâncias entre as componentes de velocidade e entre estas e os escalares foram armazenadas, o procedimento de rotação de coordenadas é um pouco diferente.

Para a obtenção do fluxo de quantidade de movimento no novo sistema de coordenadas ($\overline{wu}$), basta rotacionar o tensor de Reynolds original

$$\tau_0 = \begin{bmatrix} \overline{u_0 u_0} & \overline{u_0 v_0} & \overline{u_0 w_0} \\ \overline{v_0 u_0} & \overline{v_0 v_0} & \overline{v_0 w_0} \\ \overline{w_0 u_0} & \overline{w_0 v_0} & \overline{w_0 w_0} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

através da relação

$$\tau_{\approx} = C_{\approx}^T \tau_0 C_{\approx}, \quad (4.13)$$

onde a matriz de rotação é dada por

$$C_{\approx} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_x \cos \alpha_z & -\sin \alpha_x & -\cos \alpha_x \sin \alpha_z \\ \sin \alpha_x \cos \alpha_z & \cos \alpha_x & -\sin \alpha_x \sin \alpha_z \\ \sin \alpha_z & 0 & \cos \alpha_z \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

e o tensor após a rotação é dado por

$$\tau \approx \begin{bmatrix} \overline{uu} & \overline{uv} & \overline{uw} \\ \overline{vu} & \overline{vv} & \overline{vw} \\ \overline{wu} & \overline{wv} & \overline{ww} \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

Já o fluxo de um escalar F no novo sistema de coordenadas é obtido por

$$\overline{wf} = -\overline{u_0 f} \cos \alpha_x \sin \alpha_z - \overline{v_0 f} \sin \alpha_x \sin \alpha_z + \overline{w_0 f} \cos \alpha_z. \quad (4.16)$$

Com as equações 4.13 e 4.16 são obtidas as covariâncias $\overline{w_\beta u_\beta}$, $\overline{w_\beta r_{\alpha 2}}$, $\overline{w_\beta r_\beta}$ e $\overline{w_\beta \theta_{v\beta}}$. Seguindo a mesma notação utilizada para o Exfu-2 e Exfu-4, o índice β refere-se ao anemômetro Young 81000 ou à sonda CS500 e o índice $\alpha 2$ refere-se ao analisador Licor-7500 (vale a pena lembrar que no Exfu-3b o anemômetro CSAT3 e o higrômetro KH20 não estavam presentes). A covariância $\overline{w_\beta \theta_{v\beta}}$, assim como a $\overline{w_\beta u_\beta}$, são utilizadas para o cálculo da variável de estabilidade de Monin-Obukhov ζ .

4.2.2.2 Flutuações via filtro autorecursivo

As flutuações de uma variável X , pelo método da filtragem, são obtidas do seguinte modo:

$$X_i^H = X_i - X_i^L, \quad (4.17)$$

$$x_i = X_i^H - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^H, \quad (4.18)$$

onde X_i^H é uma componente de alta frequência e X_i^L é uma componente de baixa frequência. Note que a média de X_i^H é subtraída dos valores instantâneos para que a média das flutuações seja igual a zero.

A componente de baixa frequência pode ser obtida filtrando os dados brutos com um filtro autorecursivo de passa baixa com janela de T_w segundos (HAMMING, 1998):

$$X_i^L = \frac{\Delta t}{T_w} X_i + \left(1 - \frac{\Delta t}{T_w}\right) X_{i-1}^L, \quad (4.19)$$

onde Δt é o inverso da frequência de amostragem (medição) da variável X .

Este procedimento foi empregado para o cálculo das flutuações das componentes W_α , U_α , $\Theta_{v\alpha}$, R_α , W_β e R_β para os experimentos Exfu-2 e Exfu-4 e $R_{\alpha 2}$ para o Exfu-4, para cada *run* de 30 minutos, utilizando uma janela de $T_w = 100$ segundos e $\Delta t = 0,05$ segundos (medições à 20 Hz). Uma subrotina foi desenvolvida para facilitar este processamento (*flutbyfilter()*), onde basta fornecer um vetor com os dados brutos, o tamanho do mesmo, Δt , T_w e dois vetores “limpos” para receberem as flutuações e as componentes de baixa frequência.

O método da filtragem com $T_w = 100$ segundos demonstrou em estudos anteriores realizados pelo Lemma um melhor desempenho para a obtenção da velocidade de atrito u_* , comparado ao simples método de médias de bloco, onde a média do *run* é subtraída dos valores instantâneos das variáveis para a obtenção das flutuações turbulentas. Por este motivo decidiu-se adotar neste trabalho o método da filtragem e tal valor de T_w para o cálculo das flutuações.

4.3 Calibração do modelo de correção

4.3.1 Funções de autocovariância amostrais e ajuste dos parâmetros $\mathcal{T}_{rr}$, T e Λ *run a run*

A covariância de uma variável X em um instante τ , com a mesma variável no instante $\tau + t$, é chamada de autocovariância $C_{x,x}(t)$, uma medida estatística da persistência de uma oscilação em toda a extensão de uma série temporal. Uma autocovariância próxima de zero indica a ocorrência de um processo aleatório (*e.g.* turbulência) sem persistência ou sem a presença de estruturas recorrentes (STULL, 1988; GLOVER et al., 2004). Como a autocovariância é usualmente representada em gráficos $C_{x,x}$ *versus* t , costuma-se utilizar o termo “função de autocovariância”.

Segundo Morettin e Toloi (2004), a função discreta de autocovariância de uma variável X em função do intervalo de tempo t pode ser aproximada por

$$C_{x,x}(t = h\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-h} x_i x_{i+h}, \quad (4.20)$$

onde Δt é o inverso de sua frequência de amostragem, N é o tamanho da amostra, e x_i e x_{i+h} são as flutuações da variável X em torno da média amostral nos instantes $t = i\Delta t$ e $t = (i+h)\Delta t$ respectivamente.

Com as flutuações de R_α e R_β obtidas nos experimentos Exfu-2 e Exfu-4, as funções de autocovariância amostrais C_{r_α, r_α} e C_{r_β, r_β} foram calculadas através da equação 4.20 para t de 0 a 100 segundos, para cada *run* de 30 minutos. A equação 4.20, segundo Stull (1988), funciona satisfatoriamente para t pequenos e para amostras grandes: à medida que t aumenta, a porcentagem da série temporal utilizada para o cálculo da autocovariância diminui, reduzindo a sua significância estatística. A escolha do intervalo de 0 a 100 segundos foi baseada neste critério, e é suficiente para a proposta deste trabalho.

A função de autocovariância de um sinal irregular como a turbulência parte da variância ($C_{x,x}(0) = \sigma_x^2$) e tende a zero quando $t \rightarrow +\infty$. Contudo, esta tendência de decaimento já pode ser observada para valores de t pequenos, onde ocorrem oscilações espúrias da função em torno de zero. Para a suavização destas oscilações, presentes nas funções de autocovariância amostrais obtidas, foi empregado o método utilizado por Dias et al. (2004):

$$C_{x,x}^\dagger(t) = \alpha(t)C_{x,x}(t), \quad (4.21)$$

onde $C_{x,x}^\dagger(t)$ é a função de autocovariância suavizada e $\alpha(t)$ é a janela de Parzen dada por

$$\alpha(t) = \begin{cases} 1 - 6(t/t_0)^2 + 6(t/t_0)^3 & t \leq t_0/2 \\ 2(1 - t/t_0)^3 & t_0/2 < t \leq t_0 \\ 0 & t > t_0 \end{cases} \quad (4.22)$$

com $t_0 = 50z/\overline{U}_h$. O comportamento da equação 4.22 é ilustrado na figura 4.9, para o caso específico em que $t_0 = 50s$ (ou $z/\overline{U}_h = 1s$). Já a figura 4.10 mostra a aplicação da janela de Parzen na função C_{r_α, r_α} amostral obtida em um *run* do Exfu-2, com t_0 devidamente calculado através da altura de medição e da velocidade horizontal média do vento registrada no *run*.

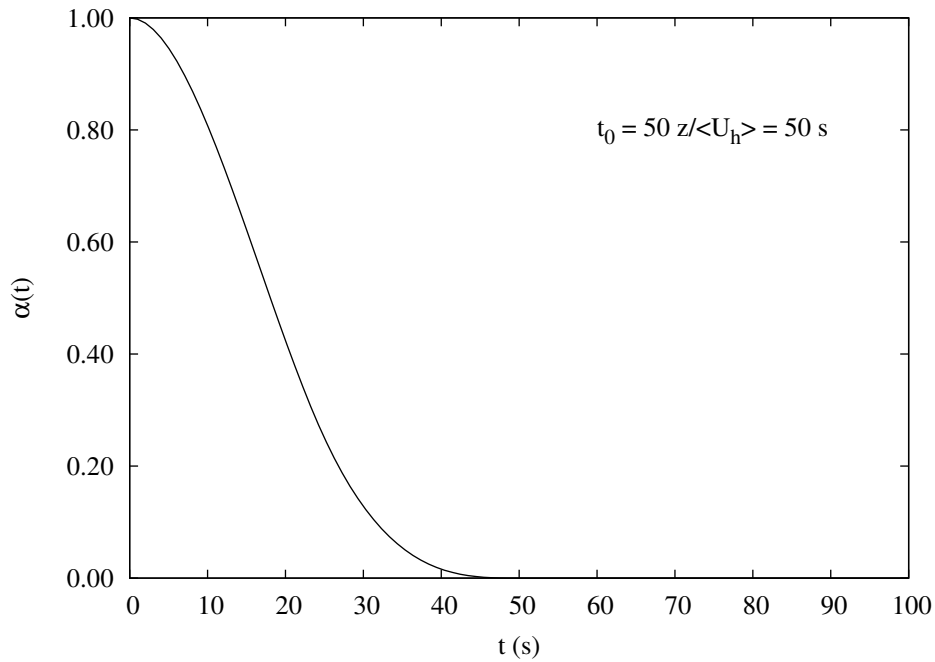


Figura 4.9: Ilustração da janela de Parzen (equação 4.22) para a condição particular $t_0 = 50$ s.

Para o Exfu-4 foram desconsiderados os *runs* (i) cuja primeira interseção da função de autocovariância (C_{r_α, r_α} ou C_{r_β, r_β}) com o eixo $C_{x,x} = 0$ ocorreu para $t > t_0$ (a utilização da janela de Parzen implicaria na deformação da função, forçando-a a tender a zero precipitadamente), (ii) cuja função de autocovariância (C_{r_α, r_α} ou C_{r_β, r_β}) demonstrou um comportamento anômalo com fortes oscilações, e aqueles que (iii) apresentaram $t_0 > 100$ segundos. Esta última restrição foi imposta a partir da análise das funções de autocovariância amostrais, que apresentavam para valores elevados de t_0 (*i.e.* condições de vento fraco) um comportamento peculiar não totalmente previsto pelas equações analíticas desenvolvidas.

Para o Exfu-2 os mesmos critérios foram adotados em um primeiro momento. Como a quantidade de *runs* úteis que restaram foi muito inferior em relação ao Exfu-4 (o Exfu-2 por si só já apresentou uma quantidade de *runs* razoavelmente menor em relação ao Exfu-4, devido a falhas de medição), decidiu-se manter apenas as restrições (i) e (ii). Nos casos em que t_0 era superior a 100 segundos, a função de autocovariância era calculada, se necessário, para $t > 100$ s, até o primeiro cruzamento com o eixo $C_{x,x} = 0$ ser encontrado, possibilitando a checagem da condição (i).

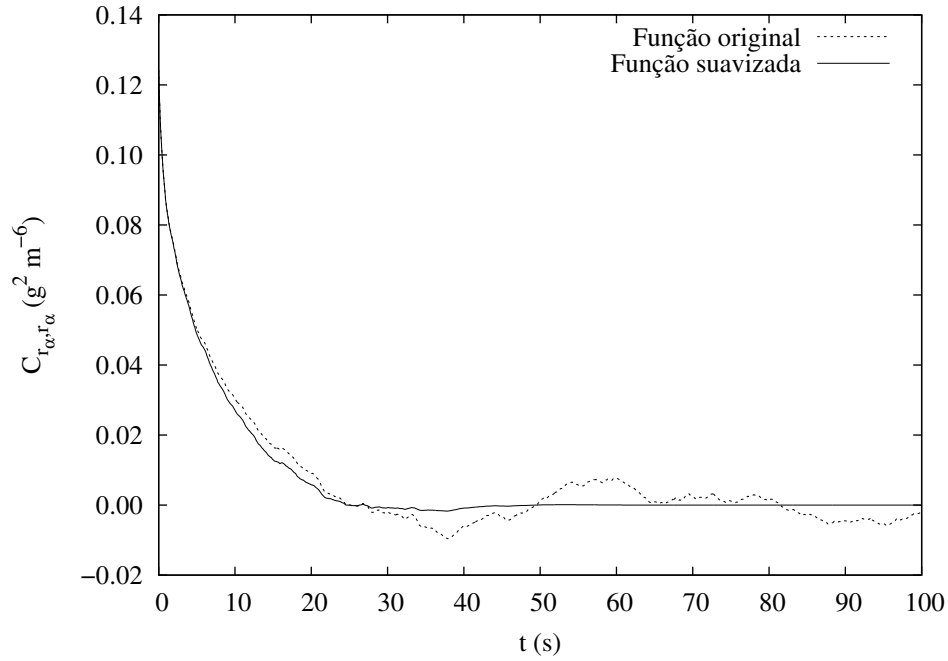


Figura 4.10: Exemplo de aplicação da janela de Parzen: função de autocovariância amostral $C_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ antes e depois da suavização (Exfu-2, 17/01/2004 08:30 $\rightarrow$ 09:00 h).

Uma vez calculadas as funções $C_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ e $C_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ amostrais, o primeiro passo foi a obtenção da escala integral $\mathcal{T}_{rr}$. A equação 3.15 foi ajustada a cada função de autocovariância amostral $C_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ obtida, *run a run*, através do parâmetro $\mathcal{T}_{rr}$. As variâncias medidas de R_{α} foram empregadas, e as integrais foram resolvidas numericamente através do método de Romberg, onde foram utilizadas/adaptadas subrotinas de Press et al. (1992) (para maiores detalhes do método numérico e das subrotinas utilizadas, consulte o apêndice D). Já o ajuste propriamente dito da equação aos pontos amostrais foi realizado através do método dos mínimos quadrados não linear (algoritmo de Levenberg-Marquardt), utilizando a implementação em C criada por Lourakis (2004) (veja no apêndice E maiores informações sobre o algoritmo de Levenberg-Marquardt e sobre a implementação utilizada).

Uma vez disponíveis os valores de $\mathcal{T}_{rr}$, o segundo passo consistiu na obtenção dos parâmetros T e Λ . A equação 3.18 foi ajustada a cada função de autocovariância amostral $C_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ obtida, através dos parâmetros T e Λ^2 e utilizando os valores de $\mathcal{T}_{rr}$ obtidos no passo anterior. A resolução das integrais e os ajustes foram realizados pelos mesmos métodos anteriormente mencionados.

As tabelas 4.2 e 4.3 trazem os valores obtidos para $\mathcal{T}_{rr}$, T e Λ^2 durante o Exfu-2 e o Exfu-4, respectivamente.

Tabela 4.2: Valores ajustados via Levenberg-Marquardt para $\mathcal{T}_{rr}$, T e Λ^2 , *run a run* — Exfu-2

<i>Run</i> (Exfu-2)	$\mathcal{T}_{rr}$ (s)	T (s)	Λ^2 (adim.)
14/01/2004 15:00-15:30h	7,640332	0,469755	0,853541
14/01/2004 15:30-16:00h	6,814625	0,477028	0,757845
14/01/2004 16:30-17:00h	14,031026	0,483309	0,935274
14/01/2004 17:00-17:30h	15,617166	0,596056	0,944818
15/01/2004 10:00-10:30h	6,307472	0,484424	0,775624
15/01/2004 10:30-11:00h	6,358287	0,486003	0,835736
15/01/2004 11:30-12:00h	9,765024	0,494841	0,795696
16/01/2004 07:00-07:30h	6,280218	0,477778	0,818144
16/01/2004 07:30-08:00h	6,970406	0,514594	0,768903
16/01/2004 08:00-08:30h	5,909009	0,496986	0,858547
16/01/2004 08:30-09:00h	7,309065	0,517788	0,767578
16/01/2004 10:30-11:00h	12,123155	0,474210	0,803778
16/01/2004 11:00-11:30h	9,985128	0,505468	0,796349
16/01/2004 14:00-14:30h	5,576770	0,488393	0,898918
16/01/2004 15:00-15:30h	6,984469	0,478368	0,919883
17/01/2004 08:00-08:30h	8,593526	0,473168	0,790799
17/01/2004 08:30-09:00h	6,128419	0,497777	0,871439
17/01/2004 09:00-09:30h	5,826482	0,461401	0,781822
17/01/2004 09:30-10:00h	4,844274	0,476442	0,879548
17/01/2004 10:00-10:30h	7,590805	0,463639	0,853097
17/01/2004 10:30-11:00h	8,028997	0,493519	0,821741
17/01/2004 11:00-11:30h	6,796484	0,486843	0,853055
17/01/2004 11:30-12:00h	8,093721	0,431331	0,826574
17/01/2004 12:00-12:30h	11,019095	0,492489	0,858856
17/01/2004 14:30-15:00h	5,968736	0,443021	0,928339
17/01/2004 15:00-15:30h	7,150591	0,485986	0,908703
17/01/2004 15:30-16:00h	9,561851	0,489083	0,887937
17/01/2004 16:00-16:30h	13,347460	0,514296	0,995696
17/01/2004 18:00-18:30h	3,971180	0,489727	0,856568
19/01/2004 07:00-07:30h	7,840999	0,499914	0,542191
19/01/2004 08:30-09:00h	10,759984	0,572350	0,740018
19/01/2004 10:00-10:30h	5,785703	0,498630	0,907985
19/01/2004 11:00-11:30h	8,581856	0,483312	0,893490
19/01/2004 11:30-12:00h	8,925046	0,482758	0,854604
19/01/2004 12:00-12:30h	6,284395	0,478903	0,905046
19/01/2004 12:30-13:00h	7,270227	0,413162	0,841059
19/01/2004 13:00-13:30h	8,954328	0,495196	0,814342

Continua na próxima página...

Continuação

<i>Run</i> (Exfu-2)	$\mathcal{T}_{rr}$ (s)	T (s)	Λ^2 (adim.)
19/01/2004 13:30-14:00h	6,168379	0,436725	0,856106
19/01/2004 14:30-15:00h	8,559474	0,464253	0,839375
19/01/2004 15:00-15:30h	6,633889	0,496998	0,892807
19/01/2004 16:00-16:30h	7,913105	0,475157	0,950723
19/01/2004 16:30-17:00h	10,039195	0,484641	0,912920
20/01/2004 10:30-11:00h	10,285892	0,464526	0,801558
20/01/2004 11:00-11:30h	10,384461	0,447813	0,753142
20/01/2004 12:00-12:30h	12,449022	0,432369	0,771139
20/01/2004 12:30-13:00h	7,380548	0,442138	0,931647
20/01/2004 13:00-13:30h	9,493973	0,494273	0,790633
20/01/2004 13:30-14:00h	6,782884	0,472806	0,893728
20/01/2004 14:00-14:30h	10,271236	0,472927	0,959100
20/01/2004 14:30-15:00h	12,172693	0,495170	0,827009
20/01/2004 15:00-15:30h	9,722605	0,482701	0,892016
20/01/2004 15:30-16:00h	10,521745	0,490337	0,856198
20/01/2004 16:30-17:00h	12,108770	0,483622	0,919255
20/01/2004 17:00-17:30h	9,993977	0,445887	0,933717
20/01/2004 17:30-18:00h	12,219663	0,494926	0,820868
21/01/2004 07:30-08:00h	4,922981	0,433111	0,744539
21/01/2004 08:30-09:00h	9,098923	0,460202	0,712462
21/01/2004 09:00-09:30h	4,730052	0,447556	0,695425
21/01/2004 09:30-10:00h	7,029324	0,397889	0,709793
21/01/2004 10:00-10:30h	7,123249	0,420226	0,773292
Total: 60 runs			

Tabela 4.3: Valores ajustados via Levenberg-Marquardt para $\mathcal{T}_{rr}$, T e Λ^2 , *run a run* — Exfu-4

<i>Run</i> (Exfu-4)	$\mathcal{T}_{rr}$ (s)	T (s)	Λ^2 (adim.)
20/07/2005 11:30-12:00h	5,000000	3,890844	0,534049
20/07/2005 12:30-13:00h	5,318132	3,894480	0,602295
20/07/2005 13:00-13:30h	4,951728	3,863828	0,635417
20/07/2005 15:00-15:30h	6,200341	3,797728	0,698011
20/07/2005 17:00-17:30h	5,698140	4,111015	0,655875
20/07/2005 18:00-18:30h	5,802416	3,945417	0,549475
20/07/2005 19:00-19:30h	5,000000	2,716701	0,405179
20/07/2005 19:30-20:00h	3,540287	3,637592	0,499499
20/07/2005 20:00-20:30h	3,835206	2,741505	0,372543
20/07/2005 20:30-21:00h	3,122631	3,019090	0,370034
20/07/2005 21:00-21:30h	3,125124	3,198328	0,340700
20/07/2005 21:30-22:00h	3,716721	2,949663	0,318590
20/07/2005 22:00-22:30h	2,841157	2,845301	0,269972
20/07/2005 23:00-23:30h	2,962394	2,901007	0,250661
21/07/2005 00:30-01:00h	3,242845	2,751103	0,242365

Continua na próxima página...

Continuação

<i>Run</i> (Exfu-4)	$\mathcal{T}_{rr}$ (s)	T (s)	Λ^2 (adim.)
21/07/2005 02:30-03:00h	4,237934	3,026845	0,250717
21/07/2005 03:30-04:00h	4,610911	3,528018	0,264741
21/07/2005 04:00-04:30h	4,028265	3,495189	0,278301
21/07/2005 06:00-06:30h	5,000000	3,439134	0,247697
21/07/2005 06:30-07:00h	4,076876	3,871766	0,306687
21/07/2005 07:00-07:30h	4,116808	3,762769	0,300782
21/07/2005 08:00-08:30h	4,699810	4,101880	0,335288
21/07/2005 09:00-09:30h	5,355634	4,528981	0,461588
21/07/2005 10:00-10:30h	5,000000	2,992280	0,433940
21/07/2005 11:00-11:30h	4,651244	3,000662	0,546378
21/07/2005 14:00-14:30h	6,009208	3,100337	0,731625
21/07/2005 20:30-21:00h	4,063757	5,063353	0,394715
22/07/2005 04:00-04:30h	5,168433	2,690112	0,132367
22/07/2005 06:30-07:00h	9,549074	3,048949	0,262209
22/07/2005 07:00-07:30h	5,000000	3,684013	0,435926
22/07/2005 07:30-08:00h	4,017816	3,747236	0,533722
22/07/2005 10:30-11:00h	5,741182	3,396675	0,599858
22/07/2005 16:30-17:00h	15,975617	3,637232	0,845025
23/07/2005 07:30-08:00h	4,333901	3,522959	0,351216
23/07/2005 11:00-11:30h	7,189204	3,827872	0,656439
24/07/2005 03:30-04:00h	5,005636	3,768153	0,427308
24/07/2005 04:00-04:30h	11,031419	4,846900	0,526855
24/07/2005 07:30-08:00h	3,575694	2,852019	0,575812
24/07/2005 08:00-08:30h	4,204850	3,610760	0,671604
24/07/2005 08:30-09:00h	4,413265	3,585882	0,634777
24/07/2005 09:00-09:30h	5,754632	3,830781	0,640500
24/07/2005 11:00-11:30h	5,005290	3,073904	0,731964
24/07/2005 11:30-12:00h	4,966362	2,538461	0,727899
24/07/2005 16:00-16:30h	5,600500	3,095204	0,861104
24/07/2005 17:00-17:30h	16,223412	3,839171	0,924251
25/07/2005 01:30-02:00h	8,162897	3,886159	0,613036
25/07/2005 02:00-02:30h	4,512046	3,823062	0,676201
25/07/2005 02:30-03:00h	5,000000	3,843691	0,655552
25/07/2005 03:00-03:30h	14,419822	3,821595	0,678158
25/07/2005 05:00-05:30h	8,268192	3,872194	0,627531
25/07/2005 05:30-06:00h	8,212118	3,894348	0,586901
25/07/2005 06:00-06:30h	9,895200	3,924899	0,580196
25/07/2005 06:30-07:00h	4,230911	3,802629	0,541155
25/07/2005 07:00-07:30h	6,487004	3,891073	0,557582
25/07/2005 07:30-08:00h	6,106869	3,847924	0,675848
25/07/2005 08:00-08:30h	4,330191	3,521979	0,605201
25/07/2005 08:30-09:00h	4,356862	3,507587	0,656098

Continua na próxima página...

