

André Luciano Malheiros

**DESENVOLVIMENTO DE UM VANT (VEÍCULO AÉREO NÃO
TRIPULADO) PARA MONITORAMENTO DA CAMADA-LIMITE
ATMOSFÉRICA E ANÁLISE DO MODELO INTEGRAL PARA
CÁLCULO DE FLUXO SUPERFICIAL DE CALOR SENSÍVEL**

Curitiba

2014

André Luciano Malheiros

**DESENVOLVIMENTO DE UM VANT (VEÍCULO AÉREO NÃO
TRIPULADO) PARA MONITORAMENTO DA CAMADA-LIMITE
ATMOSFÉRICA E ANÁLISE DO MODELO INTEGRAL PARA
CÁLCULO DE FLUXO SUPERFICIAL DE CALOR SENSÍVEL**

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Nelson Luís Dias

Curitiba

2014

Malheiros, André Luciano

Desenvolvimento de um VANT (veículo aéreo não tripulado) para monitoramento da camada-limite atmosférica e análise do modelo integral para cálculo de fluxo superficial de calor sensível / André Luciano Malheiros. – Curitiba, 2014.

118 f. : il.; tab.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia e Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia.

Orientador: Nelson Luís Dias

1. Aeronave não tripulada. 2. Camada limite (Meteorologia) – Monitoramento I. Dias, Nelson