Continuação

<i>Run</i> (Exfu-4)	$\mathcal{T}_{rr}$ (s)	T (s)	Λ^2 (adim.)
25/07/2005 10:00-10:30h	4,278293	3,382002	0,667639
25/07/2005 10:30-11:00h	5,792662	3,326845	0,696862
25/07/2005 17:00-17:30h	6,976845	4,532417	0,696782
25/07/2005 17:30-18:00h	5,949062	3,918391	0,683922
25/07/2005 19:00-19:30h	5,000000	4,051333	0,634662
25/07/2005 19:30-20:00h	4,035866	2,552185	0,457732
25/07/2005 20:00-20:30h	5,552375	4,286669	0,641100
25/07/2005 20:30-21:00h	8,414200	3,310205	0,518177
25/07/2005 21:00-21:30h	5,000000	4,107748	0,661880
25/07/2005 21:30-22:00h	7,828670	4,140323	0,548362
25/07/2005 22:00-22:30h	4,660584	2,979093	0,539215
25/07/2005 22:30-23:00h	5,000000	4,364368	0,556601
26/07/2005 23:30-00:00h	5,359031	3,184251	0,444980
26/07/2005 00:00-00:30h	5,843616	3,985120	0,471532
26/07/2005 00:30-01:00h	5,065709	4,127798	0,466774
26/07/2005 01:00-01:30h	5,542019	3,900344	0,385647
26/07/2005 01:30-02:00h	5,000000	3,791372	0,323685
26/07/2005 02:30-03:00h	4,457176	3,714020	0,298236
26/07/2005 03:00-03:30h	6,832302	4,661708	0,363935
26/07/2005 04:00-04:30h	3,913830	4,455036	0,368432
26/07/2005 04:30-05:00h	5,000000	3,843816	0,358023
26/07/2005 05:00-05:30h	4,620771	3,606903	0,337602
26/07/2005 05:30-06:00h	6,600390	4,351470	0,333484
26/07/2005 06:00-06:30h	5,600272	5,380453	0,458382
26/07/2005 13:00-13:30h	6,886160	3,192140	0,626856
26/07/2005 13:30-14:00h	4,899692	3,249150	0,624964
26/07/2005 14:00-14:30h	6,156715	3,788341	0,733127
27/07/2005 07:30-08:00h	5,305692	4,416328	0,390381
27/07/2005 08:00-08:30h	5,928171	4,254750	0,412123
27/07/2005 10:30-11:00h	3,552642	3,380548	0,521234
27/07/2005 11:00-11:30h	5,000000	4,071071	0,593484
27/07/2005 11:30-12:00h	4,422848	3,736968	0,663225
27/07/2005 13:30-14:00h	5,938174	3,778680	0,764858
Total: 90 runs			

As figuras de 4.11 a 4.22 trazem uma amostra ilustrando o processo de ajuste dos parâmetros $\mathcal{T}_{rr}$, T e Λ para diferentes *runs* dos experimentos Exfu-2 (figuras de 4.11 a 4.16) e Exfu-4 (figuras de 4.17 a 4.22). Para facilitar a visualização são plotadas em escala log-log as funções estrutura D_{r_α, r_α} e D_{r_β, r_β} (amostrais e ajustadas), que são diretamente relacionadas às funções de autocovariância C_{r_α, r_α} e C_{r_β, r_β} :

$$D_{x,x}(t) = 2,0(C_{x,x}(0) - C_{x,x}(t)). \quad (4.23)$$

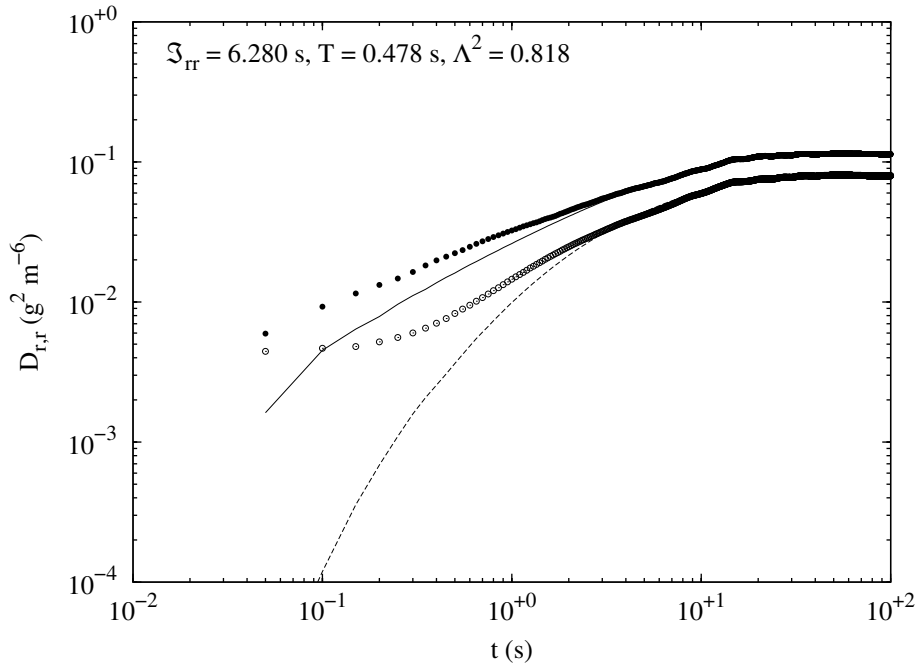


Figura 4.11: Funções estrutura $D_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 16/01/2004 07:00-07:30h.

Nestas figuras, nota-se um afastamento entre as funções ajustadas para $D_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ e os pontos amostrais no intervalo entre 0 e 2 segundos aproximadamente (ênfatisado pela escala log-log), mas seu efeito é nulo para $t \gg 2$ s, e acredita-se que tais ajustes são suficientes para a determinação da resposta do sensor capacitivo.

É importante frisar também a importância da utilização do parâmetro Λ nos ajustes de $C_{r_{\beta}, r_{\beta}}$. A qualidade dos ajustes sem tal parâmetro (*i.e.* fixando $\Lambda = 1$ e variando T) é muito baixa, e este é o principal motivo (puramente empírico) pelo qual decidiu-se modelar a resposta do sensor capacitivo segundo a equação 3.2. Pode-se notar também nas figuras de 4.11 a 4.22 o ruído do sensor capacitivo na função $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ amostral para t abaixo do tempo de resposta T ajustado ($t \lesssim 0,5$ s para o Exfu-2 e $t \lesssim 3,5$ s para o Exfu-4). Estes gráficos ainda mostram de forma muito clara o efeito da utilização da capa protetora na sonda CS500: note a grande atenuação imposta a $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ nos gráficos referentes ao Exfu-4 (experimento realizado com a sonda encapada).

As figuras 4.23 e 4.24 trazem em função da temperatura média do *run* $\bar{\Theta}$ (registrada pela sonda CS500) o tempo de resposta T e o parâmetro Λ^2 ajustados para cada função de autocova-

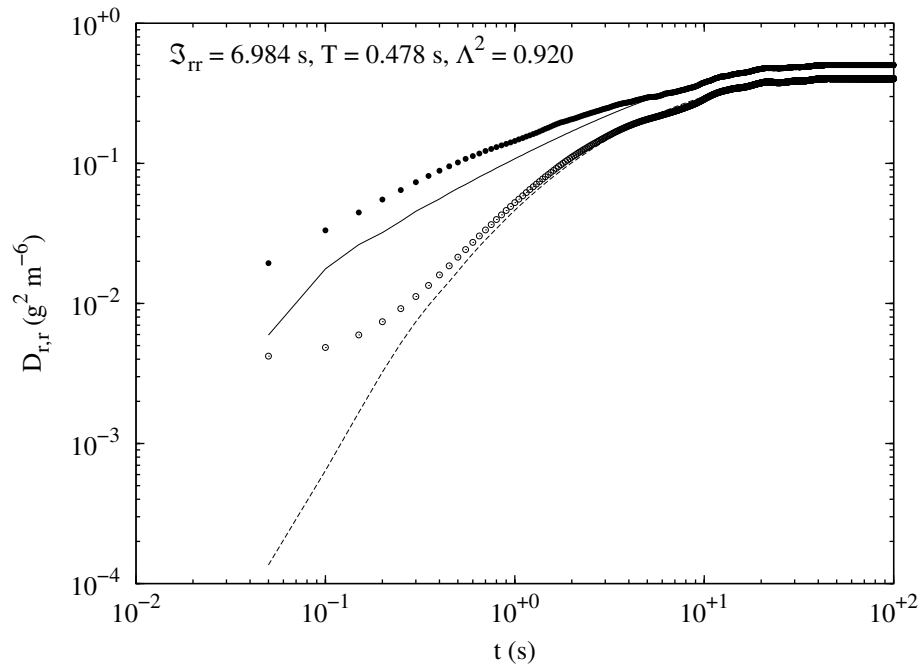


Figura 4.12: Funções estrutura $D_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 16/01/2004 15:00-15:30h.

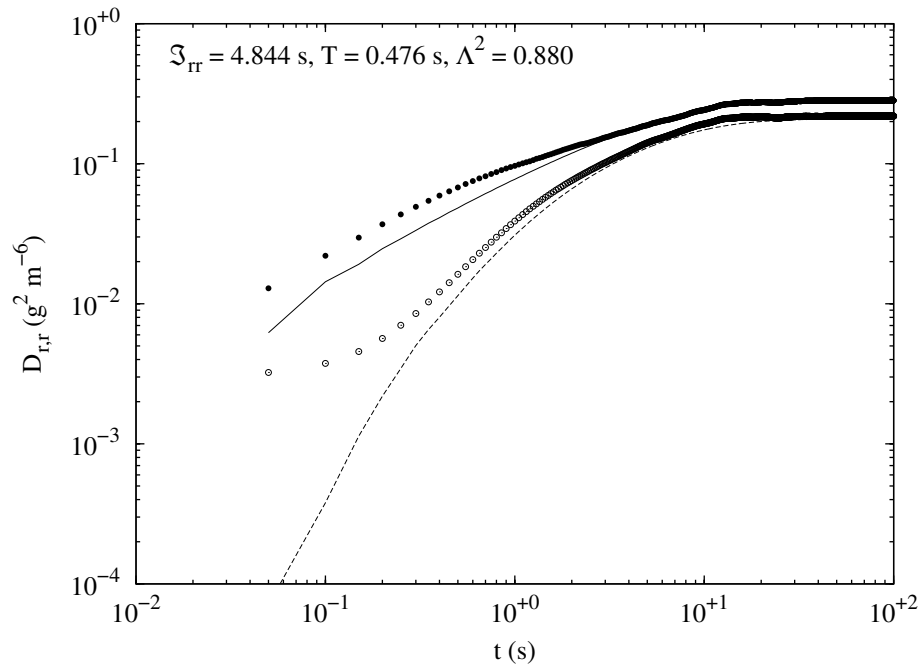


Figura 4.13: Funções estrutura $D_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 17/01/2004 09:30-10:00h.

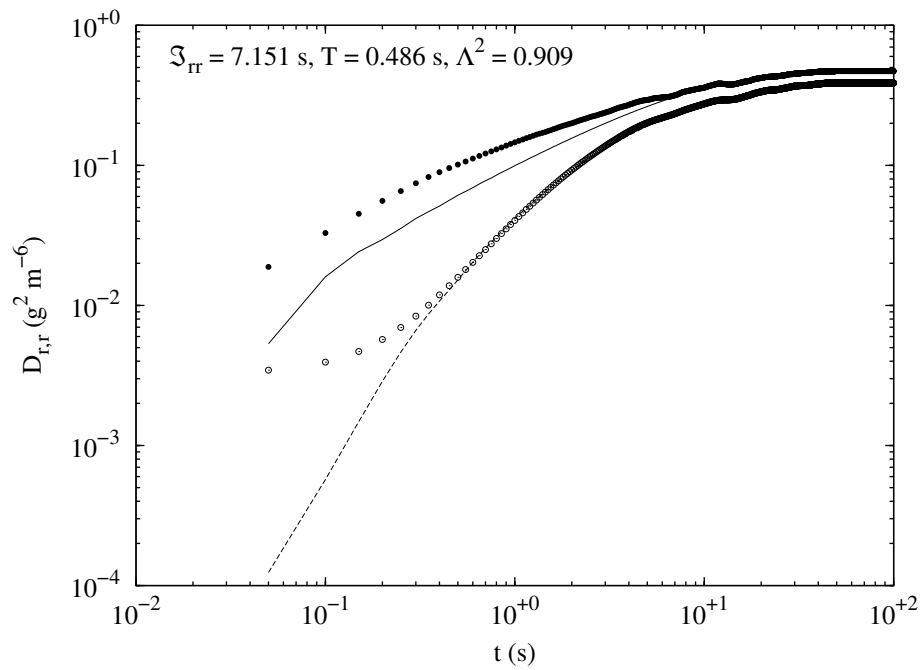


Figura 4.14: Funções estrutura $D_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 17/01/2004 15:00-15:30h.

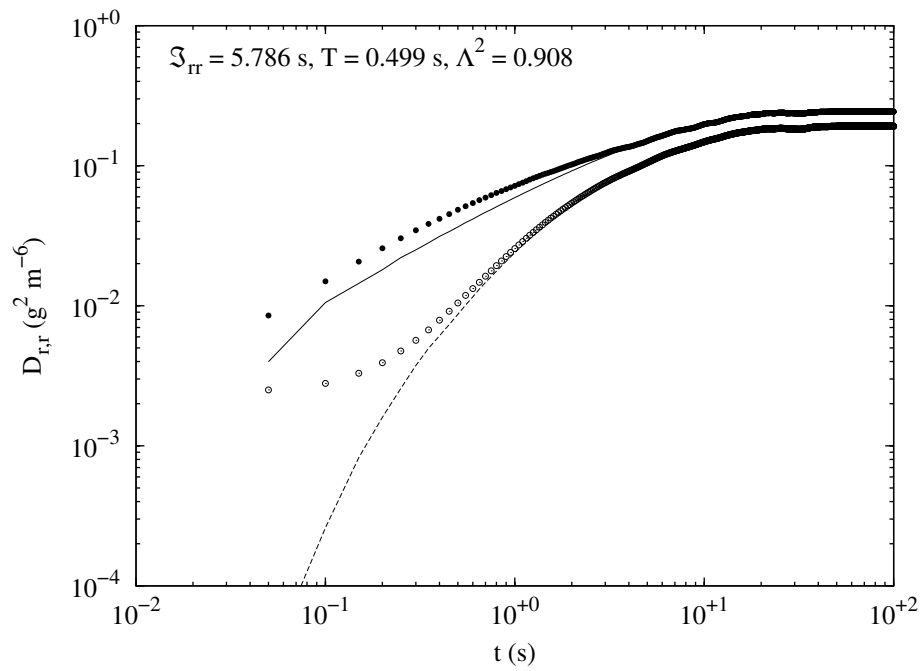


Figura 4.15: Funções estrutura $D_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 19/01/2004 10:00-10:30h.

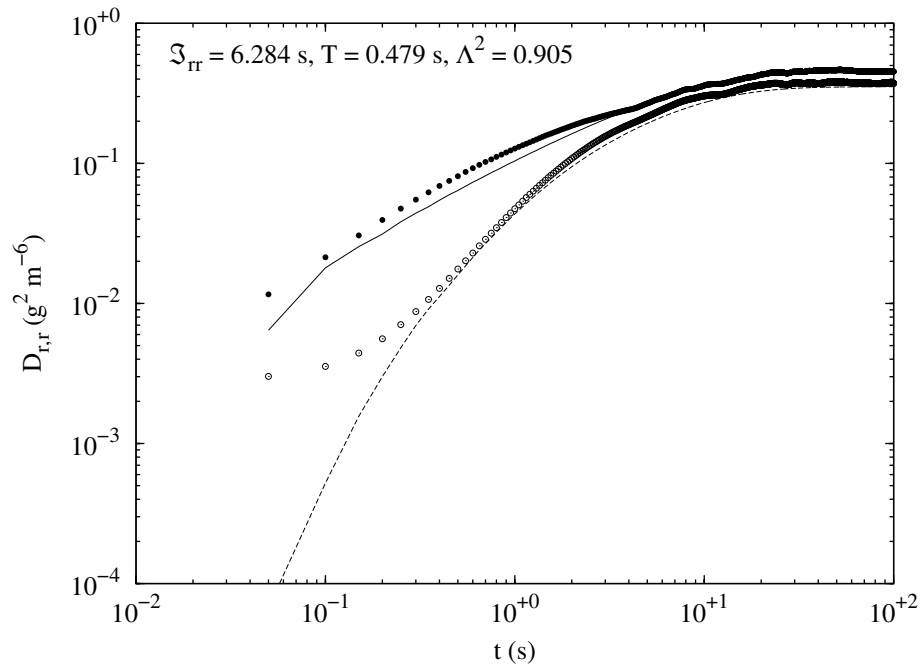


Figura 4.16: Funções estrutura $D_{r\alpha, r\alpha}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r\beta, r\beta}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-2, 19/01/2004 12:00-12:30h.

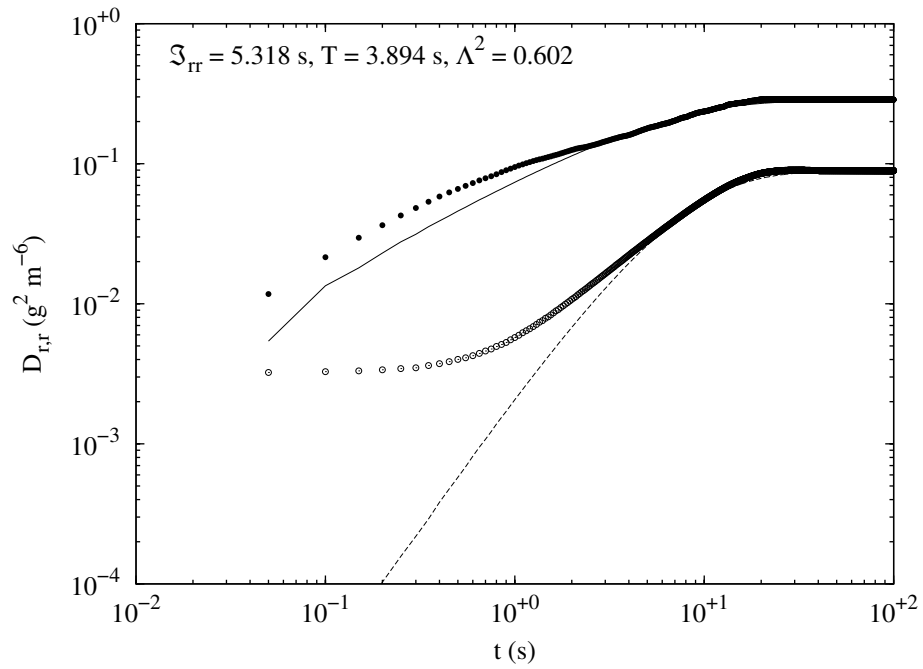


Figura 4.17: Funções estrutura $D_{r\alpha, r\alpha}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r\beta, r\beta}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 20/07/2005 12:30-13:00h.

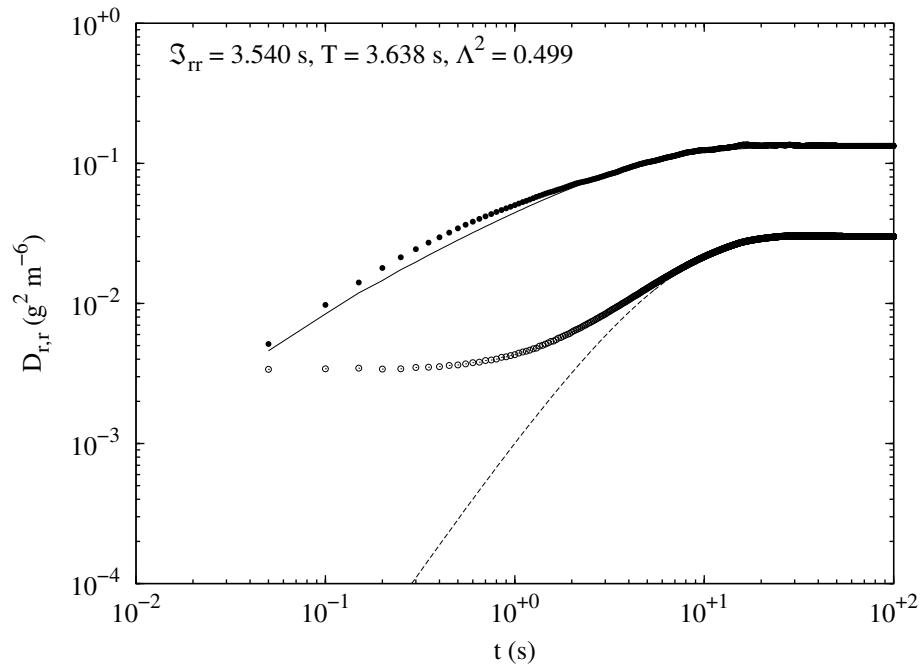


Figura 4.18: Funções estrutura $D_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 20/07/2005 19:30-20:00h.

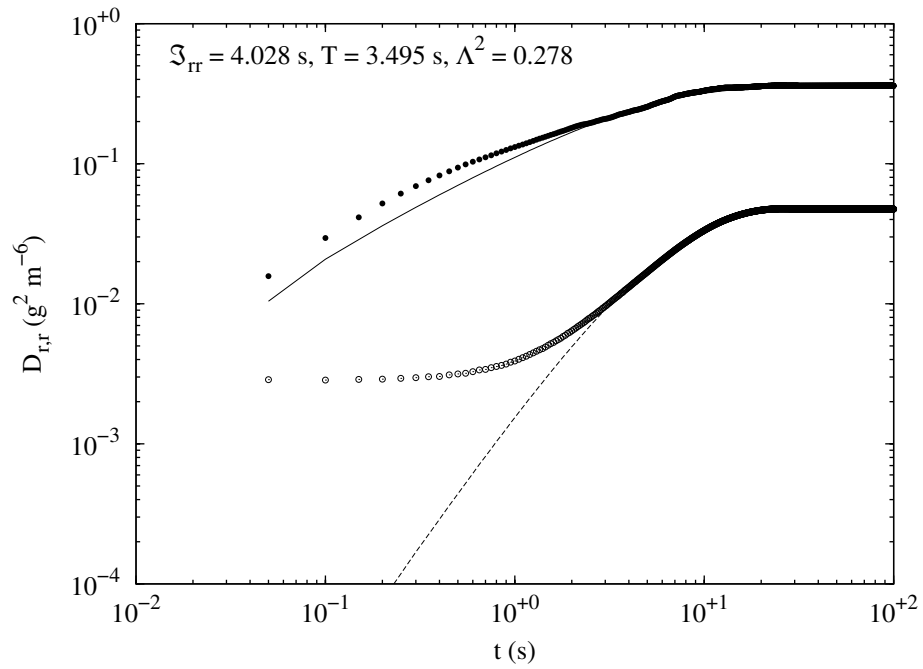


Figura 4.19: Funções estrutura $D_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 21/07/2005 04:00-04:30h.

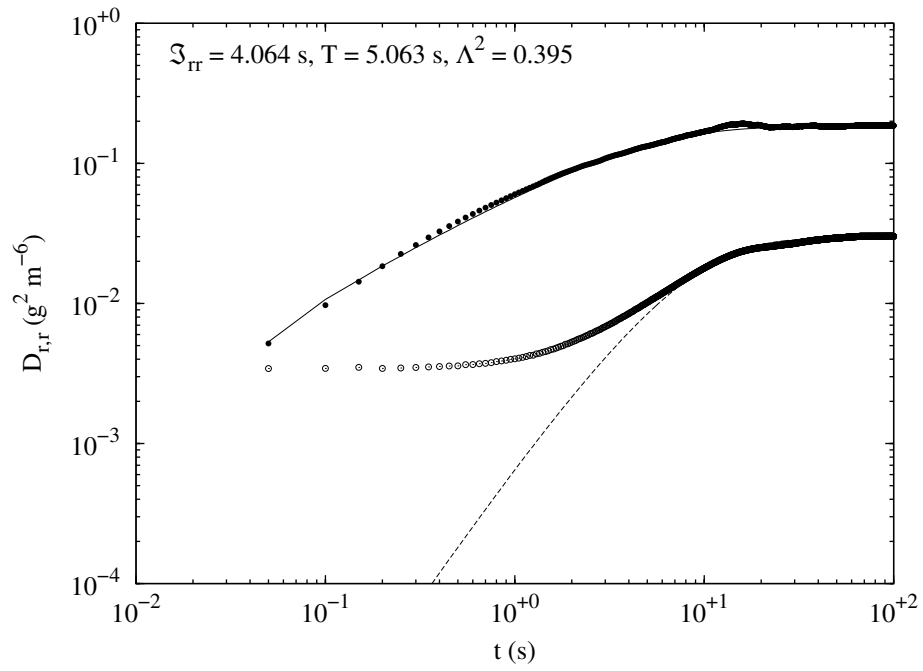


Figura 4.20: Funções estrutura $D_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 21/07/2005 20:30-21:00h.

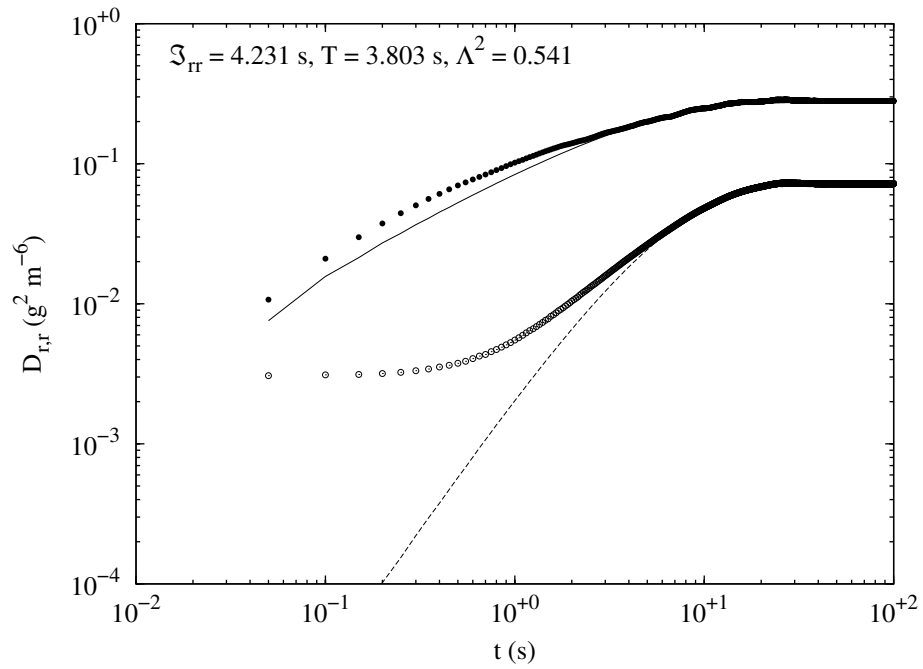


Figura 4.21: Funções estrutura $D_{r_{\alpha}, r_{\alpha}}$ (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e $D_{r_{\beta}, r_{\beta}}$ (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 25/07/2005 06:30-07:00h.

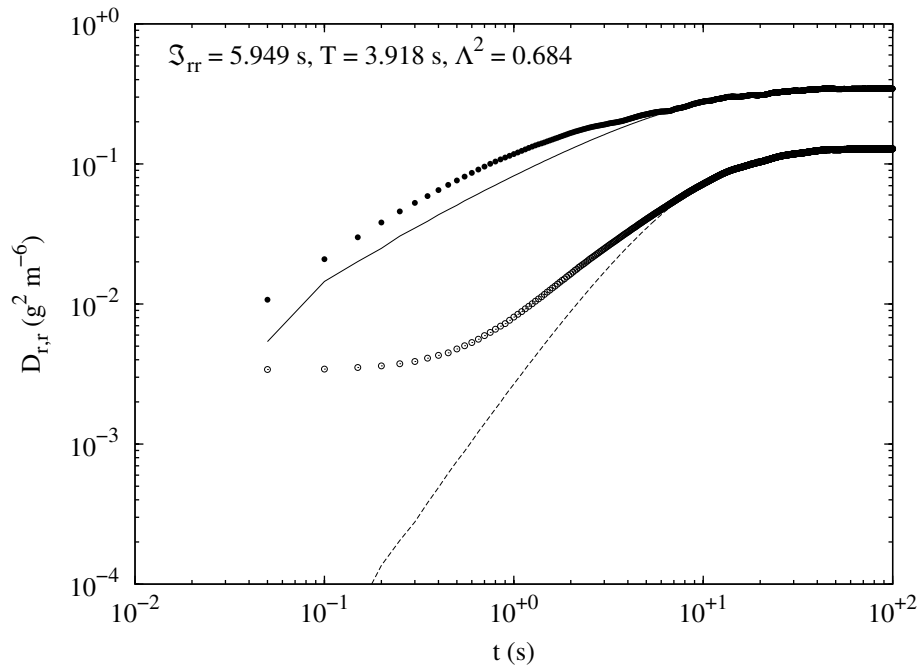


Figura 4.22: Funções estrutura D_{r_α, r_α} (amostral: círculos pintados; ajuste: linha cheia) e D_{r_β, r_β} (amostral: círculos vazios; ajuste: linha tracejada) — Exfu-4, 25/07/2005 17:30-18:00h.

riância amostral C_{r_β, r_β} obtida, para os experimentos Exfu-2 e Exfu-4. Pela figura 4.23 pode-se comprovar que o tempo de resposta não possui nenhuma dependência evidente com a temperatura, o que é muito claro no Exfu-2 (sensor capacitivo desencapado), onde a oscilação dos valores ajustados é mínima. Mesmo no Exfu-4 (sensor capacitivo encapado), que registrou uma oscilação razoável dos valores ajustados, não se consegue estabelecer nenhuma relação direta entre T e a temperatura. As médias dos tempos de resposta obtidos para os sensores encapado e desencapado foram $\bar{T} = 3,669\text{s}$ e $\bar{T} = 0,478\text{s}$ respectivamente.

A figura 4.24 comprova a dependência da temperatura no fator Λ^2 , onde pode-se identificar no mesmo um comportamento aproximadamente linear. Foram ajustadas através dos pontos experimentais as funções $\Lambda^2 = 0,0645030\bar{\Theta} - 0,707952$ e $\Lambda^2 = 0,0219711\bar{\Theta} + 0,330065$, para o sensor capacitivo encapado e desencapado respectivamente.

As figuras 4.23 e 4.24 resumem o efeito da utilização da capa protetora na resposta da sonda CS500: o tempo de resposta é aproximadamente octuplicado e o efeito da temperatura é muito mais acentuado, fato este evidenciado pelo coeficiente linear da equação ajustada para o sensor encapado ser aproximadamente três vezes maior. Em temperaturas mais baixas, *e.g.* 16°C , a

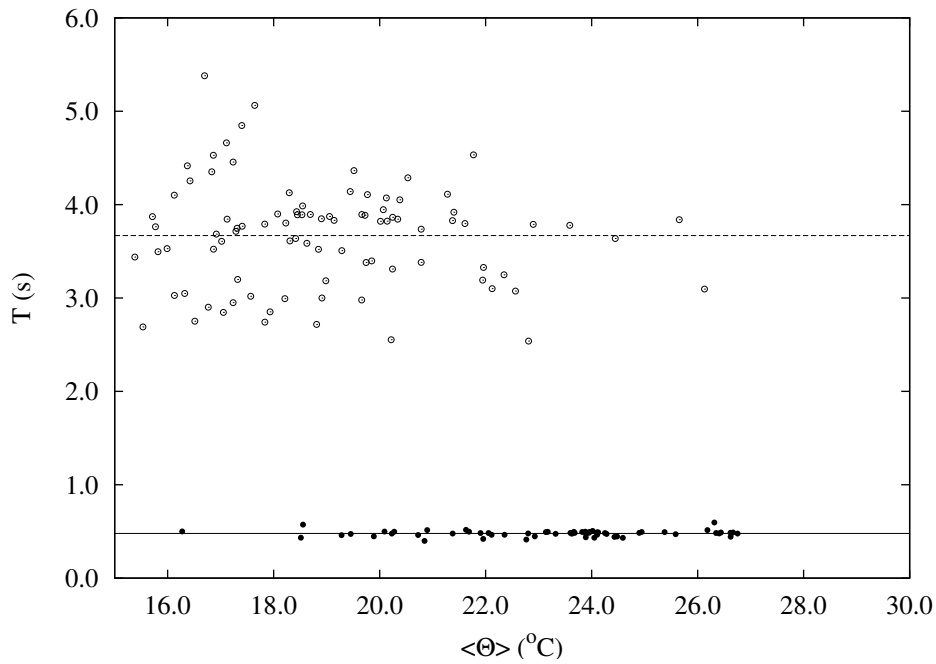


Figura 4.23: Tempo de resposta ajustado *versus* temperatura média do *run*, para os experimentos Exfu-2 (círculos pintados e linha cheia ($\bar{T} = 0,478$ s)) e Exfu-4 (círculos vazios e linha tracejada ($\bar{T} = 3,669$ s)).

atenuação na função de autocovariância C_{r_β, r_β} é de $1 - \Lambda^2 = 68\%$ para o sensor encapado e de $1 - \Lambda^2 = 32\%$ para o sensor desencapado.

Nas figuras 4.23 e 4.24 foram excluídos os *runs* cujos parâmetros ajustados resultaram em valores não realísticos (*e.g.* $\Lambda > 1$) ou alheios ao comportamento normal registrado em outros *runs*, a fim de não comprometerem a obtenção final do T médio e das relações para $\Lambda^2(\bar{\Theta})$. Foram utilizados portanto 60 *runs* para o Exfu-2 e 90 *runs* pra o Exfu-4, que passaram por esta restrição e pelas três outras impostas às funções de autocovariância, mencionadas anteriormente nesta seção.

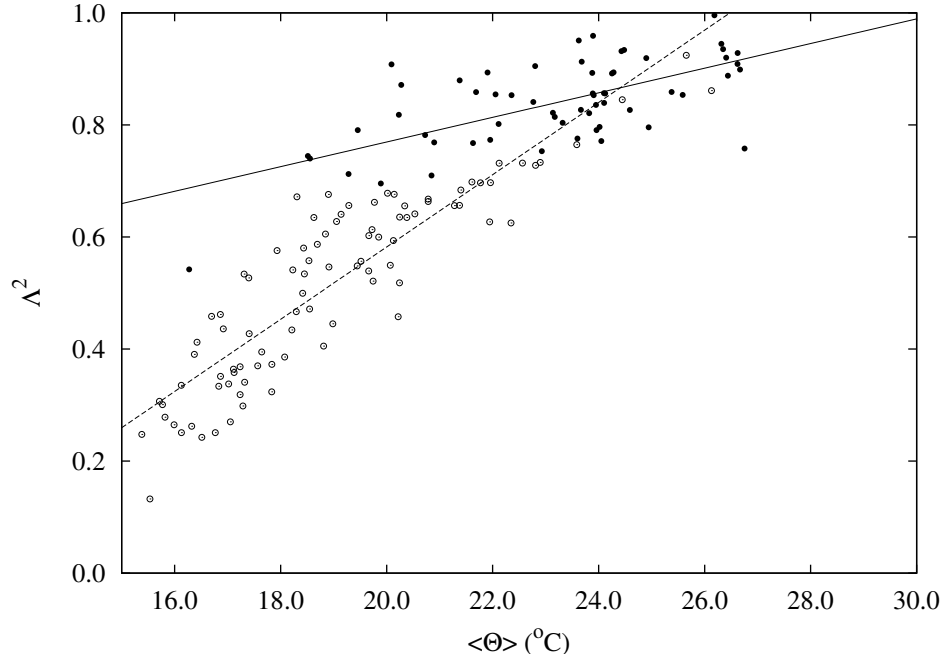


Figura 4.24: Parâmetro Λ^2 ajustado *versus* temperatura média do *run*, para os experimentos Exfu-2 (círculos pintados e linha cheia ($\Lambda^2 = 0,0219711\bar{\Theta} + 0,330065$)) e Exfu-4 (círculos vazios e linha tracejada ($\Lambda^2 = 0,0645030\bar{\Theta} - 0,707952$)).

4.3.2 Função de covariância cruzada amostral e ajuste do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ *run a run*

A função de covariância cruzada é totalmente análoga à função de autocovariância. Ao invés de medir a covariância entre uma mesma variável X nos instantes τ e $\tau + t$, a primeira mede a covariância entre uma variável X no instante τ e uma variável Y no instante $\tau + t$. A função discreta pode então ser obtida com uma pequena modificação na equação 4.20:

$$C_{x,y}(t = h\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-h} x_i y_{i+h}, \quad (4.24)$$

onde agora y_{i+h} é a flutuação da variável Y em torno da média amostral no instante $t = (i+h)\Delta t$.

Com as flutuações das variáveis W_α e R_α para o Exfu-2 e para o Exfu-4, as funções de covariância cruzada C_{w_α, r_α} foram calculadas através de (4.24) para t de 0 a 100 segundos, *run a run*. A janela de Parzen aplicada a fim de eliminar as oscilações espúrias das funções foi a mesma aplicada nas funções de autocovariância (4.22), assim como as restrições impostas aos *runs* relativas a t_0 e ao comportamento de C_{w_α, r_α} .

Uma vez obtidas as funções de covariância cruzada $C_{w\alpha, r\alpha}$ amostrais para cada *run*, a equação 3.32 foi ajustada às mesmas através do parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$. Da mesma forma que as funções de autocovariância, as integrações foram realizadas numericamente pelo método de Romberg e o ajuste através do método dos mínimos quadrados não linear de Levenberg-Marquardt. No caso das funções de covariância cruzada, a covariância $\overline{w_\alpha r_\alpha}$ medida foi empregada em 3.32.

As tabelas 4.4 e 4.5 trazem os valores obtidos para o parâmetro $\mathcal{T}_{wr}$ durante os experimentos Exfu-2 e Exfu-4 respectivamente.

Tabela 4.4: Valores ajustados via Levenberg-Marquardt para $\mathcal{T}_{wr}$ *run a run* — Exfu-2

<i>Run</i> (Exfu-2)	$\mathcal{T}_{wr}$ (s)
14/01/2004 14:30-15:00h	4,667459
14/01/2004 15:00-15:30h	3,067688
14/01/2004 15:30-16:00h	5,746416
14/01/2004 16:00-16:30h	4,252584
14/01/2004 16:30-17:00h	6,680175
14/01/2004 17:00-17:30h	11,636930
14/01/2004 17:30-18:00h	10,107388
14/01/2004 18:00-18:30h	11,342338
15/01/2004 10:00-10:30h	5,436770
15/01/2004 10:30-11:00h	6,089761
15/01/2004 11:30-12:00h	7,268275
15/01/2004 12:00-12:30h	7,156935
15/01/2004 19:30-20:00h	1,751129
15/01/2004 20:00-20:30h	1,686425
15/01/2004 20:30-21:00h	1,061300
15/01/2004 21:00-21:30h	2,347411
15/01/2004 21:30-22:00h	1,885653
15/01/2004 22:00-22:30h	1,382650
15/01/2004 22:30-23:00h	3,960469
15/01/2004 23:00-23:30h	3,596595
16/01/2004 23:30-00:00h	4,485650
16/01/2004 05:00-05:30h	2,945641
16/01/2004 06:00-06:30h	3,450352
16/01/2004 06:30-07:00h	3,603098
16/01/2004 07:00-07:30h	6,130112
16/01/2004 07:30-08:00h	2,904950
16/01/2004 08:00-08:30h	4,733931
16/01/2004 08:30-09:00h	6,193063

Continua na próxima página...

Continuação

<i>Run</i> (Exfu-2)	$\mathcal{T}_{wr}$ (s)
16/01/2004 10:00-10:30h	6,123235
16/01/2004 10:30-11:00h	8,236109
16/01/2004 11:00-11:30h	8,647947
16/01/2004 14:00-14:30h	3,990621
16/01/2004 14:30-15:00h	3,060797
16/01/2004 15:00-15:30h	4,154571
16/01/2004 15:30-16:00h	5,943531
16/01/2004 16:00-16:30h	3,121964
16/01/2004 16:30-17:00h	5,723162
16/01/2004 17:00-17:30h	5,159417
16/01/2004 17:30-18:00h	4,570689
16/01/2004 18:00-18:30h	3,403009
16/01/2004 18:30-19:00h	1,426618
16/01/2004 19:00-19:30h	2,763957
16/01/2004 19:30-20:00h	1,663547
16/01/2004 20:00-20:30h	3,147686
16/01/2004 20:30-21:00h	1,515236
16/01/2004 21:00-21:30h	2,691721
16/01/2004 21:30-22:00h	3,027853
16/01/2004 23:00-23:30h	3,050217
17/01/2004 23:30-00:00h	2,672664
17/01/2004 00:00-00:30h	3,629759
17/01/2004 00:30-01:00h	2,850090
17/01/2004 01:00-01:30h	2,168340
17/01/2004 01:30-02:00h	1,951381
17/01/2004 08:00-08:30h	2,832434
17/01/2004 08:30-09:00h	2,731533
17/01/2004 09:00-09:30h	3,438346
17/01/2004 09:30-10:00h	2,682189
17/01/2004 10:00-10:30h	5,803261
17/01/2004 10:30-11:00h	5,179971
17/01/2004 11:00-11:30h	4,024939
17/01/2004 11:30-12:00h	3,155889
17/01/2004 12:30-13:00h	3,111050
17/01/2004 13:00-13:30h	6,077473
17/01/2004 14:30-15:00h	2,952447
17/01/2004 15:00-15:30h	3,947835
17/01/2004 15:30-16:00h	5,556283
17/01/2004 16:00-16:30h	2,452034
17/01/2004 17:30-18:00h	3,727683
17/01/2004 18:00-18:30h	2,224138
17/01/2004 18:30-19:00h	2,053774

Continua na próxima página...

Continuação

<i>Run</i> (Exfu-2)	$\mathcal{T}_{wr}$ (s)
17/01/2004 19:00-19:30h	2,511532
17/01/2004 19:30-20:00h	0,968690
17/01/2004 20:00-20:30h	1,805162
17/01/2004 20:30-21:00h	2,163857
17/01/2004 21:00-21:30h	1,807972
17/01/2004 21:30-22:00h	2,876550
17/01/2004 22:00-22:30h	2,120950
17/01/2004 22:30-23:00h	3,538156
17/01/2004 23:00-23:30h	2,381665
18/01/2004 23:00-23:30h	1,984887
19/01/2004 23:30-00:00h	2,643621
19/01/2004 00:30-01:00h	1,400086
19/01/2004 07:00-07:30h	2,920622
19/01/2004 07:30-08:00h	2,760207
19/01/2004 08:30-09:00h	3,401436
19/01/2004 10:00-10:30h	3,011583
19/01/2004 11:00-11:30h	6,401802
19/01/2004 12:00-12:30h	3,266309
19/01/2004 12:30-13:00h	5,575017
19/01/2004 13:30-14:00h	3,545073
19/01/2004 14:00-14:30h	6,156040
19/01/2004 14:30-15:00h	3,697070
19/01/2004 15:00-15:30h	6,146145
19/01/2004 15:30-16:00h	4,197261
19/01/2004 16:00-16:30h	2,867616
19/01/2004 16:30-17:00h	6,221405
19/01/2004 17:00-17:30h	5,049326
19/01/2004 18:30-19:00h	1,941049
19/01/2004 19:00-19:30h	1,407817
19/01/2004 19:30-20:00h	0,967763
19/01/2004 20:00-20:30h	1,655573
19/01/2004 20:30-21:00h	2,015768
19/01/2004 21:00-21:30h	2,053314
19/01/2004 21:30-22:00h	3,169618
19/01/2004 22:00-22:30h	3,003886
19/01/2004 22:30-23:00h	5,000000
20/01/2004 03:00-03:30h	1,058373
20/01/2004 03:30-04:00h	4,511651
20/01/2004 04:00-04:30h	1,706313
20/01/2004 04:30-05:00h	1,416008
20/01/2004 05:30-06:00h	1,395403
20/01/2004 06:00-06:30h	2,186762

Continua na próxima página...

Continuação

<i>Run</i> (Exfu-2)	$\mathcal{T}_{wr}$ (s)
20/01/2004 06:30-07:00h	1,195551
20/01/2004 07:00-07:30h	1,387860
20/01/2004 07:30-08:00h	3,166763
20/01/2004 08:00-08:30h	1,805035
20/01/2004 08:30-09:00h	1,809013
20/01/2004 09:00-09:30h	2,213447
20/01/2004 09:30-10:00h	2,751534
20/01/2004 10:00-10:30h	2,662962
20/01/2004 10:30-11:00h	4,702022
20/01/2004 11:00-11:30h	5,000000
20/01/2004 11:30-12:00h	5,313303
20/01/2004 12:00-12:30h	9,749746
20/01/2004 12:30-13:00h	5,726208
20/01/2004 13:00-13:30h	8,340982
20/01/2004 13:30-14:00h	3,865987
20/01/2004 14:00-14:30h	6,425977
20/01/2004 14:30-15:00h	5,574857
20/01/2004 15:00-15:30h	5,998659
20/01/2004 15:30-16:00h	7,635858
20/01/2004 16:00-16:30h	9,528033
20/01/2004 16:30-17:00h	5,638409
20/01/2004 17:00-17:30h	4,734985
20/01/2004 17:30-18:00h	5,000000
20/01/2004 20:30-21:00h	1,886432
20/01/2004 21:00-21:30h	3,291719
20/01/2004 21:30-22:00h	6,546007
20/01/2004 22:30-23:00h	4,180179
20/01/2004 23:00-23:30h	1,891651
21/01/2004 23:30-00:00h	1,659300
21/01/2004 00:00-00:30h	2,913134
21/01/2004 02:00-02:30h	2,354845
21/01/2004 02:30-03:00h	1,959717
21/01/2004 04:00-04:30h	5,236717
21/01/2004 04:30-05:00h	2,953489
21/01/2004 07:00-07:30h	5,058610
21/01/2004 07:30-08:00h	3,074119
21/01/2004 08:00-08:30h	4,566458
21/01/2004 08:30-09:00h	6,664229
21/01/2004 09:00-09:30h	1,828795
21/01/2004 09:30-10:00h	2,557504
21/01/2004 10:00-10:30h	5,203787
21/01/2004 20:30-21:00h	5,780179

Continua na próxima página...

Continuação

<i>Run</i> (Exfu-2)	$\mathcal{T}_{wr}$ (s)
21/01/2004 21:00-21:30h	20,903118
22/01/2004 18:00-18:30h	1,585413
22/01/2004 18:30-19:00h	1,933116
22/01/2004 19:30-20:00h	5,000000
22/01/2004 20:30-21:00h	3,565542
22/01/2004 21:00-21:30h	4,089331
22/01/2004 21:30-22:00h	11,385821
22/01/2004 22:00-22:30h	5,400874
22/01/2004 22:30-23:00h	5,000000
23/01/2004 02:30-03:00h	14,637859
23/01/2004 03:00-03:30h	7,218662
23/01/2004 03:30-04:00h	11,375016
23/01/2004 04:00-04:30h	9,041488
23/01/2004 04:30-05:00h	5,000000
23/01/2004 06:30-07:00h	5,742959
23/01/2004 07:00-07:30h	8,083941
23/01/2004 08:00-08:30h	3,020986
Total: 171 <i>runs</i>	

Tabela 4.5: Valores ajustados via Levenberg-Marquardt para $\mathcal{T}_{wr}$ *run a run* — Exfu-4

<i>Run</i> (Exfu-4)	$\mathcal{T}_{wr}$ (s)
20/07/2005 11:30-12:00h	4,456456
20/07/2005 12:00-12:30h	4,184966
20/07/2005 12:30-13:00h	3,974147
20/07/2005 13:00-13:30h	4,393840
20/07/2005 13:30-14:00h	3,430927
20/07/2005 14:00-14:30h	3,292959
20/07/2005 14:30-15:00h	3,239781
20/07/2005 15:00-15:30h	4,239430
20/07/2005 16:30-17:00h	3,335081
20/07/2005 17:00-17:30h	3,695700
20/07/2005 17:30-18:00h	5,451869
20/07/2005 18:00-18:30h	2,703598
20/07/2005 19:00-19:30h	3,429744
20/07/2005 19:30-20:00h	3,368626
20/07/2005 20:00-20:30h	2,550971
20/07/2005 20:30-21:00h	3,397105
20/07/2005 21:30-22:00h	2,864058
20/07/2005 22:00-22:30h	1,744991
20/07/2005 23:00-23:30h	2,420794
21/07/2005 00:30-01:00h	2,037086

Continua na próxima página...

Continuação

<i>Run</i> (Exfu-4)	$\mathcal{T}_{wr}$ (s)
21/07/2005 02:30-03:00h	3,248690
21/07/2005 03:30-04:00h	3,528268
21/07/2005 04:00-04:30h	3,220719
21/07/2005 06:00-06:30h	7,134738
21/07/2005 06:30-07:00h	2,677734
21/07/2005 07:30-08:00h	3,584018
21/07/2005 08:00-08:30h	3,933178
21/07/2005 08:30-09:00h	3,346415
21/07/2005 09:00-09:30h	4,804657
21/07/2005 10:00-10:30h	5,239859
21/07/2005 10:30-11:00h	2,906081
21/07/2005 11:00-11:30h	3,602601
21/07/2005 11:30-12:00h	3,172118
21/07/2005 12:00-12:30h	3,673887
21/07/2005 12:30-13:00h	2,104510
21/07/2005 13:00-13:30h	2,556288
21/07/2005 15:00-15:30h	4,385015
21/07/2005 15:30-16:00h	3,154640
21/07/2005 16:00-16:30h	2,327749
21/07/2005 16:30-17:00h	1,646465
21/07/2005 17:00-17:30h	1,391038
21/07/2005 18:00-18:30h	3,442752
21/07/2005 18:30-19:00h	8,650463
22/07/2005 02:30-03:00h	3,941742
22/07/2005 03:00-03:30h	9,988752
22/07/2005 03:30-04:00h	5,000000
22/07/2005 04:00-04:30h	6,069992
22/07/2005 06:00-06:30h	5,229081
22/07/2005 06:30-07:00h	7,584643
22/07/2005 07:00-07:30h	2,988533
22/07/2005 07:30-08:00h	3,642381
22/07/2005 10:30-11:00h	4,879181
22/07/2005 19:00-19:30h	3,853722
22/07/2005 22:00-22:30h	7,527362
22/07/2005 22:30-23:00h	8,286272
23/07/2005 06:00-06:30h	6,968493
23/07/2005 06:30-07:00h	6,149945
23/07/2005 07:00-07:30h	4,077316
23/07/2005 07:30-08:00h	3,429602
23/07/2005 13:30-14:00h	4,089085
23/07/2005 14:00-14:30h	2,933085
23/07/2005 14:30-15:00h	1,718420

Continua na próxima página...

Continuação

<i>Run</i> (Exfu-4)	$\mathcal{T}_{wr}$ (s)
23/07/2005 15:00-15:30h	4,052999
23/07/2005 15:30-16:00h	2,889841
24/07/2005 00:30-01:00h	7,252930
24/07/2005 01:00-01:30h	4,675010
24/07/2005 02:30-03:00h	4,273870
24/07/2005 03:30-04:00h	2,756119
24/07/2005 04:00-04:30h	2,923127
24/07/2005 05:00-05:30h	3,575462
24/07/2005 05:30-06:00h	3,853221
24/07/2005 06:00-06:30h	3,861917
24/07/2005 06:30-07:00h	5,548243
24/07/2005 07:30-08:00h	3,807350
24/07/2005 08:00-08:30h	3,360949
24/07/2005 08:30-09:00h	3,727440
24/07/2005 09:00-09:30h	4,358110
24/07/2005 10:30-11:00h	2,703413
24/07/2005 11:00-11:30h	3,149284
24/07/2005 11:30-12:00h	2,344985
24/07/2005 12:00-12:30h	1,447040
24/07/2005 12:30-13:00h	2,205536
24/07/2005 13:00-13:30h	2,628850
24/07/2005 13:30-14:00h	1,953662
24/07/2005 14:30-15:00h	1,915648
24/07/2005 15:00-15:30h	1,478990
24/07/2005 15:30-16:00h	3,455287
24/07/2005 16:00-16:30h	4,025821
24/07/2005 16:30-17:00h	4,128741
25/07/2005 00:30-01:00h	3,785104
25/07/2005 01:00-01:30h	6,930903
25/07/2005 01:30-02:00h	3,839711
25/07/2005 02:00-02:30h	2,423737
25/07/2005 02:30-03:00h	4,686513
25/07/2005 03:00-03:30h	6,578496
25/07/2005 04:30-05:00h	4,678885
25/07/2005 05:30-06:00h	6,282091
25/07/2005 06:00-06:30h	6,915174
25/07/2005 07:00-07:30h	6,280098
25/07/2005 07:30-08:00h	5,000000
25/07/2005 08:00-08:30h	3,137025
25/07/2005 08:30-09:00h	2,520387
25/07/2005 10:00-10:30h	3,407492
25/07/2005 10:30-11:00h	3,642556

Continua na próxima página...

Continuação

<i>Run (Exfu-4)</i>	$\mathcal{T}_{wr}$ (s)
25/07/2005 12:00-12:30h	4,331227
25/07/2005 16:30-17:00h	3,152620
25/07/2005 17:00-17:30h	5,276505
25/07/2005 17:30-18:00h	3,475875
25/07/2005 18:30-19:00h	1,668371
25/07/2005 19:00-19:30h	3,068146
25/07/2005 19:30-20:00h	2,868715
25/07/2005 20:00-20:30h	5,413066
25/07/2005 20:30-21:00h	8,707662
25/07/2005 21:00-21:30h	4,018099
25/07/2005 21:30-22:00h	7,364448
25/07/2005 22:00-22:30h	5,169802
25/07/2005 22:30-23:00h	4,236247
25/07/2005 23:00-23:30h	4,678419
26/07/2005 23:30-00:00h	4,417495
26/07/2005 00:00-00:30h	5,135699
26/07/2005 00:30-01:00h	3,849716
26/07/2005 01:00-01:30h	4,143294
26/07/2005 01:30-02:00h	3,106084
26/07/2005 02:30-03:00h	2,765616
26/07/2005 03:00-03:30h	5,842008
26/07/2005 03:30-04:00h	5,362446
26/07/2005 04:00-04:30h	3,238436
26/07/2005 04:30-05:00h	4,338593
26/07/2005 05:00-05:30h	4,227796
26/07/2005 05:30-06:00h	5,113439
26/07/2005 06:00-06:30h	5,529974
26/07/2005 06:30-07:00h	5,794994
26/07/2005 07:00-07:30h	5,282370
26/07/2005 07:30-08:00h	6,435751
26/07/2005 08:00-08:30h	6,583891
26/07/2005 08:30-09:00h	8,320311
26/07/2005 13:00-13:30h	6,252729
26/07/2005 13:30-14:00h	4,265504
26/07/2005 14:00-14:30h	6,167893
26/07/2005 14:30-15:00h	5,126134
26/07/2005 19:30-20:00h	6,460432
26/07/2005 20:30-21:00h	10,397713
26/07/2005 21:00-21:30h	7,457880
26/07/2005 21:30-22:00h	5,569267
26/07/2005 22:00-22:30h	3,741457
26/07/2005 22:30-23:00h	5,106078

Continua na próxima página...

<i>Continuação</i>	
<i>Run</i> (Exfu-4)	$\mathcal{T}_{wr}$ (s)
26/07/2005 23:00-23:30h	2,873699
27/07/2005 23:30-00:00h	2,517816
27/07/2005 01:00-01:30h	3,450553
27/07/2005 02:30-03:00h	1,977947
27/07/2005 05:30-06:00h	4,301919
27/07/2005 07:30-08:00h	4,072133
27/07/2005 08:00-08:30h	5,343086
27/07/2005 10:00-10:30h	3,398370
27/07/2005 10:30-11:00h	2,977938
27/07/2005 11:00-11:30h	4,904413
27/07/2005 11:30-12:00h	4,001276
27/07/2005 12:00-12:30h	2,877138
27/07/2005 12:30-13:00h	3,043723
27/07/2005 13:00-13:30h	5,175457
27/07/2005 13:30-14:00h	1,689716
27/07/2005 14:00-14:30h	0,887891
27/07/2005 14:30-15:00h	1,406154
27/07/2005 15:00-15:30h	0,934909
Total: 164 <i>runs</i>	

As figuras de 4.25 a 4.36 trazem a título de ilustração uma seleção de *runs* com as funções estrutura $D_{w\alpha, r\alpha}$ amostral e ajustada (obtidas através de $C_{w\alpha, r\alpha}$), para o Exfu-2 (figuras de 4.25 a 4.30) e para o Exfu-4 (figuras de 4.31 a 4.36). Pode-se notar um descolamento entre as funções amostrais e ajustadas para $t \lesssim 3$ s, de forma semelhante às funções estrutura $D_{r\alpha, r\alpha}$, apesar das diferenças no primeiro caso serem mais acentuadas devido à utilização de mais uma variável (velocidade vertical do vento). É importante lembrar que as diferenças são magnificadas com a escala log-log.

Analisando os valores obtidos para $\mathcal{T}_{wr}$ em função da variável de estabilidade de Monin-Obukhov ζ , nenhuma relação clara foi encontrada, tanto para o experimento Exfu-2 quanto para o Exfu-4, o que não foi uma surpresa, dado que a maioria dos *runs* utilizados eram instáveis (a tabela 4.6 relaciona o número de *runs* utilizados e a pequena quantidade de *runs* estáveis associados) e que a Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov, nestas condições, falha na previsão para o co-espectro entre W e R (utilizado para o ajuste de $\mathcal{T}_{wr}$) (MOORE, 1986).

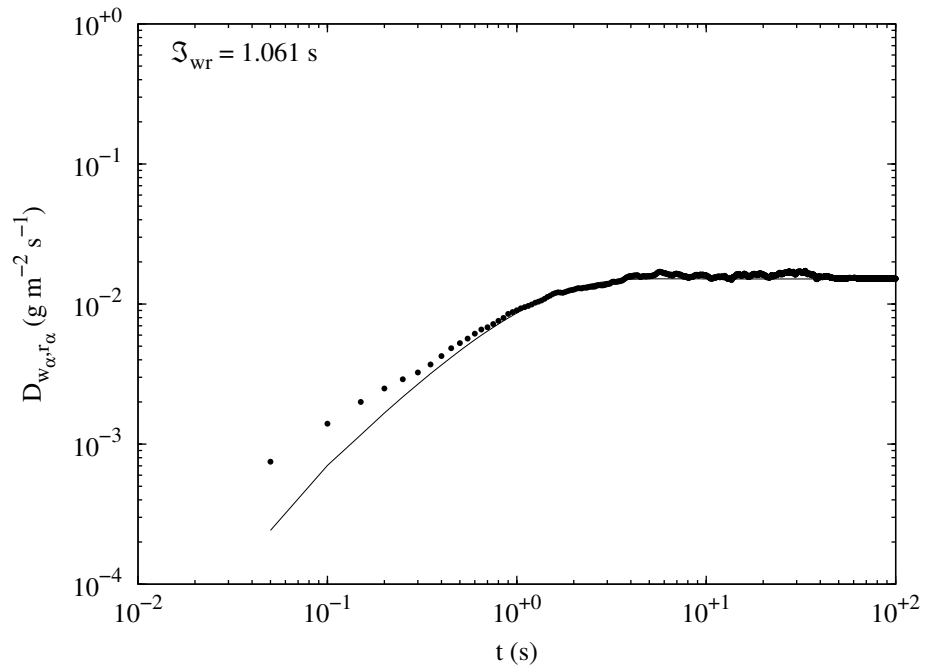


Figura 4.25: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{S}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 15/01/2004 20:30-21:00h.

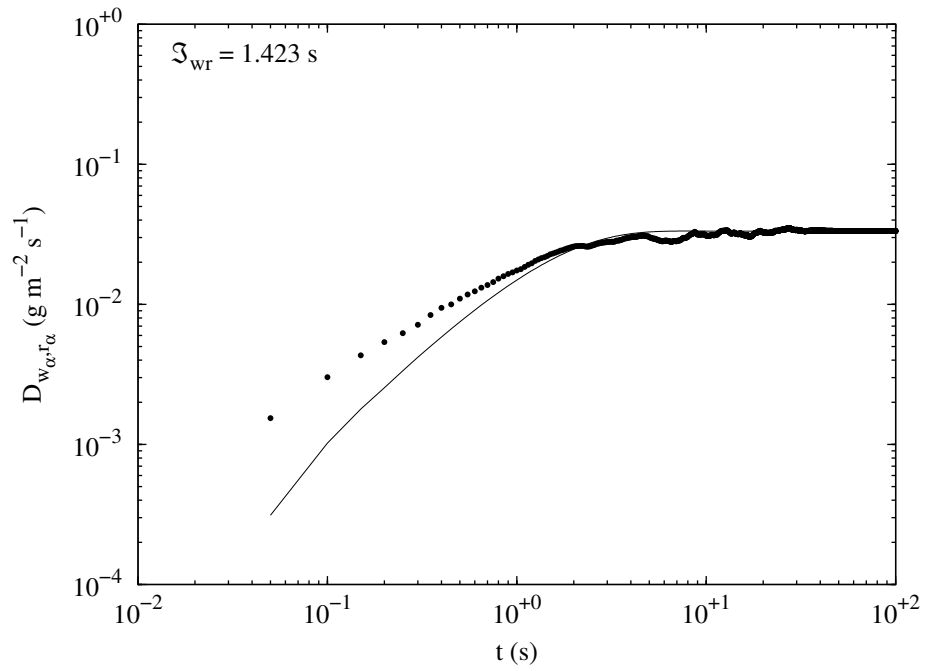


Figura 4.26: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{S}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 16/01/2004 18:30-19:00h.

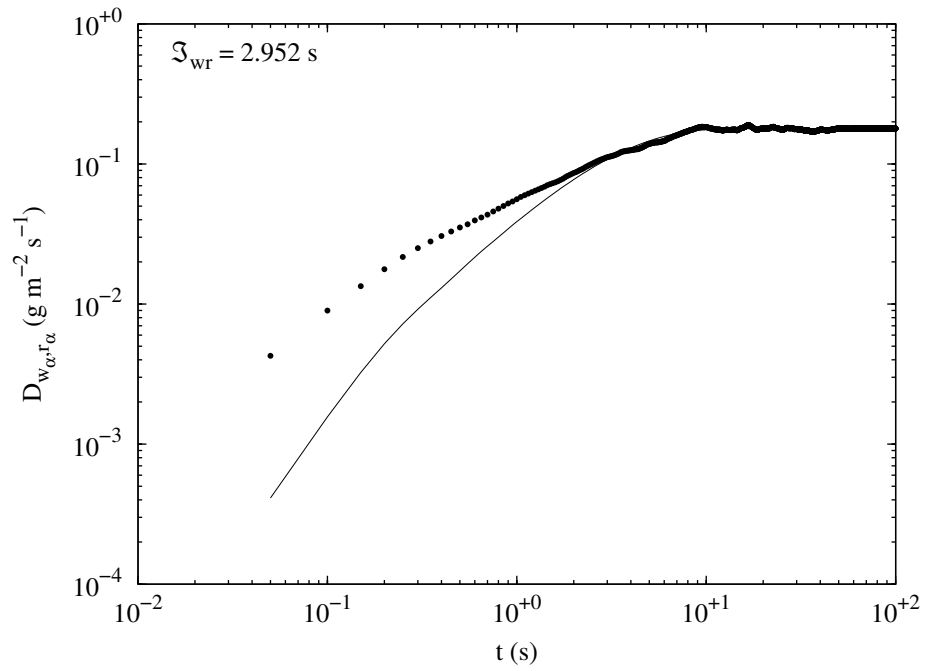


Figura 4.27: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{S}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 17/01/2004 14:30-15:00h.

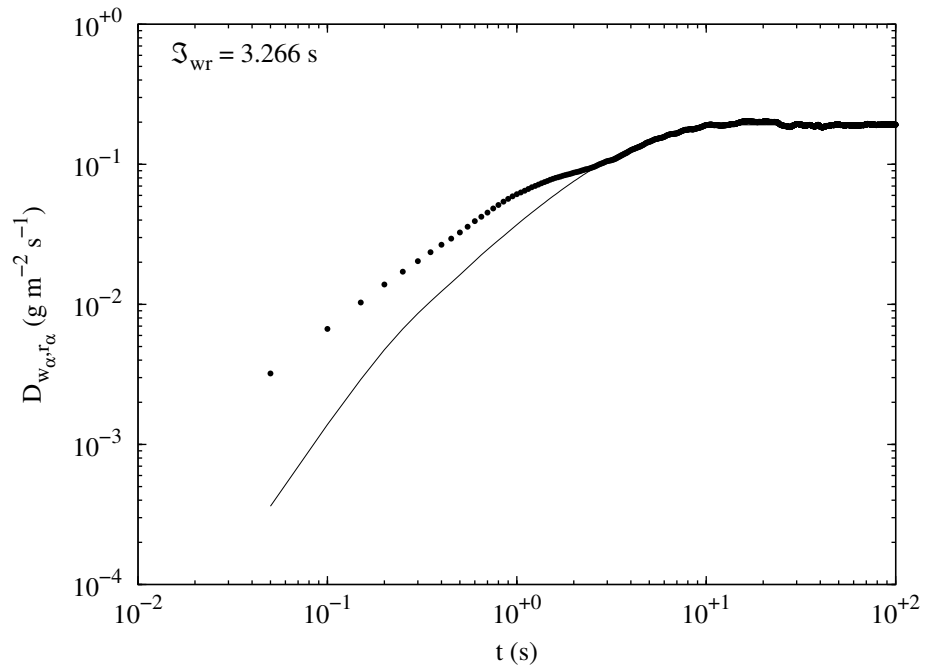


Figura 4.28: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{S}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 19/01/2004 12:00-12:30h.

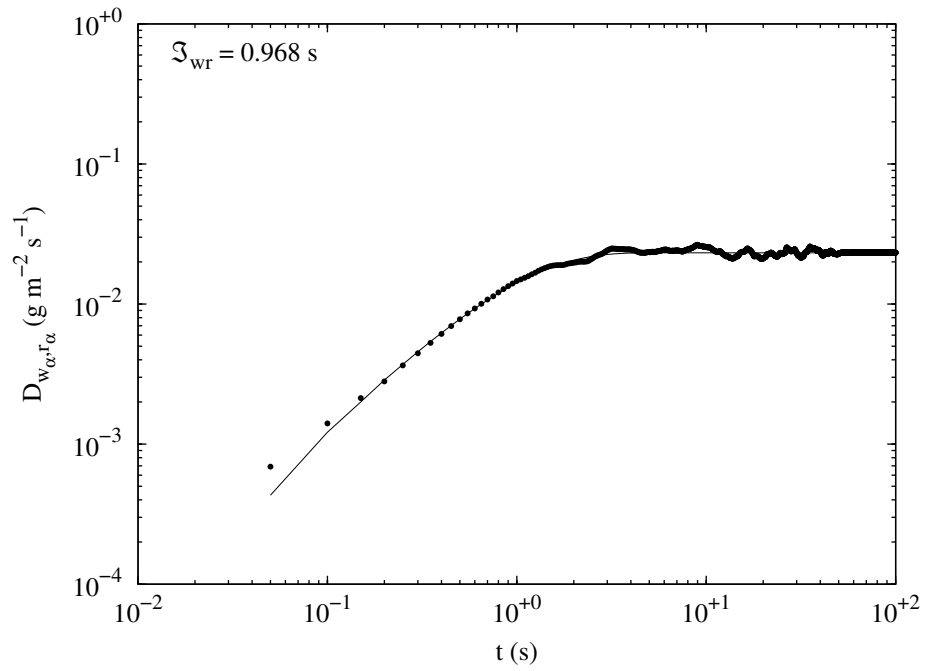


Figura 4.29: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{S}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 19/01/2004 19:30-20:00h.

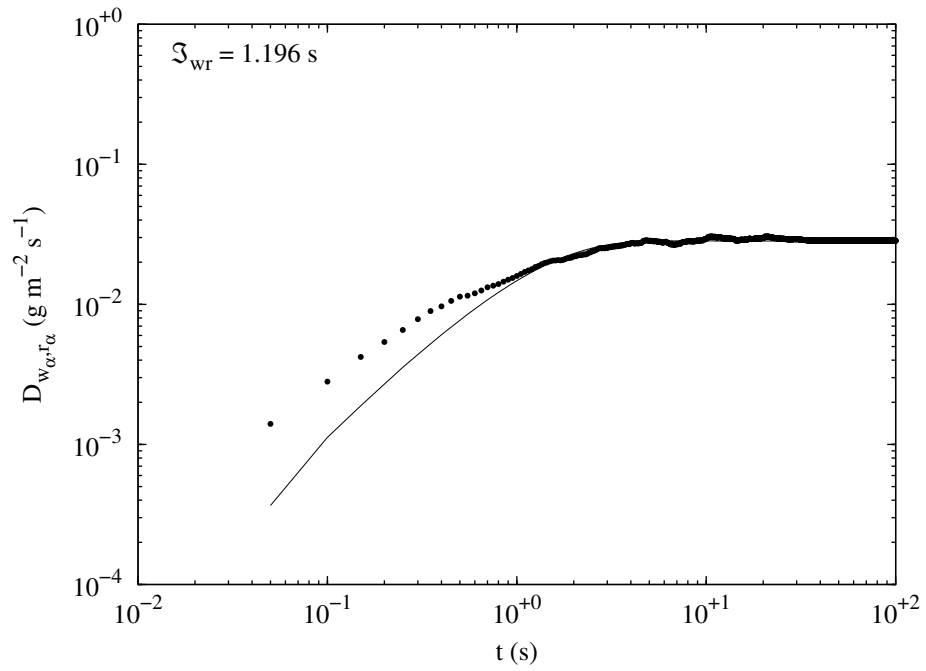


Figura 4.30: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{S}_{wr}$ (linha) — Exfu-2, 20/01/2004 06:30-07:00h.

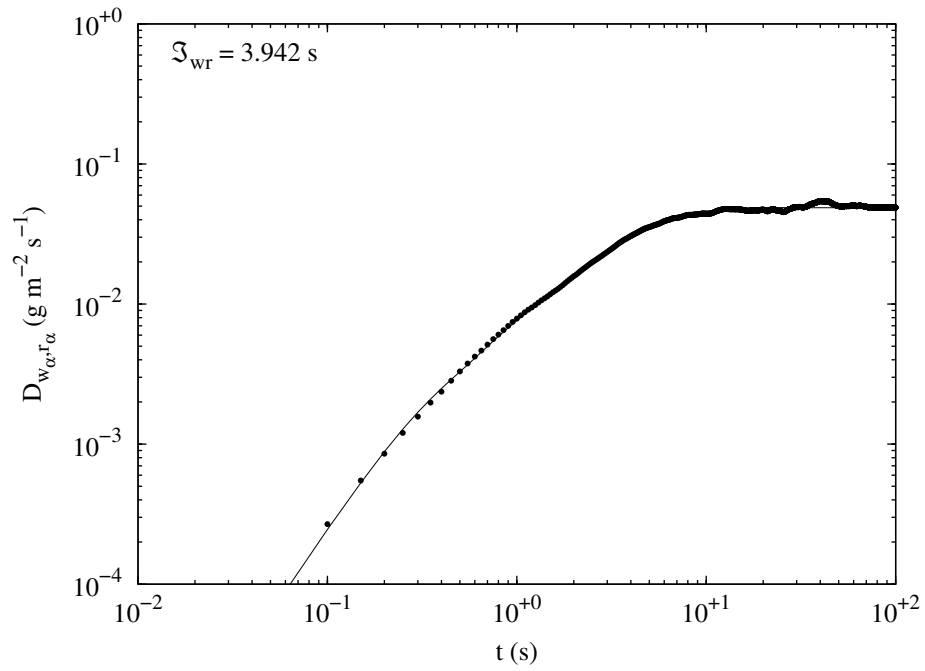


Figura 4.31: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{S}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 22/07/2005 02:30-03:00h.

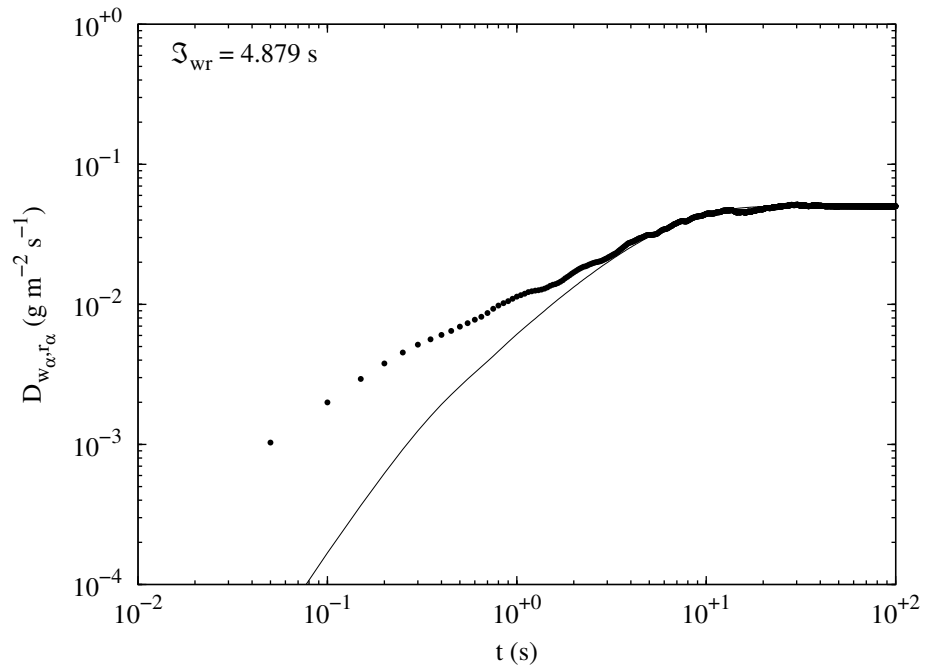


Figura 4.32: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{S}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 22/07/2005 10:30-11:00h.

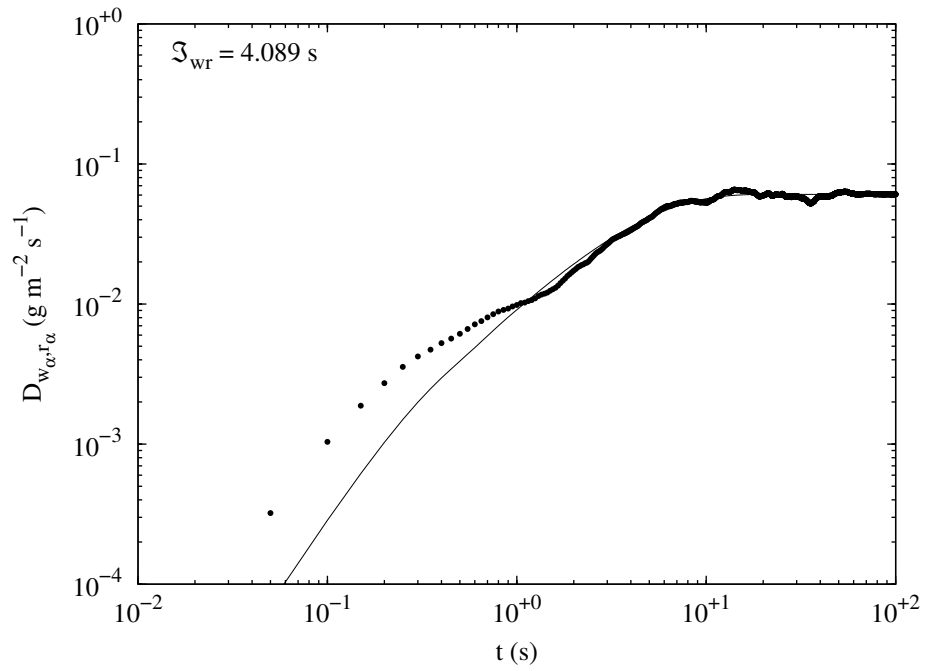


Figura 4.33: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{S}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 23/07/2005 13:30-14:00h.

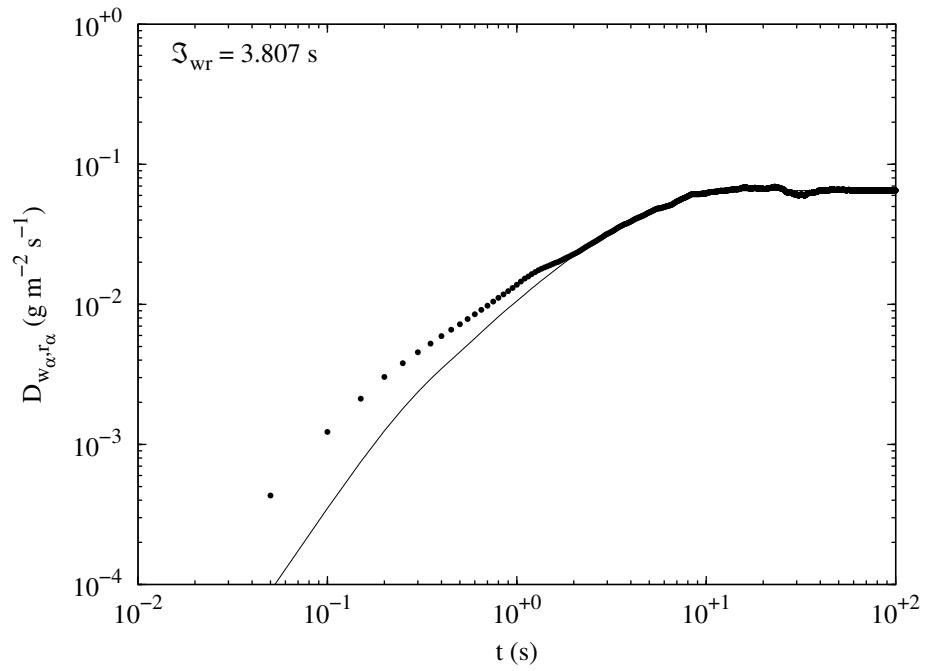


Figura 4.34: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{S}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 24/07/2005 07:30-08:00h.

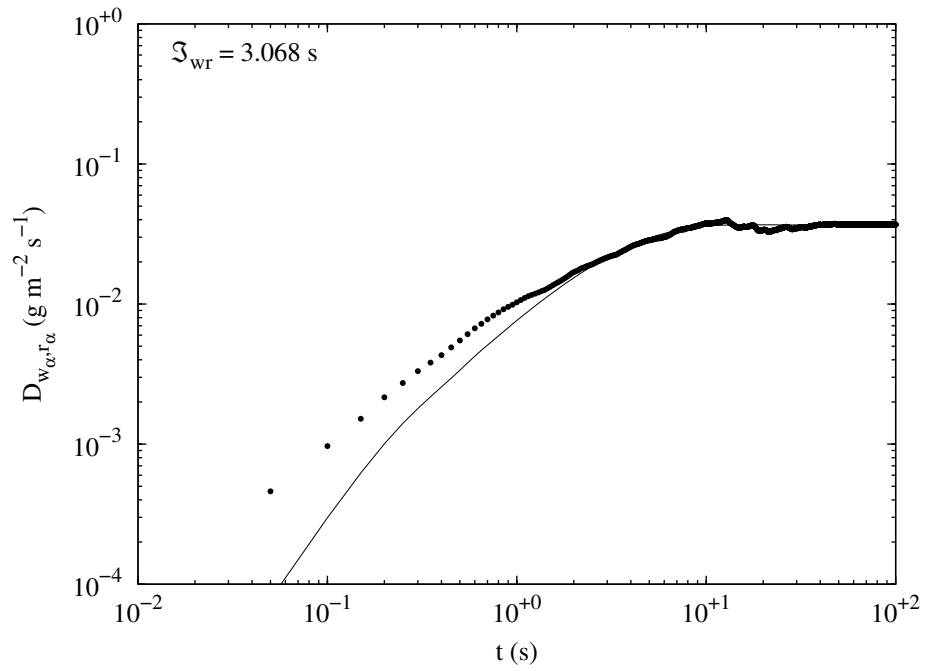


Figura 4.35: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 25/07/2005 19:00-19:30h.

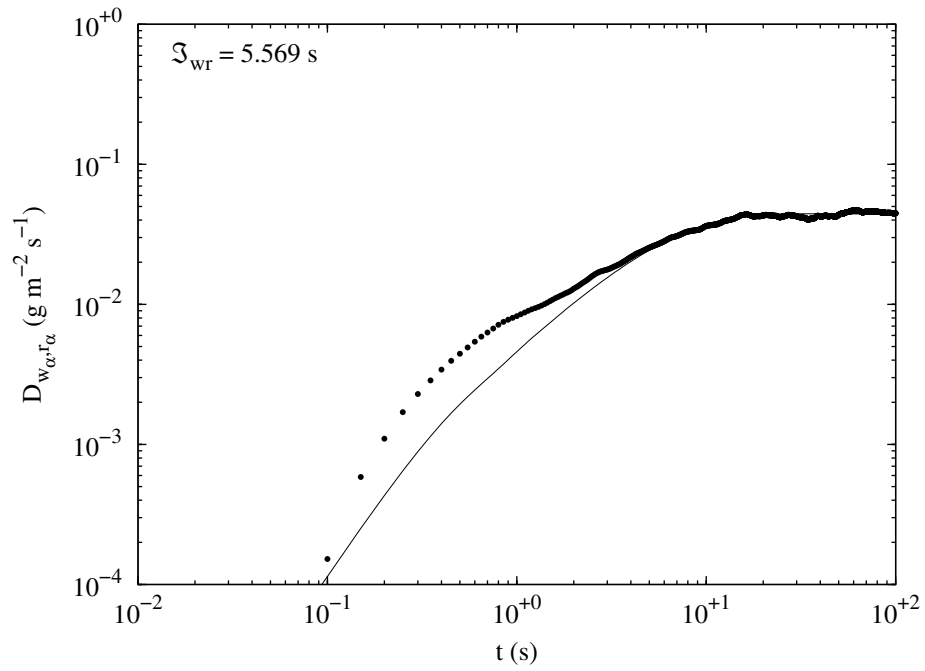


Figura 4.36: Função estrutura $D_{w_{\alpha}, r_{\alpha}}$ amostral (pontos) e ajustada através do parâmetro $\mathfrak{T}_{wr}$ (linha) — Exfu-4, 26/07/2005 21:30-22:00h.

Por outro lado, analisando $\mathcal{T}_{wr}$ em função de $\bar{U}_h/z$, uma relação pôde ser detectada. Por este motivo decidiu-se supor que $\mathcal{T}_{wr}^*(\zeta) = C$ (constante), equação que ainda pode ser reescrita como $\mathcal{T}_{wr} = Cz/\bar{U}_h$.

Para cada experimento os pontos $\mathcal{T}_{wr}$ versus $\bar{U}_h/z$ obtidos foram utilizados para o ajuste do valor da constante, via mínimos quadrados não linear (veja figura 4.37). Para o Exfu-2 foi obtido $\mathcal{T}_{wr}^* = 2,25$; já para o Exfu-4, o valor obtido foi de $\mathcal{T}_{wr}^* = 1,83$. De forma semelhante ao ajuste final de T e $\Lambda(\bar{\Theta})$, foram excluídos os *runs* que resultaram em valores anômalos para $\mathcal{T}_{wr}$, a fim de não comprometerem o ajuste de $\mathcal{T}_{wr}^*$. Foram utilizados, portanto, 171 *runs* para o Exfu-2 e 164 *runs* para o Exfu-4, que passaram por esta e pelas restrições referentes a t_0 e ao comportamento de $C_{w\alpha, r\alpha}$ (note que a quantidade de *runs* foi superior à utilizada para a calibração de T e Λ).

Uma vez que para dois experimentos diferentes, realizados em superfícies completamente distintas, os valores ajustados para $\mathcal{T}_{wr}^*$ foram muito semelhantes, decidiu-se pela utilização da média aritmética entre ambos no decorrer deste trabalho ($\mathcal{T}_{wr}^* = 2,04$). Com a obtenção deste último parâmetro foi determinada totalmente a função K , deixando-a pronta para ser testada na correção dos fluxos.

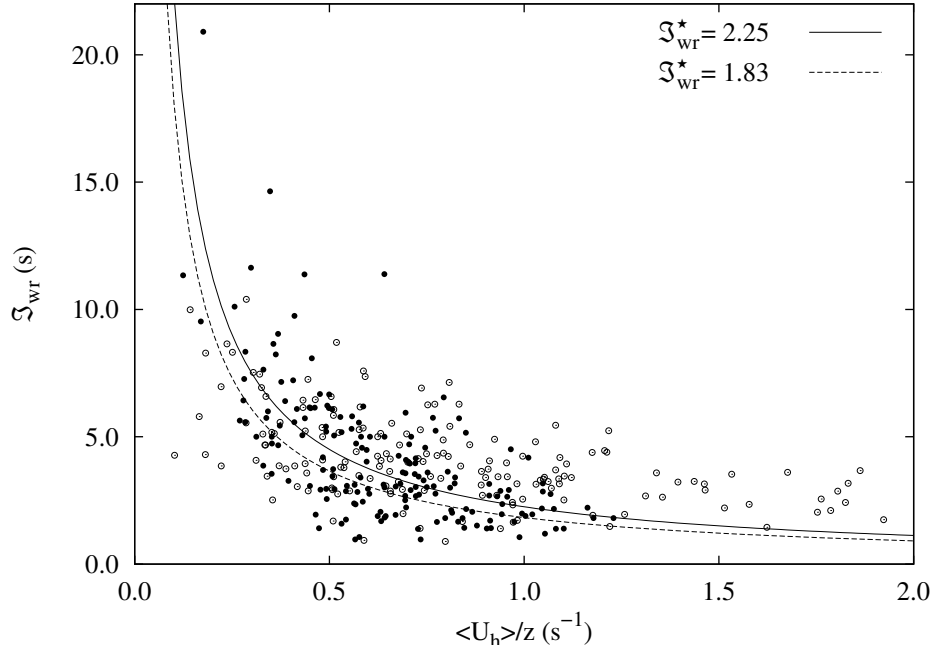


Figura 4.37: Escala integral $\mathcal{S}_{wr}$ em função da velocidade média horizontal do vento dividida pela altura de medição, para os experimentos Exfu-2 (círculos pintados e linha cheia (ajuste)) e Exfu-4 (círculos vazios e linha tracejada (ajuste)).

4.3.3 Equações e parâmetros finais

O resumo dos principais resultados obtidos neste trabalho é dado pelas equações 4.25, 4.26 e 4.27:

$$\begin{aligned}
 K^{-1} = & \frac{\Lambda(\bar{\Theta})}{1 + 0,000282506T^{*14}} \left[1 + 0,00259663T^{*32/3} + 0,0175576T^{*25/3} \right. \\
 & - 0,267582T^{*11/3} - 0,603103T^{*4/3} + 0,388028T^{*2} \\
 & + 0,217574T^{*4} - 0,0127351T^{*6} - 0,0210676T^{*8} \\
 & - 0,00363814T^{*10} - 0,000907871T^{*12} + 0,000576030T^{*13} \\
 & \left. - 0,0218178T^{*6} \ln(1/T^*) \right] \quad (4.25)
 \end{aligned}$$

$$\Lambda^2(\bar{\Theta}) = \begin{cases} 0,0219711\bar{\Theta} + 0,330065 & \text{Sensor desencapado} \\ 0,0645030\bar{\Theta} - 0,707952 & \text{Sensor encapado} \end{cases} \quad (4.26)$$

$$T = \begin{cases} 0,478 \text{ s} & \text{Sensor desencapado} \\ 3,669 \text{ s} & \text{Sensor encapado} \end{cases} \quad (4.27)$$

A equação 4.25 traz o fator de correção K com os valores de $\alpha_{wr} = 0,879186$ e $\mathcal{T}_{wr}^* = 2,04$ implícitos. Vale lembrar que $\bar{\Theta}$ deve estar em $^{\circ}\text{C}$ na equação 4.26. A figura 4.38 traz para o sensor desencapado a função K calculada para uma malha de 37500 pontos (superfície- K), abrangendo os intervalos $\Theta[15 - 30^{\circ}\text{C}]$ e $\bar{U}_h/z[0 - 2,5\text{s}^{-1}]$ com passos de $0,1^{\circ}\text{C}$ e $0,01\text{s}^{-1}$, enquanto a figura 4.39 traz os contornos associados à tal superfície, a fim de facilitar a visualização do comportamento do fator de correção. As figuras 4.40 e 4.41 repetem o mesmo procedimento para o sensor encapado.

Note que para uma altura de medição fixa, os maiores valores de K correspondem a condições de vento mais intenso e de temperatura do ar mais baixa. Note ainda a grande diferença na magnitude do fator K para o sensor capacitivo encapado e desencapado. No primeiro caso a média dos pontos da malha é $\bar{K} = 3,87$, já no segundo caso a média é $\bar{K} = 1,36$.

No caso da figura 4.40, pode-se notar que a malha segue um comportamento constante para as temperaturas mais elevadas, para coordenadas de $\bar{U}_h/z$ fixas, o que fica bem claro nos contornos ilustrados na figura 4.41. Este fato se deve à função $\Lambda^2(\bar{\Theta})$, que foi truncada para temperaturas médias maiores que $26,48^{\circ}\text{C}$ a fim de evitar correções não realísticas ($\Lambda^2(\bar{\Theta}) > 1$).

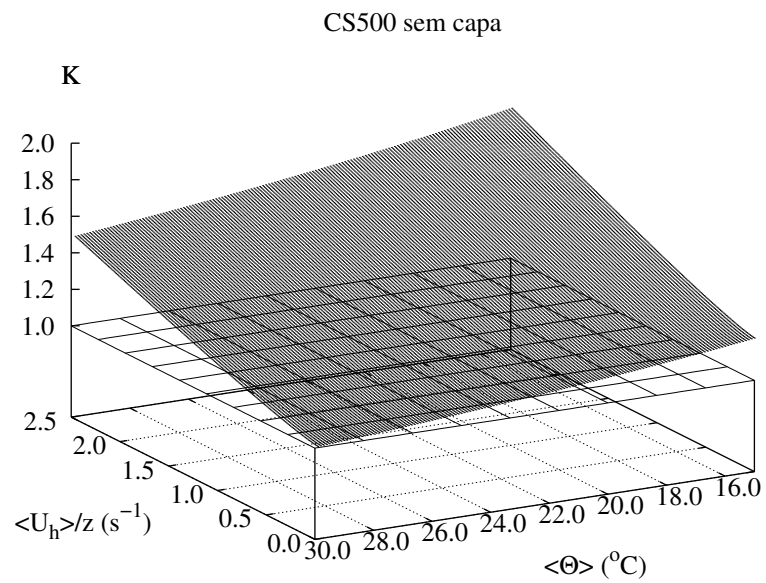


Figura 4.38: Superfície- K para a sonda CS500 *desencapada*.

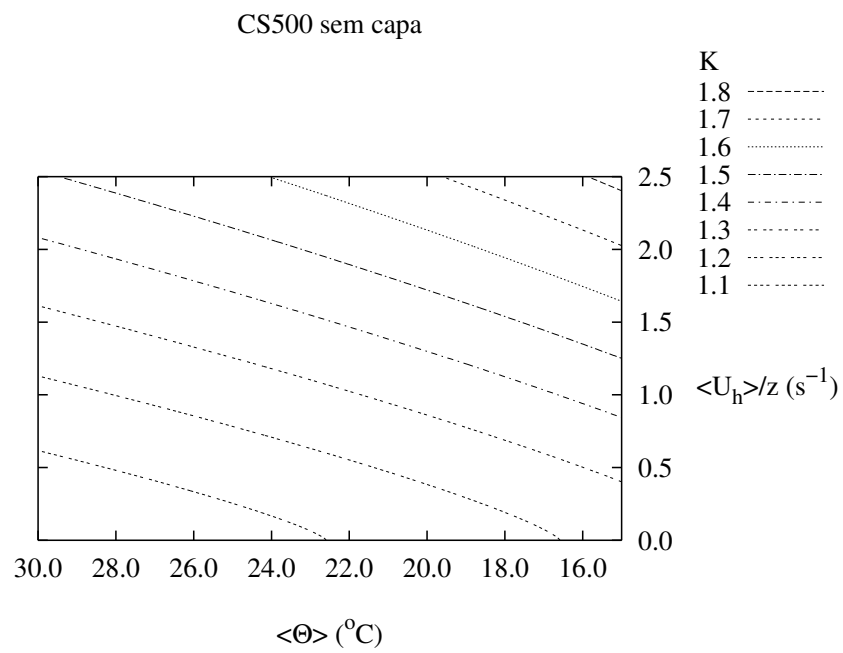


Figura 4.39: *Contour plot* da função K para a sonda CS500 *desencapada*.

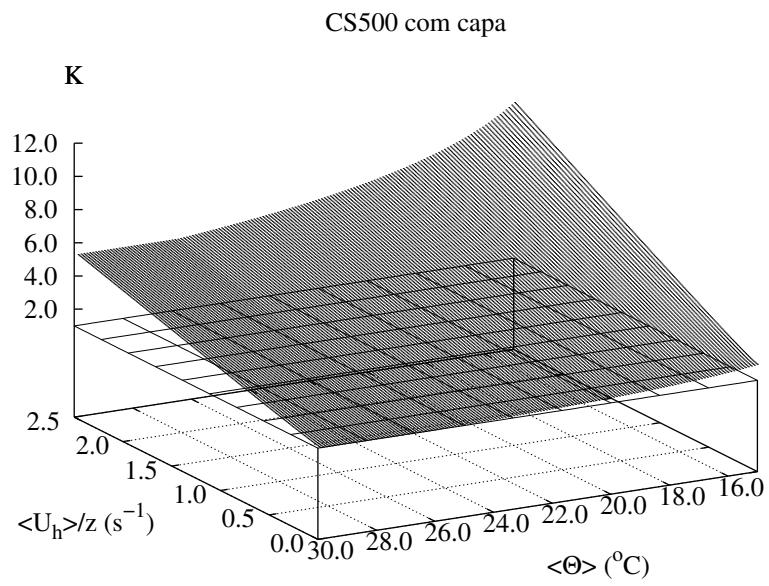


Figura 4.40: Superfície- K para a sonda CS500 *encapada*.

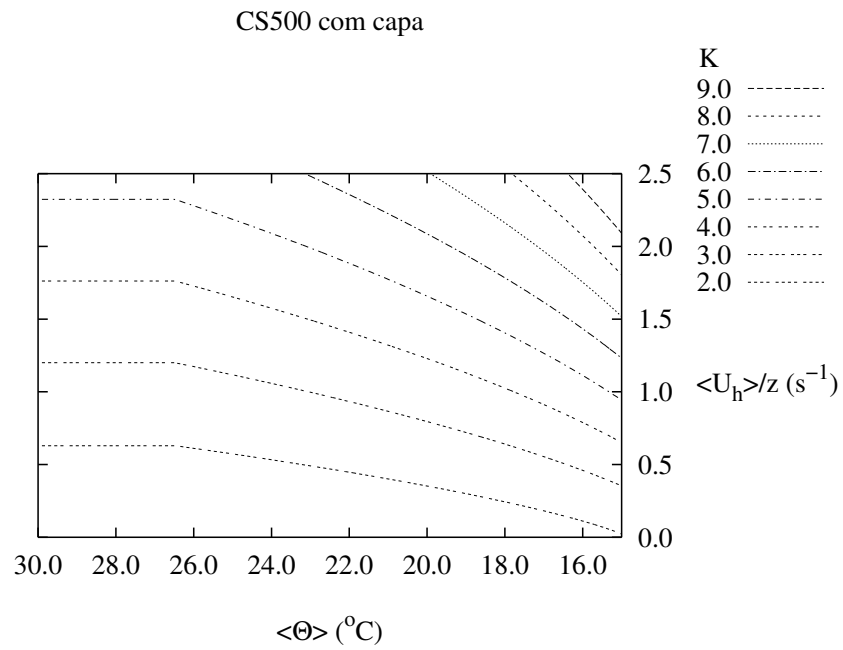


Figura 4.41: *Contour plot* da função K para a sonda CS500 *encapada*.

4.4 Resultados e análise

O fluxo de calor latente atenuado foi calculado para todos os *runs* dos experimentos Exfu-2, Exfu-3b e Exfu-4 que passaram no controle de qualidade mencionado na seção 4.2.1, utilizando as flutuações de velocidade vertical w_β (anemômetro Young 81000) e as flutuações de densidade de vapor d'água r_β (sonda CS500):

$$LE_{\beta\beta} = L\overline{w_\beta r_\beta}. \quad (4.28)$$

Com a temperatura média do ar $\overline{\Theta}$, a velocidade média horizontal do vento $\overline{U}_h$ e a altura de medição z de cada *run*, o fator de correção K foi calculado através das equações 4.25, 4.26 e 4.27 e aplicado aos fluxos $LE_{\beta\beta}$ previamente obtidos. Vale ressaltar que a equação 4.26 foi restringida ao intervalo $0,1 \leq \Lambda^2 \leq 1$ de forma a evitar correções não realísticas. É importante lembrar também que a altura de medição no Exfu-3b, ao contrário dos outros experimentos, foi variável, e dados diários de nível do Lago de Furnas foram empregados para a sua obtenção.

A fim de comparar o efeito da aplicação ou não da função de correção no fluxo LE atenuado, também foram calculados os fluxos “ideais”, isto é, aqueles monitorados com os sensores sônicos e infravermelhos. Para o Exfu-2 foi calculado o fluxo $LE_{\alpha\alpha}$ (anemômetro CSAT3 + higrômetro KH20), para o Exfu-3b foi calculado o fluxo $LE_{\beta\alpha 2}$ (anemômetro Young 81000 + analisador infravermelho Licor-7500) e finalmente para o Exfu-4 foi calculado o fluxo $LE_{\alpha\alpha 2}$ (anemômetro CSAT3 + analisador infravermelho Licor-7500). Vale enfatizar que foram utilizados inclusive os *runs* que foram excluídos na obtenção dos parâmetros $\mathcal{T}_{rr}$, T , Λ , e $\mathcal{T}_{wr}$ (veja na tabela 4.6 um resumo com o número de *runs* utilizados para cada etapa deste trabalho), uma vez que a finalidade idealizada para a função K compreende a sua aplicação rotineira aos fluxos atenuados medidos.

As figuras de 4.42 a 4.47 trazem os fluxos atenuados $LE_{\beta\beta}$ e os fluxos corrigidos $KLE_{\beta\beta}$ ao longo dos três experimentos, comparados aos fluxos ideais. Devido à grande duração do experimento Exfu-3b, as figuras 4.44 e 4.45 trazem somente os 10 primeiros dias de medição.

Experimento	Total de <i>runs</i>	<i>n runs</i>	selecionados para
Exfu-2	214	60 (1)	calibração de T e Λ
		171 (81)	calibração de $\mathcal{T}_{wr}^*$
		214 (114)	validação de K
Exfu-4	260	90 (3)	calibração de T e Λ
		164 (23)	calibração de $\mathcal{T}_{wr}^*$
		260 (37)	validação de K
Exfu-3b	2139	2139 (252)	validação de K

Tabela 4.6: Número total de *runs* que passaram pelo controle de qualidade (dados brutos sem falhas e direção de vento favorável) e quantidade de *runs* empregada nas fases de calibração e de validação da nova função de correção proposta. Os números entre parênteses correspondem ao número de *runs* estáveis associados.

Experimento	VIES (W m^{-2})		REMQ (W m^{-2})		EMA (W m^{-2})	
	$LE_{\beta\beta}$	$KLE_{\beta\beta}$	$LE_{\beta\beta}$	$KLE_{\beta\beta}$	$LE_{\beta\beta}$	$KLE_{\beta\beta}$
Exfu-2	-19,677	-8,483	27,628	16,161	20,114	11,077
Exfu-3b	-29,153	-4,974	42,029	15,525	29,761	10,348
Exfu-4	-37,008	+3,269	45,938	20,709	37,154	13,658

Tabela 4.7: Viés (VIES), raiz do erro médio quadrático (REMQ) e erro médio absoluto (EMA) dos fluxos $LE_{\beta\beta}$ antes e após correção, comparados aos fluxos ideais.

Na seqüência, as figuras de 4.48 a 4.53 trazem as mesmas comparações, porém em gráficos de dispersão ($LE_{\beta\beta}$ ou $KLE_{\beta\beta}$ versus LE ideal). Os gráficos de dispersão referentes ao Exfu-3b, ao contrário do caso anterior, trazem os pontos de todo o experimento.

Os fluxos $LE_{\beta\beta}$ e $KLE_{\beta\beta}$, genericamente denotados por y , também foram comparados aos fluxos ideais, genericamente denotados por x , através dos seguintes parâmetros estatísticos:

$$\text{VIES} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i), \quad (4.29)$$

$$\text{REMQ} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}, \quad (4.30)$$

$$\text{EMA} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - x_i|, \quad (4.31)$$

onde N é o número de pontos analisado, VIES é o viés, REMQ é a raiz do erro médio quadrático e EMA é o erro médio absoluto. A tabela 4.7 traz os resultados obtidos.

Não é difícil notar nos gráficos que a aplicação do fator K nos três experimentos propiciou uma melhora significativa no fluxo $LE_{\beta\beta}$ em relação aos fluxos ideais medidos, sendo esta

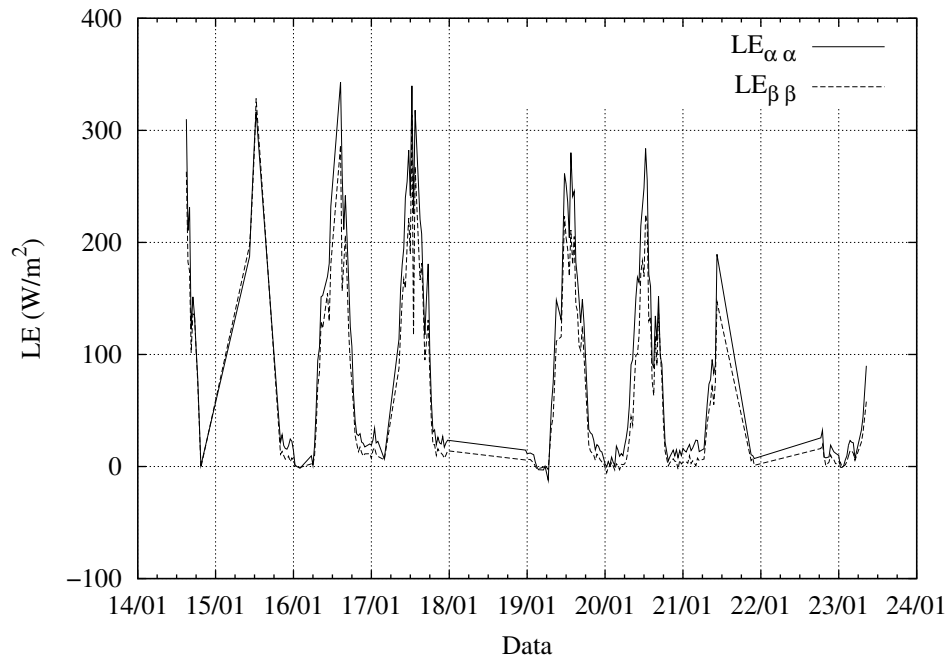


Figura 4.42: Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha}$ (anemômetro CSAT3 + higrômetro KH20) ao longo do Exfu-2.

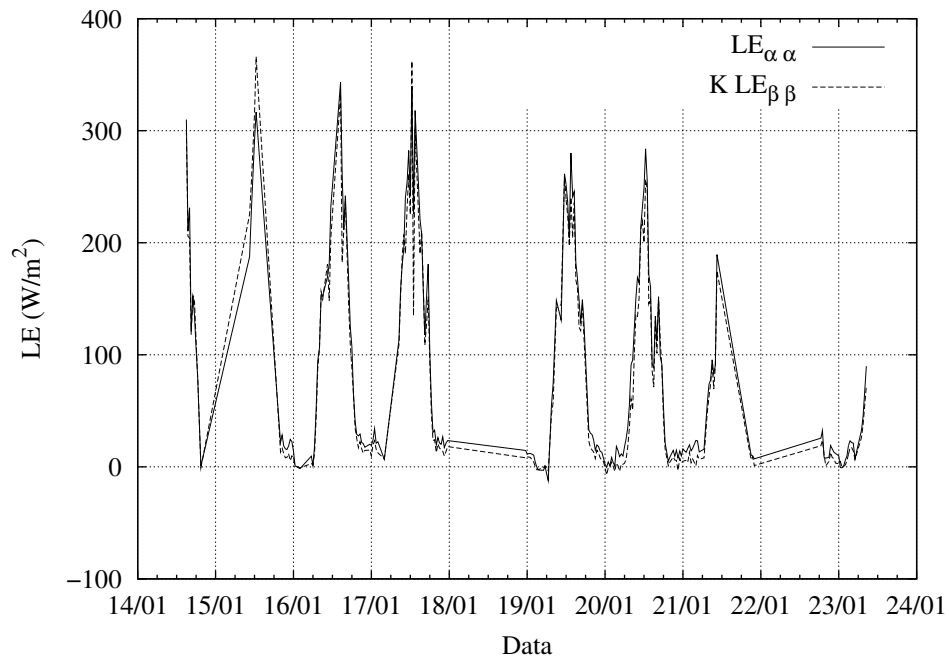


Figura 4.43: Fluxo corrigido $K LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha}$ (anemômetro CSAT3 + higrômetro KH20) ao longo do Exfu-2.

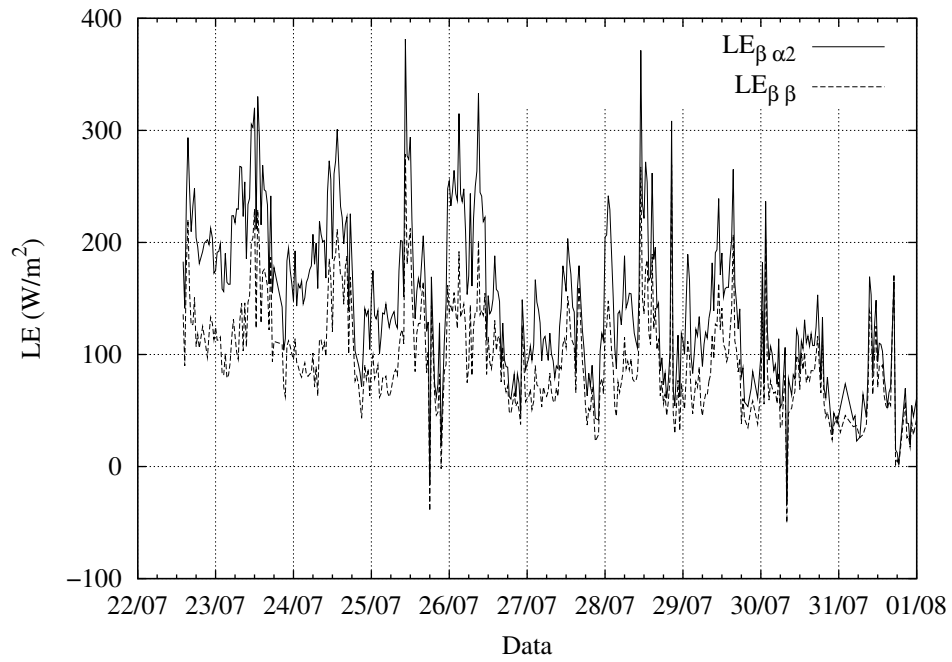


Figura 4.44: Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\beta\alpha 2}$ (anemômetro Young 81000 + analisador Licor-7500) ao longo dos 10 primeiros dias do Exfu-3b.

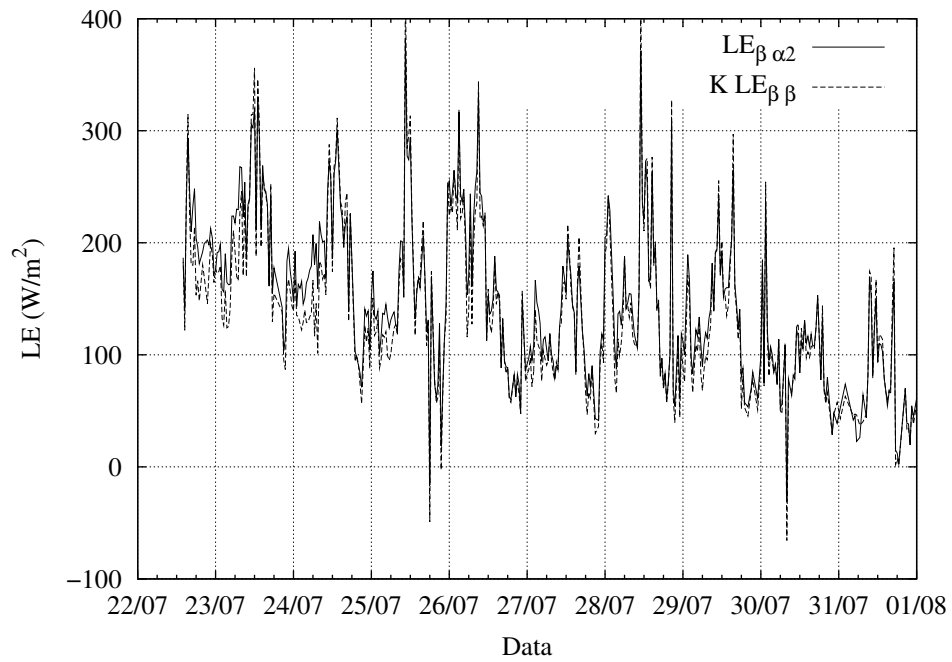


Figura 4.45: Fluxo corrigido $K LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\beta\alpha 2}$ (anemômetro Young 81000 + analisador Licor-7500) ao longo dos 10 primeiros dias do Exfu-3b.

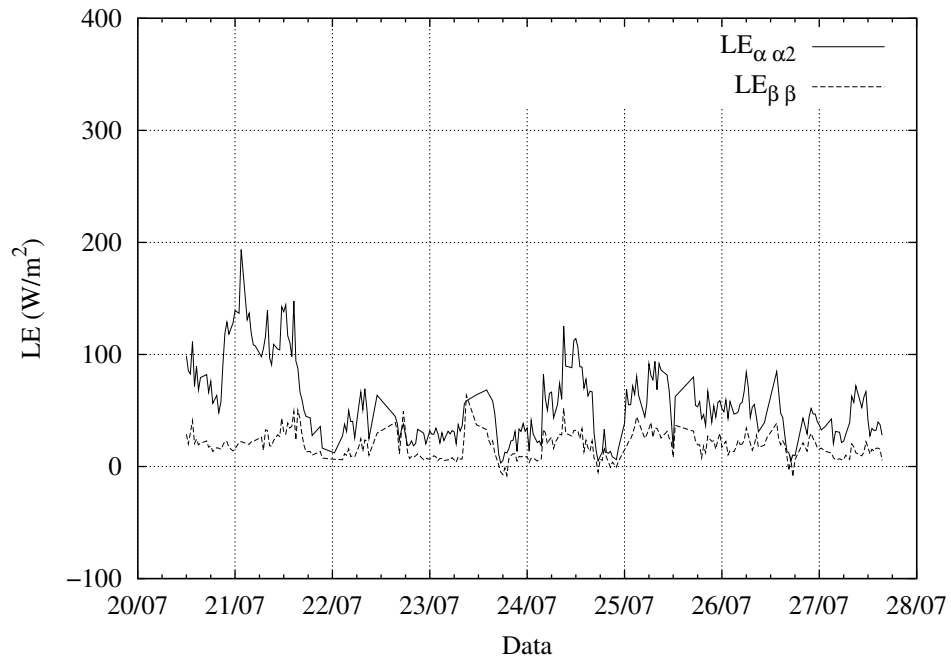


Figura 4.46: Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha2}$ (anemômetro CSAT3 + analisador Licor-7500) ao longo do Exfu-4.

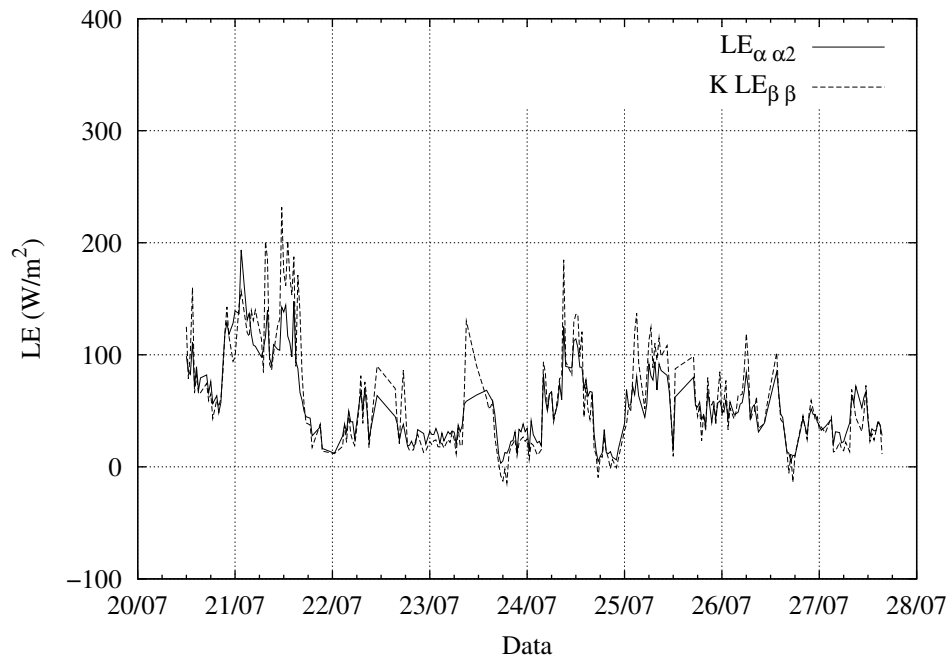


Figura 4.47: Fluxo corrigido $KLE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) e fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha2}$ (anemômetro CSAT3 + analisador Licor-7500) ao longo do Exfu-4.

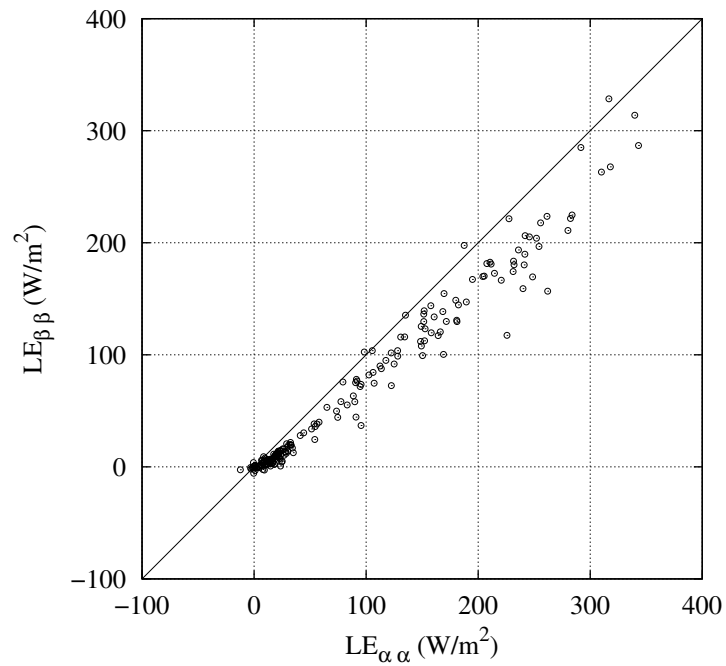


Figura 4.48: Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) *versus* fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha}$ (anemômetro CSAT3 + higrômetro KH20) — Exfu-2.

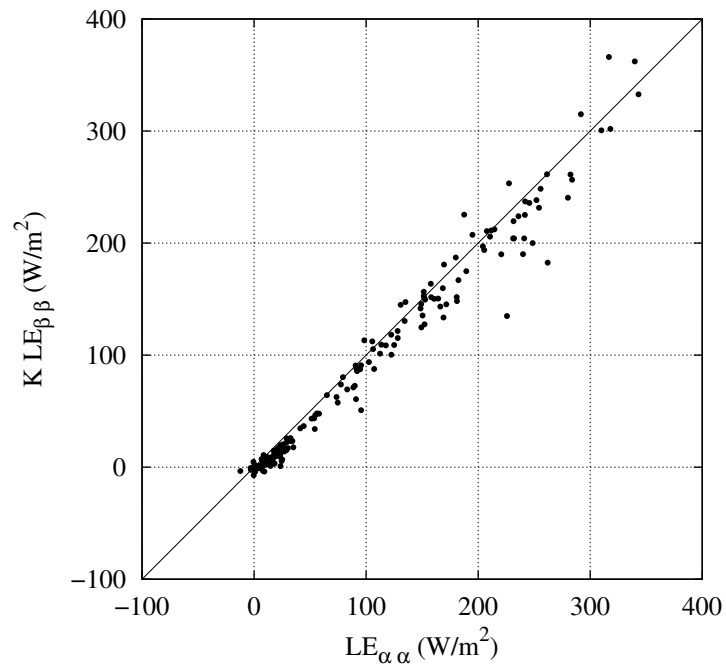


Figura 4.49: Fluxo corrigido $K LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) *versus* fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha}$ (anemômetro CSAT3 + higrômetro KH20) — Exfu-2.

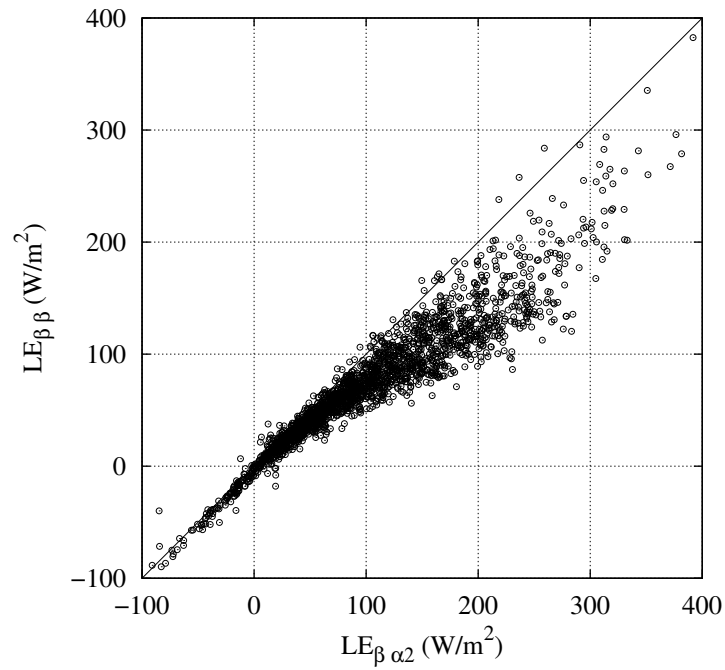


Figura 4.50: Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) *versus* fluxo ideal $LE_{\beta\alpha 2}$ (anemômetro Young 81000 + analisador Licor-7500) — Exfu-3b.

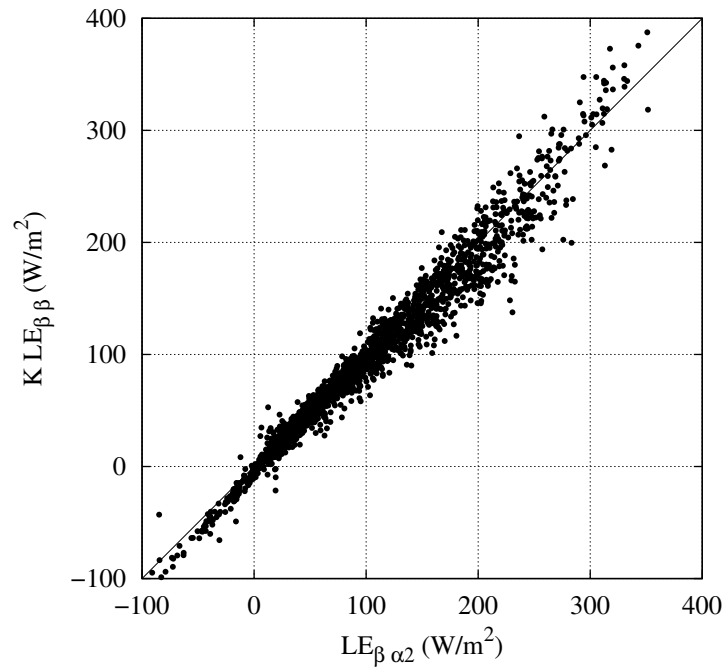


Figura 4.51: Fluxo corrigido $KLE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) *versus* fluxo ideal $LE_{\beta\alpha 2}$ (anemômetro Young 81000 + analisador Licor-7500) — Exfu-3b.

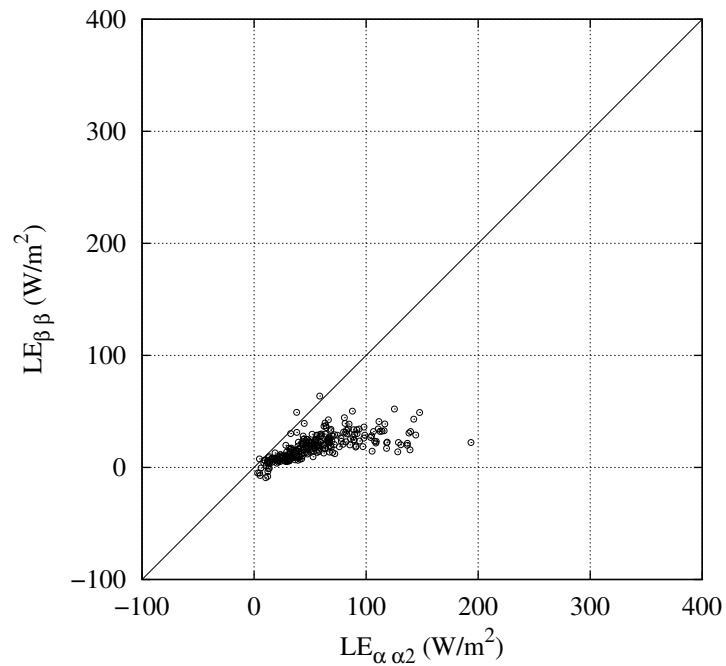


Figura 4.52: Fluxo atenuado $LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) *versus* fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha2}$ (anemômetro CSAT3 + analisador Licor-7500) — Exfu-4.

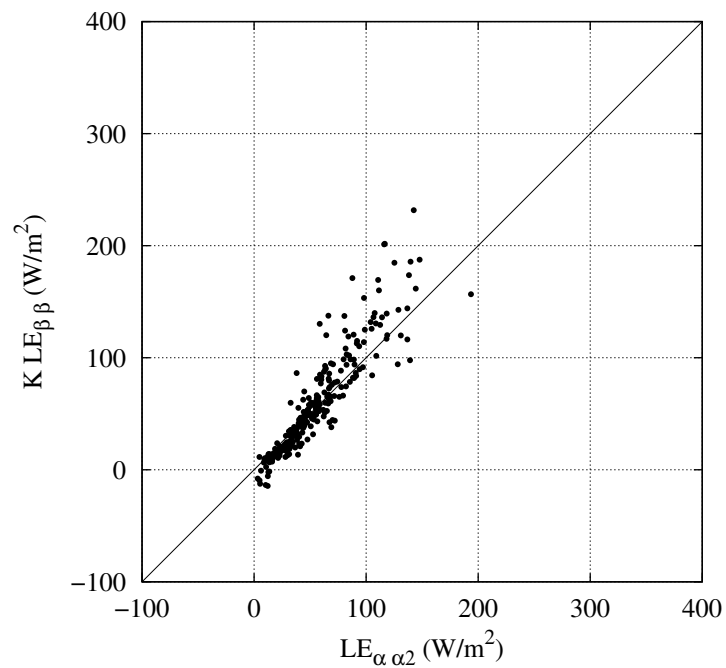


Figura 4.53: Fluxo corrigido $K LE_{\beta\beta}$ (anemômetro Young 81000 + sonda CS500) *versus* fluxo ideal $LE_{\alpha\alpha2}$ (anemômetro CSAT3 + analisador Licor-7500) — Exfu-4.

melhora mais evidente nos experimentos Exfu-3b e Exfu-4, tendo em vista a grande diferença entre os fluxos ideais e atenuados registrada nestes experimentos. No Exfu-2 o fator de correção apresentou valores baixos para a maioria dos *runs*, uma vez que foi utilizado o sensor capacitivo desencapado e que o experimento foi realizado no verão, com temperatura do ar mais elevada de forma geral (note nas figuras 4.42 e 4.48 que as diferenças entre os fluxos ideais e atenuados não são tão acentuadas quanto nas demais figuras desta seção). O sensor desencapado também foi utilizado no Exfu-3b, porém este experimento foi realizado no inverno, o que explica as grandes diferenças observadas entre os fluxos ideais e atenuados (figuras 4.44 e 4.50). Já em relação ao Exfu-4, as grandes diferenças devem-se à utilização do sensor capacitivo encapado somada às temperaturas mais frias de inverno (figuras 4.46 e 4.52).

Na média, os fluxos corrigidos ainda ficaram subestimados para os experimentos Exfu-2 e Exfu-3b, ao contrário do Exfu-4 que registrou um pequeno viés positivo. Os erros calculados para os fluxos $KE_{\beta\beta}$ obtidos através do sensor capacitivo desencapado (Exfu-2 e Exfu-3b) e encapado (Exfu-4) são muito semelhantes, apesar dos erros REMQ e EMA serem ligeiramente superiores no Exfu-4. Tal semelhança evidencia a consistência de desempenho da metodologia de correção desenvolvida neste trabalho.

Vale ressaltar que os dados do Exfu-3b não foram utilizados na calibração do fator K , sendo somente empregados no teste da metodologia proposta. Com o fator de correção calibrado para a sonda CS500 desencapada, para um sítio experimental completamente diferente (plantação de soja e milho — Exfu-2), conseguiu-se obter resultados igualmente satisfatórios no Exfu-3b realizado no Lago de Furnas.

Os resultados obtidos para os experimentos de calibração (Exfu-2 e Exfu-4) também apresentam um determinado grau de independência, uma vez que os *runs* utilizados no teste de desempenho incluíram aqueles que foram descartados na obtenção dos parâmetros $\mathcal{T}_{rr}$, T , Λ e $\mathcal{T}_{wr}$.

5 Conclusões e recomendações

A metodologia apresentada neste trabalho para a caracterização de um sensor capacitivo (*i.e.* obtenção de seu tempo de resposta e da dependência de sua resposta em relação à temperatura do ar) e para a correção do fluxo de calor latente atenuado obtido através do mesmo em conjunto com um anemômetro sônico se comportou de forma satisfatória em três experimentos, realizados para dois sítios experimentais completamente distintos (plantação de soja/milho e Lago de Furnas) e para duas configurações do sensor capacitivo (com capa e sem capa protetora).

Tendo em vista a qualidade dos fluxos corrigidos frente aos obtidos através dos sensores infravermelhos, a utilização de simples sensores capacitivos de umidade relativa consiste em uma alternativa muito mais acessível e robusta para a medição de LE na disponibilidade de um anemômetro sônico, podendo viabilizar a criação ou ampliação de redes de monitoramento. O desempenho do fator de correção proposto para o sensor capacitivo desencapado se mostrou levemente superior em relação ao sensor encapado. Porém, devido à relativa vulnerabilidade do sensor desencapado, recomenda-se a utilização desta configuração para campanhas de curta duração. Para campanhas de coleta de dados mais extensas, ou para sistemas de medição contínua, a utilização do sensor capacitivo encapado é uma escolha mais racional, pois apesar dos erros serem possivelmente superiores, ganha-se em robustez.

Acredita-se que os valores ajustados neste trabalho para o tempo de resposta T , para o fator de atenuação $\Lambda^2(\bar{\Theta})$ e para a escala integral adimensionalizada associada ao co-espectro entre a velocidade vertical do vento e a densidade de vapor d'água $\mathcal{T}_{wr}^*$ possam ser aplicados normalmente em outros experimentos e para outros sítios experimentais, desde que obviamente utilizem o mesmo equipamento (sonda CS500 e abrigo de PVC ventilado) e o mesmo arranjo

com o anemômetro sônico. Este fato pode ser observado no Exfu-3b, onde foram obtidos bons resultados a partir de tais parâmetros ajustados para o Exfu-2, em um sítio experimental completamente diferente.

Algumas observações importantes devem ser feitas no tocante à aplicação da função de correção com os parâmetros ajustados via Exfu-2 e Exfu-4. A utilização neste trabalho de $\mathcal{T}_{wr}^* = \text{cte}$ é uma simplificação para condições estáveis, onde se sabe que pela Teoria de Similitude de Monin-Obukhov, $\mathcal{T}_{wr}^* = \mathcal{T}_{wr}^*(\zeta)$, ou seja, $\mathcal{T}_{wr}^*$ é função da variável de estabilidade de Monin-Obukhov ζ . Seria interessante testar a metodologia proposta neste trabalho de forma específica para condições estáveis, a fim de se determinar a relação entre $\mathcal{T}_{wr}^*$ e ζ . De qualquer forma, a mudança da estimativa da escala integral adimensionalizada não implica no reajuste dos parâmetros T e Λ , uma vez que na metodologia proposta tais ajustes são realizados de forma totalmente independente.

Outra observação importante diz respeito às funções $\Lambda^2(\bar{\Theta})$ ajustadas, que estão limitadas a um intervalo não muito amplo de temperaturas. O comportamento da função para temperaturas altas é conhecido ($\Lambda \rightarrow 1$), porém nada se sabe quanto ao comportamento para temperaturas mais baixas. Pelos dados obtidos nos experimentos, pode-se calcular $\Lambda^2(\bar{\Theta})$ com segurança para temperaturas acima de $\approx 15^\circ\text{C}$. Para temperaturas mais baixas, se as regressões lineares forem seguidas, se chegará em um ponto em que $\Lambda^2(\bar{\Theta}) = 0$, implicando em um fator de correção $K = +\infty$. Neste trabalho as funções foram truncadas deliberadamente em $\Lambda^2(\bar{\Theta}) = 0,1$, como uma solução temporária a esse problema. Para a aplicação da função de correção em temperaturas mais baixas, recomenda-se a realização de novos experimentos em tais condições para se determinar corretamente o comportamento do fator Λ , verificando desta forma se existe alguma tendência assintótica em torno de um patamar ou uma queda para zero, o que significaria a impossibilidade de utilização do sensor capacitivo em temperaturas muito baixas.

Para outros modelos de sensor capacitivo e para disposições diferentes dos equipamentos, os parâmetros T e $\Lambda^2(\bar{\Theta})$ devem obrigatoriamente ser recalibrados a partir das funções de autocovariância modeladas e amostrais, para futura utilização do fator de correção.

Quanto à dedução do fator de correção K , foi suposto que o espectro de quadratura entre a velocidade vertical do vento e a densidade de vapor d'água ideal Q_{w_α, r_α} era igual a zero, apesar desta hipótese não ter sido confirmada para todos os *runs* utilizados através da paridade da função de covariância cruzada amostral C_{w_α, r_α} . A suposição de que $Q_{w_\alpha, r_\alpha} \neq 0$ tornaria a dedução analítica de K mais complexa, e dado o bom desempenho da versão atual, talvez esta complexidade não seja realmente necessária para fins práticos, embora mereça alguma atenção do ponto de vista teórico.

É útil lembrar que o fator de correção desenvolvido tem a vantagem de ser aplicado no domínio do tempo, de maneira instantânea. Em sistemas de medições contínuas de fluxos, normalmente são armazenadas nos módulos de memória somente as médias das variáveis e as covariâncias (fluxos propriamente ditos). O fator de correção pode ser programado facilmente em um *datalogger*, corrigindo de forma instantânea os fluxos atenuados.

Ainda é importante lembrar que por trás de toda a metodologia desenvolvida, está a equação 3.2, repetida na seqüência:

$$\frac{dR_\beta}{dt} + \frac{1}{T}R_\beta = \frac{\Lambda(\bar{\Theta})}{T}R_\alpha, \quad (5.1)$$

relacionando a densidade de vapor d'água real R_α e a obtida através de um sensor capacitivo R_β no domínio do tempo t , levando em consideração o seu tempo de resposta T (fixo) e um fator de atenuação Λ^2 dependente da temperatura média do ar $\bar{\Theta}$. Além do fator de correção propriamente dito, este modelo desenvolvido para o comportamento de um sensor capacitivo de umidade pode ser apontado como uma contribuição deste trabalho, que talvez possa ser utilizado em aplicações diferentes.

Uma extensão natural da linha de pesquisa deste trabalho em estudos futuros consistiria na realização de experimentos de campo em sítios experimentais diferentes e abrangendo um período de tempo relativamente longo, utilizando os mesmos sensores e configurações descritos neste estudo, tendo em vista dois objetivos principais: *i*) melhor compreensão do fator de atenuação $\Lambda(\bar{\Theta})$ em baixas temperaturas, conforme já foi mencionado anteriormente e *ii*) fortalecimento da nova metodologia desenvolvida. Quanto ao segundo item, o resultado obtido

com os dados do experimento de verificação Exfu-3b é muito animador e já indica que os parâmetros do fator de correção ajustados para uma determinada configuração de equipamentos não são restritos ao sítio experimental. É preciso, porém, confirmar esta constatação através da realização de mais experimentos. Sugere-se primeiramente a realização de experimentos com a sonda CS500 encapada em uma estação de terra, a fim de se averiguar em tal tipo de sítio a eficácia do fator de correção com os parâmetros aqui ajustados. Vale lembrar que os parâmetros ajustados para a sonda desencapada em uma estação de terra puderam ter a sua eficácia analisada em outro experimento realizado em uma superfície aquática. No caso da sonda encapada, foi realizado apenas o experimento de calibração em uma superfície aquática (Exfu-4).

Outro caminho importante a ser abordado em trabalhos futuros seria a utilização de diferentes configurações de equipamentos, com o emprego de diferentes modelos de sensores capacitivos, repetindo-se o processo de calibração dos parâmetros T e $\Lambda^2(\overline{\Theta})$ e o processo de verificação de desempenho do fator de correção K .

Todos estes experimentos propostos são necessários para a consolidação do método de correção desenvolvido neste trabalho, de forma a torná-lo confiável para aplicações em larga escala.

APÊNDICE A – Sonda CS500 adaptada para medições em alta frequência

A sonda Campbell Sci. CS500 é um equipamento compacto (6,75 cm de comprimento por 1,21 cm de diâmetro) e de preço acessível para medição de temperatura e umidade relativa do ar. Tal equipamento é constituído por um sensor capacitivo Vaisala INTERCAP[®] (substituível em casos de quebra/oxidação dos terminais, sem a necessidade de recalibração) para a umidade relativa e por um sensor de platina 1000 Ω PRT DIN 43760B para a temperatura do ar.

O sensor capacitivo INTERCAP[®] é constituído por um fino filme de polímero que absorve ou libera vapor d'água à medida que a umidade do ar ambiente aumenta ou diminui. As propriedades dielétricas do filme de polímero dependem da quantidade de água contida no mesmo: à medida que a umidade relativa muda, as propriedades dielétricas do filme mudam, alterando conseqüentemente a capacitância do sensor. A eletrônica do instrumento mede a capacitância do sensor e a converte para uma leitura de umidade.

Os sensores de temperatura e umidade são protegidos por um conjunto formado por um *grid* de plástico ABS cromado e por uma membrana de teflon de 2 μ m de espessura (ambos destacáveis), e o tempo de resposta nominal do sensor capacitivo, com a presença do *grid* e da membrana, é de 15 segundos (a 20°C, para uma resposta de 90% a uma mudança instantânea na umidade). A utilização deste conjunto de proteção tem o seu preço: a sensibilidade dos sensores é reduzida e o tempo de resposta é aumentado. A figura A.1 traz uma foto da sonda com a capa protetora.



Figura A.1: Sonda Campbell Sci. CS500 com seu conjunto protetor (na extremidade): *grid* de plástico ABS e membrana de teflon.

Guiado por resultados obtidos com sensores capacitivos por Horst et al. (1997), o Lemma passou a utilizar a sonda CS500 para a medição da densidade de vapor d'água R em alta frequência em seus experimentos (DIAS et al., 2002). Nos primeiros experimentos, a sonda foi utilizada sem o seu conjunto de proteção, a fim de evitar os reveses mencionados anteriormente. Devido à baixa vida útil do sensor capacitivo na ausência do *grid* e da membrana — fato comprovado em campo —, o Lemma voltou a utilizá-los nos últimos experimentos.

A fim de proteger a sonda da radiação solar incidente e da chuva, e de capacitá-la à medição de turbulência, o Lemma desenvolveu um abrigo ventilado construído com tubos, um “T”, um “joelho” e um “cap” de PVC branco de 50 mm, utilizados rotineiramente em instalações hidráulicas (veja figura esquemática A.2). Dentro deste abrigo são colocados a sonda envolta por uma camada de isopor, a fim de isolá-la contra o aquecimento proporcionado pela radiação solar incidente, e um pequeno ventilador — utilizado no resfriamento de processadores — para aspirar o ar de baixo para cima no tubo de PVC.

Com este sistema a sonda permanece sempre exposta a “ar novo”, que acaba de ser advec-tado pelo vento horizontal abaixo da tomada de ar do abrigo, sendo praticamente o mesmo que expô-la a uma corrente de ar livre.

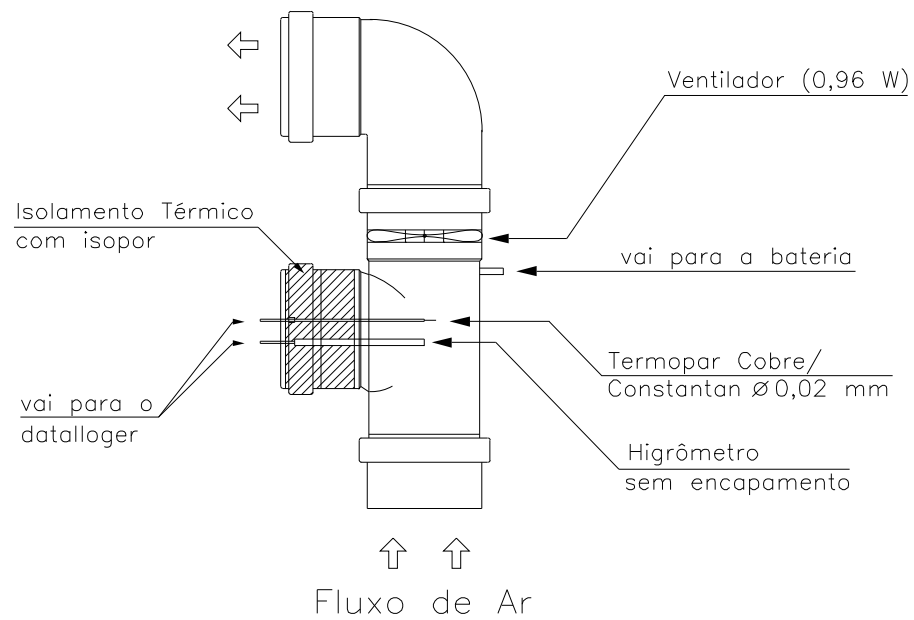


Figura A.2: Abrigo de PVC ventilado desenvolvido pelo Lemma para a sonda Campbell Sci. CS500.

APÊNDICE B – O formato de arquivo *turb*

Os dados brutos coletados em campo são armazenados em arquivos de 15 minutos no dispositivo de memória (*e.g.* *SD Card* de um PDA) com o formato binário da Campbell Sci.. Em cada instante de tempo, são armazenados ID (identificador da Campbell), dia juliano, hora/minuto, segundo e a leitura de todos os equipamentos conectados no *datalogger*. Cada variável citada ocupa o espaço de 2 *bytes*.

No Exfu-2, por exemplo, foram monitoradas 14 variáveis a uma frequência de 20 Hz. Para cada medição $(14 + 4) * 2 = 36$ *bytes* eram consumidos, e como em 15 minutos eram realizadas $15 * 60 * 20 = 18000$ medições a 20 Hz, cada arquivo armazenado no cartão de memória possuía o tamanho de 648000 *bytes*.

Para facilitar o processamento destes arquivos de dados, foi desenvolvido por Nelson Dias (Lemma) o programa *ndat2turb*, cuja função é converter uma seqüência de arquivos *dat* (binário Campbell) no formato binário *turb*, sendo necessária a utilização de um arquivo de parâmetros chamado *turb.param*, exemplificado na seqüência:

```
exfu-2
2004
14
20
u_csat3.....m/s
v_csat3.....m/s
w_csat3.....m/s
ts_csat3.....oC
diag_csat3.....INTEIRO
te_csat3.....mV
KH20.....mV
u_young.....m/s
v_young.....m/s
w_young.....m/s
```

```

y_cs500.....1
tc_cs500.....oC
te_young.....mV
T_ref.....oC
/home/hfduarte/lemma/exfu-2/turb/
001ini1.dat
002ini1.dat
003ini1.dat
004ini1.dat
005ini1.dat
006ini1.dat
007ini1.dat
008ini1.dat
009ini1.dat
010ini1.dat

```

Neste exemplo, “exfu-2” é o prefixo desejado para a nomenclatura dos arquivos *turb* a serem gerados, “2004” é o ano no qual foi realizado o experimento, “14” é o número de canais monitorados, “20” é a frequência de medição, “u_csat3...” é a descrição do primeiro canal de medição, “v_csat3...” é a descrição do segundo canal e assim sucessivamente (cada descrição deve possuir exatamente 31 caracteres), “/home/hfduarte/lemma/exfu-2/turb/” é o diretório aonde serão criados os arquivos *turb* e finalmente segue a listagem dos arquivos *dat* a serem processados, em ordem cronológica. O arquivo *turb.param* não deve apresentar a última linha em branco, sob a pena de falha do funcionamento do programa *ndat2turb*. A título de informação, o editor de texto *Nedit* (Sistema operacional Linux) não é capaz de salvar um arquivo sem deixar a última linha em branco. Editores como o *Emacs* e *Vi* são alternativas no Linux para o contorno deste problema.

Cada arquivo *turb* gerado possui um bloco de 15 minutos de dados, que termina em um horário múltiplo de 15 minutos, e sua nomenclatura segue o formato “prefixo-AnoMesDia-HoraMinuto.turb”. Ano, mês, dia, hora e minuto indicam o instante de seu último dado armazenado (sempre múltiplo de 15 minutos). A sequência formada pelos arquivos exfu-2-200401230215.turb, exfu-2-200401230230.turb, exfu-2-200401230245.turb, exfu-2-20040123-0300.turb, por exemplo, traz dados armazenados entre 2 e 3 horas da manhã do dia 23 de janeiro de 2004, no experimento Exfu-2.

Para a geração dos arquivos *turb* com seu último instante múltiplo de 15 minutos, o programa *ndat2turb* realiza, se necessário, o preenchimento de intervalos de dados inexistentes com código de falha –6999 ou com zero. Suponha a seguinte seqüência de arquivos *dat*:

```
001.dat -> hora inicial: 10:10h ; hora final: 10:25h
002.dat -> hora inicial: 10:25h ; hora final: 10:40h
003.dat -> hora inicial: 10:50h ; hora final: 11:05h
004.dat -> hora inicial: 11:05h ; hora final: 11:20h
005.dat -> hora inicial: 14:10h ; hora final: 14:25h
006.dat -> hora inicial: 14:25h ; hora final: 14:40h.
```

Para esta seqüência, seriam criados os seguintes arquivos *turb*

```
prefixo-AnoDiaMes1015.turb -> 10:00h até 10:15h
                             (preenchimento com zero até 10:10h)

prefixo-AnoDiaMes1030.turb -> 10:15h até 10:30h

prefixo-AnoDiaMes1045.turb -> 10:30h até 10:45h
                             (preenchimento com -6999 depois de 10:40h)

prefixo-AnoDiaMes1100.turb -> 10:45h até 11:00h
                             (preenchimento com -6999 até 10:50h)

prefixo-AnoDiaMes1115.turb -> 11:00h até 11:15h

prefixo-AnoDiaMes1130.turb -> 11:15h até 11:30h
                             (preenchimento com -6999 depois de 11:20h)

prefixo-AnoDiaMes1415.turb -> 14:00h até 14:15h
                             (preenchimento com -6999 até 14:10h)

prefixo-AnoDiaMes1430.turb -> 14:15h até 14:30h.
```

Nota-se que ainda sobraram 10 minutos de dados (14:30h às 14:40h), que o programa *ndat2turb* poderia colocar em um arquivo “prefixo-AnoDiaMes1445.turb” preenchendo os últimos instantes com código de falha, mas isto não ocorre.

O programa *ndat2turb* ainda faz o preenchimento com códigos de falha quando ocorre perda de *flags*, ocasionadas por falhas na comunicação entre o *datalogger* e o PDA.

A diferença entre os arquivos *dat* e *turb* não se encontra somente nos horários de início e término. No arquivo *turb* são removidos ID, dia juliano, hora/minuto e segundo. Os dados dos canais são postos “lado a lado” em uma seqüência de *bytes*, repetida para cada instante de medição. Assim como nos arquivos *dat*, são utilizados 2 *bytes* para cada dado medido.

Uma vez que as referências temporais são removidas, um cabeçalho é posto no início de todo o arquivo *turb*, conforme o exemplo abaixo:

```
20040117-12:30:00.00
14
20
u_csat3.....m/s
v_csat3.....m/s
w_csat3.....m/s
ts_csat3.....oC
diag_csat3.....INTEIRO
te_csat3.....mV
KH20.....mV
u_young.....m/s
v_young.....m/s
w_young.....m/s
y_cs500.....1
tc_cs500.....oC
te_young.....mV
T_ref.....oC.
```

Este é o cabeçalho para o arquivo “exfu-2-200401171230.turb”, onde “20040117-12:30:-00.00” é o instante de término do arquivo *turb*, “14” é o número de canais e “20” é a frequência de aquisição dos dados. As demais linhas são informações sobre os canais de medição, da mesma forma que no arquivo *turb.param*. Dado o fato de que cada arquivo *turb* traz 15 minutos de dados, as informações contidas no cabeçalho são suficientes para se localizar temporalmente todas as medições do arquivo. Em resumo, *turb* é um formato de arquivo otimizado para o armazenamento dos dados de turbulência, que além de facilitar o processamento dos mesmos, promove uma economia de *bytes*, pelo fato de excluir ID, data e hora de cada instante de medição.

A seguir é mostrado um trecho de programa em C, com um simples exemplo de como extrair os dados binários de um arquivo *turb* (*i.e.* obtê-los no formato de ponto flutuante):

```
#include ‘‘calib.h’’
#include ‘‘vector.h’’

int k,n;
long nread,nchan,rfreq;
char dstr[21];
cmat chan_nam;
unsigned short *trun;
FILE *fturb;
```

```

// abre o arquivo nome.turb para leitura
fturb = fopen(‘‘nome.turb’’,‘‘rb’’);

// -----
// leitura do cabeçalho do turb
// -----

// lê o horário do turb
fread(dstr , sizeof(char),21, fturb);

// lê o número de canais do turb
fread(&nchan , sizeof(long),1, fturb);

// lê a frequência de aquisição do turb
fread(&rfreq , sizeof(long),1, fturb);

// alocação de memória p/ os dados brutos
trun = (unsigned short *) calloc(nchan, sizeof(unsigned short));

// alocação de nchan strings para os nomes de cada canal
chan_nam = (cmat) MatAlloc(nchan,32, sizeof(char));

// leitura dos nomes dos canais
for (k = 0 ; k < nchan ; k++) {
    fread(chan_nam[k], sizeof(char),32, fturb);
}

// número de dados coletados em 15 minutos (para cada variável)
nread = 15*60*rfreq;
// -----

for ( n = 0 ; n < nread ; n++ ) {
    fread(trun , sizeof(unsigned short),nchan, fturb);
    /*
    trun[0]          -> canal 1      (ainda em formato binário)
    trun[1]          -> canal 2      (ainda em formato binário)
    trun[2]          -> canal 3      (ainda em formato binário)
    ...
    trun[nchan-1]    -> canal nchan (ainda em formato binário)
    */

    // convertendo binário para número de ponto flutuante
    canal1 = csiflt(trun[0]);
}

fclose( fturb);
free( trun);
free( chan_nam);

```

As funções *csiflt()* e *MatAlloc()* e o tipo de variável *cmat* estão presentes nas bibliotecas *calib.h* e *vector.h* criadas por Nelson Dias (Lemma).

Para a compilação de um programa em C deste gênero em Linux, utilizando o compilador Gnu *gcc*, pode ser utilizado o comando

```
gcc -Wall -O2 -std=gnu99 -I/home/hfduarte/lemma/nlib/include programa.c
/home/hfduarte/lemma/nlib/lib/libn.a -lm -lncurses -o programa
```

Neste caso, está sendo indicado o diretório em que se encontram as bibliotecas *calib.h* e *vector.h* (“/home/hfduarte/lemma/nlib/include/”) e a localização da biblioteca pré-compilada *libn.a*, também criada por Nelson Dias.

A fim de agilizar o processo de visualização dos dados contidos nos arquivos *turb*, foi desenvolvido um programa de rápida plotagem chamado *turb2png-plus*, com base no trecho de código mostrado anteriormente. Para cada arquivo *turb* fornecido ao programa, os dados da variável escolhida pelo usuário são extraídos e plotados em um arquivo gráfico *png* de baixa resolução (visando facilitar a visualização em massa). O programa *turb2png-plus* é executado na linha de comando da seguinte maneira:

```
turb2png-plus lista.dat ,
```

onde *lista.dat* é um arquivo texto contendo o caminho para todos os arquivos *turb* a serem processados.

Após o programa ser inicializado, 5 opções são oferecidas:

- [1] Termopar: desejo converter mV -> °C (apenas para o Tipo E)
- [2] KH20: desejo converter mV -> g/m3
- [3] CS500: desejo obter a densidade de vapor d’água em g/m3
- [4] Desejo plotar os dados brutos
- [5] Desejo plotar a direção do vento médio (CSAT3)

- Opção 1: é necessário informar o número do canal do termopar (dados em mV) e o número do canal da temperatura de referência do *datalogger* (dados em °C). Esta opção só é válida para termopares do tipo E (liga chromel-constantan).
- Opção 2: é necessário informar o número dos canais da temperatura (°C) e da umidade relativa da sonda CS500, o número do canal do KH20 (mV), e as constantes de calibração *a*, *b*, *c*, *d* e *e* do KH20 utilizadas na função *setlimitskh2o(a,b,c,d,e)*. Os dados da

sonda CS500 são necessários para se calcular $\overline{R_\beta}$, que é utilizado na subrotina *setkh2o()* para preparar a subrotina *kh2o()*, que finalmente faz a conversão de mV para gm^{-3} . O apêndice C traz uma descrição detalhada destas funções.

- Opção 3: é necessário informar os números dos canais da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e da umidade relativa da sonda CS500.
- Opção 4: basta informar o número do canal desejado.
- Opção 5: é necessário informar o número do canal da componente U e da componente V do anemômetro CSAT3, ambas em ms^{-1} .

Para todas as opções, ainda é necessário informar um sufixo para a nomenclatura dos gráficos a serem gerados. Por exemplo, “_Ua.png” para a componente U do CSAT3. Uma vez adquiridas todas as informações necessárias, o programa *turb2png-plus* inicia a plotagem dos gráficos. Para cada arquivo *turb* da lista, um gráfico é gerado com o sufixo informado, no formato *png*.

Para exemplificar, suponha que o sufixo informado fosse “_Ua.png”, e que a lista de arquivos *turb* de entrada fosse a seguinte:

```
exfu-2-200401151215.turb
exfu-2-200401151230.turb
exfu-2-200401151245.turb .
```

Seriam gerados os gráficos

```
exfu-2-200401151215_Ua.png
exfu-2-200401151230_Ua.png
exfu-2-200401151245_Ua.png .
```

Para cada gráfico, o programa simplesmente abre o respectivo arquivo *turb*, converte os dados necessários de binário para número de ponto flutuante, realiza algum processamento se for o caso e imprime os dados em um arquivo de saída temporário. Um *script* para o programa

de plotagem *Gnuplot* também é gerado, de acordo com a opção escolhida pelo usuário. Após isso o programa inicia o *Gnuplot* e executa o *script*, gerando o gráfico *png*.

Foi criada uma outra versão para o programa, chamada *turb2png-plus69*. Este programa é idêntico ao explicado anteriormente, com uma única exceção. Esta versão, quando escolhida a opção 4 (plotagem de dados brutos), exclui no momento da plotagem todos os dados falhos (-6999.0). Nos *scripts* gerados para o *Gnuplot*, em ambos os programas, não são definidos os intervalos de plotagem para o eixo y (*yrange*). Portanto, caso um valor -6999.0 esteja presente entre os dados a serem plotados, o *Gnuplot* ajusta automaticamente a escala do eixo y para a visualização de tal valor, o que acaba prejudicando a visualização dos dados corretos. Com o programa *turb2png-plus69* isto não ocorre, uma vez que o mesmo filtra os valores falhos. Este programa foi de grande importância no controle de qualidade do Exfu-2, uma vez que códigos de falha -6999.0 eram presentes em quase todos os arquivos *turb*.

Uma vez disponíveis todos os gráficos no formato *png*, uma forma muito rápida de visualizá-los é através do programa *qiv*, presente nas versões mais recentes do Mandrake Linux. Por exemplo, para visualizar a temperatura da sonda CS500 durante todo o experimento (tendo todos os gráficos disponíveis, obviamente), basta executar na linha de comando

```
qiv *_tc.png .
```

Dentro do programa *qiv*, alguns comandos úteis podem ser destacados:

- barra de espaço ou botão esquerdo do mouse -> avança para o próximo gráfico.
- *backspace* ou botão direito do mouse -> retorna para o gráfico anterior.
- Page Down -> avança 5 gráficos.
- Page Up -> retorna 5 gráficos.
- k -> rotaciona 90 graus no sentido horário.
- l -> rotaciona 90 graus no sentido anti-horário.

- + -> ampliação do gráfico.
- - -> redução do gráfico.
- enter -> volta à escala original.
- s -> inicia/pára o slideshow; o *default* é uma espera de 3 segundos para a passagem para o próximo gráfico. Para alterar para meio segundo, por exemplo, basta digitar na linha de comando “qiv --delay 0.5 *_tc.png”.
- q ou esc -> encerra o aplicativo.

Para uma relação detalhada de todas as opções disponíveis no programa, basta executar na linha de comando “qiv --help”.

APÊNDICE C – Higrômetro infravermelho Campbell Sci. KH20

O higrômetro infravermelho Campbell Sci. KH20 monitora uma diferença de potencial $\mathcal{V}$, que é função da umidade do ar entre o terminal emissor e o terminal receptor. Para a obtenção da densidade de vapor d'água R_α , a seguinte relação deve ser feita:

$$R_\alpha = \frac{\ln \mathcal{V}}{XK_w} - \frac{\ln \mathcal{V}_0}{XK_w}, \quad (\text{C.1})$$

onde X é o *path* (distância entre os terminais emissor e receptor), K_w é uma constante de calibração do equipamento e $\mathcal{V}_0$ é a diferença de potencial relacionada à umidade zero (onde a absorção dos raios infravermelhos é devida somente às moléculas de oxigênio).

Em um intervalo de tempo relativamente pequeno, como a duração dos *runs* utilizados neste trabalho (30 minutos), o segundo termo do lado direito da equação C.1 pode ser considerado como uma constante. Tal termo é importante quando se deseja conhecer o valor absoluto da densidade de vapor d'água, porém pode ser desprezado para o cálculo das flutuações turbulentas (o interesse neste trabalho estava voltado à obtenção das flutuações apenas).

Para cada higrômetro são aferidos 3 valores para o coeficiente K_w em condições de janelas limpas (*windows clean*) e 3 valores em condições de janelas incrustadas (*windows scaled*), que referem-se ao estado da proteção externa dos terminais emissor e receptor. Para cada condição, são aferidos coeficientes para 3 intervalos de densidade de vapor d'água: um para intervalo de baixa umidade, um para intervalo de alta umidade e outro para um intervalo completo, abrangendo os dois anteriores.

A biblioteca *calib.h* desenvolvida por Nelson Dias (Lemma) traz 3 subrotinas que em conjunto são utilizadas para o cálculo de R_{α^*} (que é igual a R_{α} , excluindo o segundo termo do lado direito da equação C.1): *setlimitskh2o()*, *setkh2o()* e *kh2o()*. Os códigos fonte de tais funções estão logo abaixo.

```

/* -----
   KH20 calibration constants
   ----- */
extern double
  rhomid ,      /* middle rhov */
  koxygen ,     /* k for oxygen */
  kvlow ,       /* kv for lower region */
  kvmed ,       /* kv for entire region */
  kvupp ,       /* kv for upper region */
  path ,        /* krypton hygrometer path length */
  kh20coef ,    /* 1/(kv*path) */
  KH20COEFLOW ,
  KH20COEFMED ,
  KH20COEFUPP ;

/* -----
   --> setlimitskh2o specifies limits and calibrations
   ----- */
#define setlimitskh2o(rrhomid , path , kvmed , kvlow , kvupp) \
  ( rhomid=(rrhomid) , \
    KH20COEFLOW=1.0/(kvlow*path) , \
    KH20COEFMED=1.0/(kvmed*path) , \
    KH20COEFUPP=1.0/(kvupp*path) )

/* -----
   --> setkh20 chooses kv and calculates coef

   if you specify a negative water vapor density , assumes
   average calibration curve; else chooses lower or upper
   region
   ----- */
#define setkh2o(rhovbar) \
  ( kh20coef = (rhovbar) < 0 ? KH20COEFMED : \
    ( (rhovbar) < rhomid ? KH20COEFLOW : KH20COEFUPP ) )

/* -----
   --> kh20(V): converts from milivolts to g m-3 based
   on rhovbar: if it is < 0, assumes kvmed; otherwise ,
   chooses.

   DOES NOT CONSIDER OXYGEN CORRECTIONS...
   ----- */
#define kh2o(V) kh20coef*log((V))

```

Para exemplificar a utilização destas funções, vamos adotar os dados de um higrômetro KH20 do Lemma, utilizado nos experimentos Exfu-2 e Exfu-4:

```

-----
Serial Number 1260
05/09/1996
-----

Path = 1.641 cm

WINDOWS CLEAN

Full vapor range: 1.80 - 19.25 g/m3
-> Kw = -0.134 ln(mV)m3/(g.cm)

Dry vapor range: 1.80 - 9.27 g/m3
-> Kw = -0.143 ln(mV)m3/(g.cm)

Wet vapor range: 7.95 - 19.25 g/m3
-> Kw = -0.130 ln(mV)m3/(g.cm)

WINDOWS SCALED

Full vapor range: 1.73 - 19.28 g/m3
-> Kw = -0.135 ln(mV)m3/(g.cm)

Dry vapor range: 1.73 - 9.24 g/m3
-> Kw = -0.145 ln(mV)m3/(g.cm)

Wet vapor range: 8.12 - 19.28 g/m3
-> Kw = -0.131 ln(mV)m3/(g.cm)

```

Em um programa em C para a obtenção de $R_{\alpha*}$, o primeiro passo é inicializar as constantes de calibração (nos estudos realizados no **Lemma**, convencionou-se utilizar as constantes para a condição *windows clean*):

```
setlimitskh2o(8.61,1.641,-0.134,-0.143,-0.130);
```

O primeiro valor (8.61) nada mais é do que a média entre o limite superior do intervalo de baixa umidade e o limite inferior do intervalo de alta umidade (9.27 e 7.95, respectivamente), em g m^{-3} . Na sequência vem o *path* em cm e as constantes K_w para o intervalo de umidade completo, para o intervalo de baixa umidade e para o intervalo de alta umidade respectivamente, em $\ln(\text{mV}) \text{ m}^3 \text{ g}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

Como a constante de calibração do KH20 depende da própria densidade de vapor d'água, a solução é obter uma estimativa com outro equipamento. Costuma-se utilizar a média de 15 ou 30 minutos da densidade de vapor d'água registrada pela sonda Campbell Sci. CS500. Com

tal estimativa, o segundo passo é a escolha do coeficiente K_w a ser utilizado, com a função *setkh2o()*:

```
setkh2o(rhovbmed);
```

Se $\bar{R}_\beta$ for menor que 0 (falha), o coeficiente escolhido é aquele para o intervalo de umidade completo. Se for menor que 8.61, o coeficiente é aquele para intervalo de baixa umidade, e se for maior que 8.61, o coeficiente escolhido é aquele para intervalo de alta umidade.

O terceiro passo é finalmente a conversão da diferença de potencial monitorada pelo KH20 em mV para densidade de vapor d'água em g m^{-3} , com a função *kh2o()*:

```
kh2o(milivolts);
```

Note que o resultado é $R_{\alpha*}$ e não R_α .

APÊNDICE D – Integração numérica — Método de Romberg

Antes de introduzir o Método de Romberg propriamente dito, será dada uma atenção especial à conhecida regra dos trapézios, que serve de base para este e para diversos outros métodos de integração numérica.

A fórmula estendida para a regra do trapézio é dada por

$$\int_{x_1}^{x_N} f(x) dx = h \left[\frac{1}{2}f_1 + f_2 + f_3 + \cdots + f_{N-1} + \frac{1}{2}f_N \right] + O(h^2), \quad (\text{D.1})$$

onde $x_i = x_1 + (i-1)h$ (com $i = 1, 2, 3, \dots, N$) são as abscissas tabuladas por um intervalo h e f_i é definido como valor da função f em x_i . Esta é a fórmula fechada, ou seja, os pontos pertencentes aos limites de integração são considerados no cálculo. Os erros obtidos pela aproximação é da ordem de h^2 .

Esta formulação possui duas características que a torna muito interessante do ponto de vista computacional. A primeira delas consiste no fato de que dado uma função $f(x)$ a ser integrada entre os limites fixos a e b , pode-se dobrar o número de intervalos (em outras palavras, dividir pela metade o intervalo h) sem a perda do trabalho numérico anterior.

A implementação mais rudimentar da regra do trapézio consiste no cálculo da área do retângulo de base $(b-a)$ e de altura dada pela média entre f_a e f_b :

$$\int_a^b f(x) dx = (b-a) \left(\frac{f_a + f_b}{2} \right). \quad (\text{D.2})$$

O primeiro refinamento desta aproximação rudimentar é obtido calculando a área do retângulo de base $(b - a)$ e de altura $f_{1/2}$ (valor da função no ponto médio do intervalo $[a, b]$) e tirando a média com o resultado anterior

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x) dx &= \frac{1}{2} \left[(b-a) \left(\frac{f_a + f_b}{2} \right) + (b-a) f_{1/2} \right] \\ &= \frac{(b-a)}{2} \left[\frac{f_a}{2} + f_{1/2} + \frac{f_b}{2} \right].\end{aligned}\quad (\text{D.3})$$

O segundo refinamento é obtido calculando a área do retângulo de base $(b - a)$ e de altura dada pela média entre $f_{1/4}$ e $f_{3/4}$ e tirando a média com o resultado anterior

$$\begin{aligned}\int_a^b f(x) dx &= \frac{1}{2} \left[\frac{(b-a)}{2} \left[\frac{f_a}{2} + f_{1/2} + \frac{f_b}{2} \right] + (b-a) \left(\frac{f_{1/4} + f_{3/4}}{2} \right) \right] \\ &= \frac{(b-a)}{4} \left[\frac{f_a}{2} + f_{1/4} + f_{1/2} + f_{3/4} + \frac{f_b}{2} \right].\end{aligned}\quad (\text{D.4})$$

Os demais refinamentos seguem o mesmo procedimento. Em resumo, quando se deseja dobrar o número de intervalos para aumentar a precisão da integração numérica, adicionando pontos internos, não é necessário o cálculo da função em todos os pontos da nova malha. Basta utilizar o resultado anterior e calcular a função $f(x)$ somente nos pontos novos adicionados (veja a figura D.1).

A segunda característica importante da regra do trapézio é que os erros associados à integração são potências pares de h (Fórmula de Euler-MacLaurin):

$$\int_{x_1}^{x_N} f(x) dx = h \left[\frac{1}{2} f_1 + f_2 + f_3 + \cdots + f_{N-1} + \frac{1}{2} f_N \right] + a_1 h^2 + b_1 h^4 + c_1 h^6 + \cdots, \quad (\text{D.5})$$

onde a_1 , b_1 e c_1 são constantes.

Suponha que T_N seja uma aproximação para a integral I de $f(x)$ para um intervalo fechado calculada pela regra dos trapézios com N intervalos

$$I = T_N + a_1 h^2 + b_1 h^4 + c_1 h^6 + \cdots \quad (\text{D.6})$$

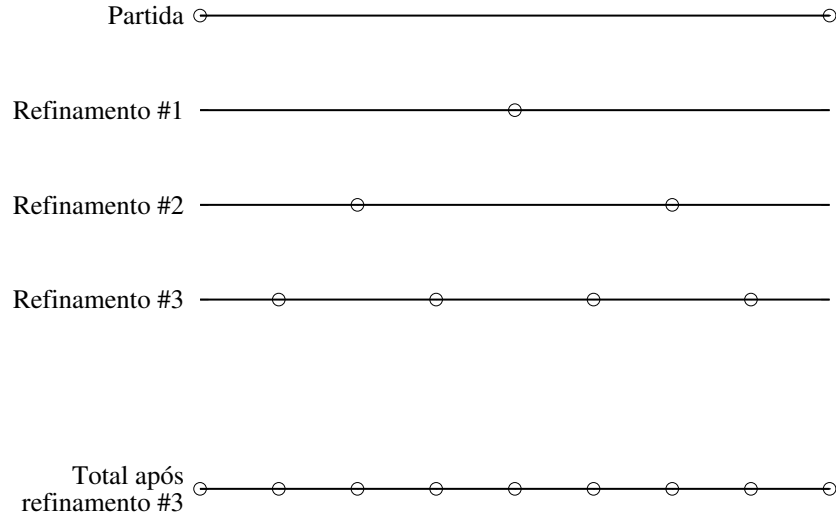


Figura D.1: O refinamento seqüencial na regra do trapézio incorpora a informação dos estágios anteriores e calcula o integrando somente nos pontos necessários para o refinamento da malha. A última linha traz o número total de cálculos da função após o estágio de refinamento #3 (figura adaptada de Press et al. (1992)).

Se dobrarmos o número de intervalos (*i.e.* $N \rightarrow 2N$ e $h \rightarrow h/2$) ficamos com

$$I = T_{2N} + a_1 \left(\frac{h}{2}\right)^2 + b_1 \left(\frac{h}{2}\right)^4 + c_1 \left(\frac{h}{2}\right)^6 + \dots \quad (\text{D.7})$$

Podemos anular o termo de erro dominante ($O(h^2)$) multiplicando (D.7) por 4 e subtraindo do resultado a equação D.6, obtendo

$$I = \frac{4T_{2N} - T_N}{3} + b_2 h^4 + c_2 h^6 + \dots \quad (\text{D.8})$$

que é conhecida como a regra de Simpson. Note que b_2 e c_2 são novas constantes.

Podemos repetir o processo e anular o termo de erro dominante ($O(h^4)$) da equação D.8, fazendo $2N \rightarrow 4N$, $N \rightarrow 2N$ e $h \rightarrow h/2$:

$$I = \frac{4T_{4N} - T_{2N}}{3} + b_2 \left(\frac{h}{2}\right)^4 + c_2 \left(\frac{h}{2}\right)^6 + \dots \quad (\text{D.9})$$

Multiplicando a equação D.9 por 16 e subtraindo do resultado a equação D.8 chega-se em

$$I = \frac{1}{15} \left[16 \frac{(4T_{4N} - T_{2N})}{3} - \frac{(4T_{2N} - T_N)}{3} \right] + c_3 h^6 + \dots \quad (\text{D.10})$$

que é conhecida como a regra de Bode.

O Método de Romberg de ordem $2k$ é a generalização deste procedimento para k sucessivos refinamentos da regra do trapézio (erros de ordem menor que $2k$ são eliminados). A regra do trapézio é relacionada com $k = 1$, a regra de Simpson com $k = 2$ e a regra de Bode com $k = 3$.

Como já foi explicado, as estimativas $T_N, T_{2N}, T_{4N}, T_{8N}, \dots$ podem ser calculadas de forma sucessiva, aproveitando os resultados obtidos no estágio de refinamento anterior. No Método de Romberg de ordem 4 (regra de Simpson), armazena-se o valor de dois estágios consecutivos T_N e T_{2N} e efetua-se o cálculo. Caso a precisão desejada ainda não seja alcançada, dobra-se o número de intervalos e efetua-se o cálculo com T_{2N} e T_{4N} , e assim por diante, com pares $T_{2^n N}, T_{2^{n+1} N}$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$). No Método de Romberg de ordem 6 (regra de Bode) os cálculos são efetuados com trios $T_{2^n N}, T_{2^{n+1} N}, T_{2^{n+2} N}$, e assim sucessivamente.

Press et al. (1992) relatam que o Método de Romberg em conjunto com a regra do ponto médio (fórmula aberta, que não é calculada nos limites de integração) é uma boa escolha para a resolução de integrais impróprias (*e.g.* singularidades nos limites de integração, limite inferior (superior) de integração igual a $-\infty$ ($+\infty$), etc.).

A fórmula aberta para a regra do ponto médio, utilizada quando os limites de integração estão localizados na metade das abscissas tabuladas, é igual a

$$\int_{x_1}^{x_N} f(x) dx = h [f_{3/2} + f_{5/2} + f_{7/2} + \dots + f_{N-3/2} + f_{N-1/2}] + O(h^2) \quad (\text{D.11})$$

e compartilha com (D.1) o fato de que os erros de ordem superior são potências pares de h (Segunda Fórmula de Euler-MacLaurin)

$$\begin{aligned} \int_{x_1}^{x_N} f(x) dx &= h [f_{3/2} + f_{5/2} + f_{7/2} + \dots + f_{N-3/2} + f_{N-1/2}] \\ &\quad + a_4 h^2 + b_4 h^4 + c_4 h^6 + \dots \end{aligned} \quad (\text{D.12})$$

O procedimento de refinamento da regra do ponto médio (*i.e.* eliminação dos termos de erro dominantes — Método de Romberg propriamente dito) é totalmente análogo ao procedimento explicado anteriormente para a regra do trapézio, com uma diferença. Na regra do ponto médio não é possível duplicar o número de intervalos e continuar com o benefício do cálculo computacional anterior, porém é possível *triplicar*.

No cálculo das funções de autocovariância (C_{r_α, r_α} e C_{r_β, r_β}) e de covariância cruzada (C_{w_α, r_α}) modeladas, utilizadas para o ajuste dos parâmetros $\mathcal{I}_{rr}$, T , Λ e $\mathcal{I}_{wr}$, as integrais foram resolvidas numericamente através da subrotina *qromo()* presente em Press et al. (1992) (com pequenas modificações no critério de convergência), que corresponde à implementação do Método de Romberg com a utilização da regra do ponto médio. Decidiu-se pela utilização de $k = 5$ (método de ordem 10).

APÊNDICE E – Algoritmo de Levenberg-Marquardt

Ajustes via mínimos quadrados é um procedimento comum em ciências, sendo que para modelos de funções não lineares a técnica freqüentemente escolhida corresponde ao método iterativo de Levenberg-Marquardt (LEVENBERG, 1944; MARQUARDT, 1963), incluída como ferramenta em diversos pacotes matemáticos comerciais e de código livre (LAMPTON, 1997). Na seqüência será mostrada a teoria por trás de tal técnica, passando pelo Método do Gradiente Descendente e pelo Método de Gauss-Newton, que lhe servem como base. Na notação utilizada no decorrer deste apêndice, vetores e matrizes são identificados com os sinais subscritos “ $\sim$ ” e “ $\approx$ ” respectivamente.

Seja f uma relação funcional que mapeia um vetor de parâmetros $\underset{\sim}{p} \in \Re^m$ a um vetor modelado $\underset{\sim}{\hat{x}} = f(\underset{\sim}{p})$, $\underset{\sim}{\hat{x}} \in \Re^n$, com $n \geq m$. A partir de uma estimativa inicial do vetor de parâmetros $\underset{\sim}{p}_0$ e de um vetor de medição $\underset{\sim}{x}$ fornecidos, deseja-se encontrar o vetor $\underset{\sim}{p}^+$ que melhor satisfaça a relação funcional f , ou seja, que minimize a soma do quadrado das distâncias $\underset{\sim}{\varepsilon}^T \underset{\sim}{\varepsilon}$, onde $\underset{\sim}{\varepsilon} = \underset{\sim}{x} - \underset{\sim}{\hat{x}}$.

O Método do Gradiente Descendente corresponde à técnica mais simples de minimização (RANGANATHAN, 2004), onde a atualização dos parâmetros ($\underset{\sim}{\delta_p}$) é dada pelo gradiente escalonado de $\underset{\sim}{\varepsilon}^T \underset{\sim}{\varepsilon}$, i.e. :

$$\underset{\sim}{\delta_p} = \lambda \underset{\approx}{J}^T \underset{\sim}{\varepsilon}. \quad (\text{E.1})$$

Nesta equação $\underset{\approx}{J}^T$ é a transposta da matriz Jacobiana, definida por $\underset{\approx}{J} = \frac{\partial \underset{\sim}{\hat{x}}_i}{\partial p_j}$ para $1 \leq i \leq n$ e $1 \leq j \leq m$.

Logicamente, deseja-se tomar passos grandes na direção do gradiente quando o mesmo é pequeno, e por outro lado, deseja-se tomar passos pequenos quando o gradiente é grande, para não se “escapar” do mínimo. O método descrito pela equação E.1 faz justamente o oposto, além de não considerar a curvatura da superfície de erro, que pode não ser a mesma em todas as direções. Devido a estes fatores, este método sofre de vários problemas de convergência (RANGANATHAN, 2004).

O Método de Gauss-Newton utiliza a informação de curvatura além do gradiente, e é baseada numa aproximação linear para f na vizinhança de p . Para um pequeno $\|\delta_p\|$ ($\|\cdot\|$ indica a norma 2 do vetor), uma expansão em série de Taylor leva à aproximação (LOURAKIS, 2005)

$$f(\tilde{p} + \tilde{\delta}_p) \approx f(\tilde{p}) + J_{\tilde{p}} \tilde{\delta}_p. \quad (\text{E.2})$$

A cada passo do método, é necessário encontrar δ_p que minimize a quantidade $\|x - f(\tilde{p} + \delta_p)\| \approx \|x - f(\tilde{p}) - J_{\tilde{p}} \delta_p\| = \|\varepsilon - J_{\tilde{p}} \delta_p\|$. O δ_p é obtido através da solução de um problema de mínimos quadrados *linear*: o mínimo é alcançado quando $J_{\tilde{p}} \delta_p - \varepsilon$ é ortogonal ao espaço coluna de J . Isto leva a $J^T (J_{\tilde{p}} \delta_p - \varepsilon) = 0$, que resulta em (LOURAKIS, 2005)

$$\delta_p = H^{-1} J^T \varepsilon, \quad (\text{E.3})$$

onde $H = J^T J$ é a matriz Hessiana aproximada (matriz com derivadas de segunda ordem).

Esta técnica de minimização tem como vantagem a rápida convergência. Tal velocidade, porém, é sensível à estimativa inicial (relacionada ao vetor p_0) e à linearidade no entorno desta estimativa (RANGANATHAN, 2004). Dada uma condição inicial p_0 distante da ideal p^+ , a técnica implicará em um maior custo computacional ou até mesmo na divergência do processo de minimização.

Levenberg (1944) propôs um algoritmo utilizando ambos os métodos (Gradiente Descendente + Gauss-Newton) de forma complementar, aproveitando os benefícios relacionados a cada um deles:

$$\delta_p = (H + \lambda I)^{-1} J^T \varepsilon, \quad (\text{E.4})$$

onde $\tilde{I}$ é a matriz identidade e λ é um termo de regularização.

O processo iterativo consiste em calcular $\tilde{\delta}_p$ e o erro quadrático associado a $f(\tilde{p} + \tilde{\delta}_p)$. Se o erro for inferior ao calculado na iteração anterior, o passo $\tilde{\delta}_p$ é aceito e significa que o método de Gauss-Newton “está funcionando”; reduz-se então o valor do parâmetro λ a fim de diminuir o efeito do gradiente descendente, e continua-se o processo. Por outro lado, se o erro quadrático aumentar, o passo $\tilde{\delta}_p$ é recusado, e a melhor opção é seguir o gradiente com um peso maior; aumenta-se o valor de λ e calcula-se $\tilde{\delta}_p$ em uma nova tentativa. Este processo se repete até a obtenção de um passo que implique na redução dos erros quadráticos. Todas as tentativas empregadas até a obtenção de um passo aceitável corresponde a uma iteração do algoritmo de Levenberg. As iterações do método, por sua vez, cessam quando algum critério de convergência é atingido (*e.g.* magnitude do gradiente $\tilde{J}^T \tilde{\varepsilon}$ menor que c_1 , mudança relativa na magnitude de $\tilde{\delta}_p$ abaixo de c_2 , erro quadrático $\tilde{\varepsilon}^T \tilde{\varepsilon}$ menor que c_3) ou quando o número de iterações ultrapassa um valor máximo pré-definido (LAMPTON, 1997).

O algoritmo de Levenberg tem a desvantagem de que se o valor para λ for elevado, a informação contida na matriz Hessiana calculada é praticamente desperdiçada. Mesmo nestes casos, pode-se obter alguma vantagem das derivadas de segunda ordem através do escalonamento de cada componente do gradiente de acordo com a curvatura. Esta idéia é atribuída à Marquardt (1963), que propôs a substituição da matriz identidade em (E.4) pela matriz Hessiana diagonal, resultando finalmente no conhecido método de Levenberg-Marquardt:

$$\tilde{\delta}_p = (\tilde{H} + \lambda \text{diag}[\tilde{H}])^{-1} \tilde{J}^T \tilde{\varepsilon}. \quad (\text{E.5})$$

Em outras palavras, na equação E.4 os termos da diagonal da matriz Hessiana são regularizados da forma $H_{ii} + \lambda$ e através de $H_{ii}(\lambda + 1)$ na equação E.5. Uma vez que o Hessiano é proporcional à curvatura da função erro $\tilde{\varepsilon}^T \tilde{\varepsilon}$, a utilização da equação E.5 implica em grandes passos na direção de baixa curvatura e em pequenos passos na direção de alta curvatura (RANGANATHAN, 2004).

Em resumo, o Método de Levenberg-Marquardt é aplicável a uma ampla variedade de problemas não lineares, justamente por ser auto-regulado: ele é capaz de alternar entre uma aproximação descendente vagarosa quando longe do mínimo (comportando-se como o Método do Gradiente Descendente) e uma rápida convergência quando está na vizinhança do mínimo (comportando-se como o Método de Gauss-Newton).

Neste trabalho foi utilizada a subrotina *levmar()* com a implementação do método em linguagem C, desenvolvida por Lourakis (2004).

Referências Bibliográficas

- AMARAKOON, D.; CHEN, A. Estimating daytime net radiation using routine meteorological data in Jamaica. *Caribbean Journal of Science*, v. 1-2, n. 35, p. 132–141, 1999.
- ASANUMA, J.; ISHIKAWA, H.; TAMAGAWA, I.; MA, Y.; HAYASHI, T.; QI, Y.; WANG, J. Application of the bandpass covariance technique to portable flux measurements over the Tibetan Plateau. *Water Resources Research*, v. 41, n. 9, 2005.
- BALDOCCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, v. 9, p. 479–492, 2003.
- BLANFORD, J. H.; GAY, L. W. Tests of a robust eddy correlation system for sensible heat flux. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 46, p. 53–60, 1992.
- BRUTSAERT, W. H. *Evaporation into the atmosphere*. Dordrecht: D. Reidel, 1982.
- CHAMECKI, M.; DIAS, N. L. The local isotropy assumption and the turbulent kinetic energy dissipation rate in the atmospheric surface layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 130, n. 603, p. 2733–2752, 2004.
- DIAS, N. L. *Perfis médios e Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov na Camada Limite Atmosférica*. Curitiba, PR, 1996.
- DIAS, N. L.; CHAMECKI, M.; KAN, A. A study of spectra, structure and correlation functions and their implications for the stationarity of surface-layer turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 110, p. 165–189, 2004.
- DIAS, N. L.; KAN, A.; GRODZKI, L.; SANCHEZ, S. D.; VISSOTTO JR., D. O método de covariâncias turbulentas atenuadas (MCTA) para medição dos fluxos de calor sensível e latente: aplicação ao lago de Itaipu e seu redor. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 1, p. 143–160, 2002.
- DIAS, N. L.; KAN, A.; VISSOTTO JR., D.; NASCIMENTO, E. L.; DUARTE, H. F.; CANCELLI, D. M. *Monitoramento de fluxos, cálculo de evapotranspiração por balanço hídrico sazonal e um modelo solo-vegetação-atmosfera para cálculo de fluxos*. Curitiba, Brasil, 2003.
- DOP, H. *Boundary-Layer Meteorology*. Institute for Marine and Atmospheric Research (Universiteit Utrecht), Holanda, 2005.
- FEIGENWINTER, C. *The vertical structure of turbulence above an urban canopy*. Tese (Doutorado) — Universidade de Basel, Basel, Suíça, 1999.

- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. *Pesq. Agropec. Bras.*, v. 3, n. 26, p. 411–418, 1991.
- GARRATT, J. R. *The atmospheric boundary layer*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992.
- GLOVER, D.; JENKINS, B.; DONEY, S. Modeling, data analysis and numerical techniques for geochemistry. Woods Hole Oceanographic Institution. 2004.
- HAMMING, R. W. *Digital Filters*. 3. ed. [S.l.]: Dover Publications, 1998.
- HICKS, B. B. Propeller anemometers as sensors of atmospheric turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 3, p. 214–228, 1972.
- HICKS, B. B.; MCMILLEN, R. T. On the measurement of dry deposition using imperfect sensors and in non-ideal terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 42, p. 79–94, 1988.
- HOGSTRÖM, V.; BERGSTRÖM, H.; SMEDMAN, A. Turbulent exchange above a pine forest, I: fluxes and gradients. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 49, p. 197–217, 1989.
- HORST, T. W. A simple formula for attenuation of eddy fluxes measured with first-order-response scalar sensors. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 82, p. 219–233, 1997.
- HORST, T. W.; ONCLEY, S. P.; SEMMER, S. R. Measurement of water vapor fluxes using capacitance RH sensors and cospectral similarity. In: AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY. *12th Symposium on Boundary Layers and Turbulence*. Vancouver, BC, Canada, 1997. p. 360–361.
- KAIMAL, J. C. Turbulence spectra, length scales and structure parameters in the stable surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 4, p. 289–309, 1973.
- KAIMAL, J. C.; WYNGAARD, J. C.; IZUMI, Y.; COTÉ, O. R. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 98, p. 563–589, 1972.
- KATO, T.; TANG, Y.; GU, S.; CUI, X.; HIROTA, M.; DU, M.; LI, Y.; ZHAO, X.; OIKAWA, T. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai–Tibetan Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 124, p. 121–134, 2004.
- KATUL, G.; LAI, C.-T.; SCHÄFER, K.; VIDA KOVIC, B.; ALBERTSON, J.; ELLSWORTH, D.; OREN, R. Multiscale analysis of vegetation surface fluxes: from seconds to years. *Advances in Water Resources*, v. 24, p. 1119–1132, 2001.
- LAMPTON, M. Damping-undamping strategies for the levenberg-marquardt nonlinear least-squares method. *Computers in Physics*, v. 11, n. 1, p. 110–115, 1997.
- LESIEUR, M. *Turbulence in Fluids*. Second revised edition. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- LEUNING, R.; JUDD, M. J. The relative merits of open- and closed-path analysers for measurement of eddy fluxes. *Global Change Biology*, v. 2, n. 3, p. 241–253, 1996.

- LEVENBERG, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least-squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, v. 2, n. 2, p. 164–168, 1944.
- LOURAKIS, M. *levmar: Levenberg-Marquardt nonlinear least squares algorithms in C/C++*. 2004. [Domínio] <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/levmar/>. [Acessado em 8 de dezembro de 2005.].
- LOURAKIS, M. *A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm implemented by levmar*. Heraklion, Crete, Greece, 2005.
- MARQUARDT, D. W. An algorithm for the least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, v. 11, n. 2, p. 431–441, 1963.
- MASSMAN, W. J.; LEE, X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 113, p. 121–144, 2002.
- MILOSHEVICH, L. M.; PAUKKUNEN, A.; VÖMEL, H.; OLTMANS, S. J. Development and validation of a time-lag correction for vaisala radiosonde humidity measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 21, p. 1305–1327, 2004.
- MONCRIEFF, J. B.; MASSHEDER, J. M.; BRUIN, H. de; ELBERS, J.; FRIBORG, T.; HEUSINKVELD, B.; KABAT, P.; SCOTT, S.; SOEGAARD, H.; VERHOEF, A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *Journal of Hydrology*, v. 188–189, p. 589–611, 1997.
- MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the ground layer of the atmosphere. *Transactions of the Geophysical Institute of the Akademic Nauk, USSR*, v. 151, p. 163–187, 1954.
- MOORE, C. J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 37, p. 17–36, 1986.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. *Análise de séries temporais*. São Paulo: Blücher, 2004.
- PRESS, W. H.; VETTERLING, W. T.; TEUKOLSKY, S. A.; FLANNERY, B. P. *Numerical Recipes in C – The Art of Scientific Computing*. 2. ed. New York, United States: Cambridge University Press, 1992.
- RANGANATHAN, A. *The Levenberg-Marquardt algorithm*. GVV Center — Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2004.
- SOEGAARD, H.; JENSEN, N. O.; BOEGH, E.; HASAGER, C. B.; SCHELDE, K.; THOMSEN, A. Carbon dioxide exchange over agricultural landscape using eddy correlation and footprint modelling. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 114, p. 153–173, 2003.
- STULL, R. B. *An introduction to boundary layer meteorology*. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- STULL, R. B. *Meteorology today for scientists and engineers*. Minneapolis/St. Paul: West Publishing Company, 1995.

WATANABE, T.; YAMANOI, K.; YASUDA, Y. Testing of the bandpass eddy covariance method for a long-term measurement of water vapour flux over a forest. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 96, p. 473–491, 2000.

YASUDA, Y.; OHTANI, Y.; WATANABE, T.; OKANO, M.; YOKOTA, T.; LIANG, N.; TANG, Y.; NIK, A. R.; TANI, M.; OKUDA, T. Measurement of CO_2 flux above a tropical rain forest at Pasoh in Peninsular Malaysia. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 114, p. 235–244, 2003.

YASUDA, Y.; WATANABE, T. Comparative measurements of CO_2 flux over a forest using closed-path and open-path CO_2 analysers. *Boudary-Layer Meteorology*, v. 100, p. 191–208, 2001.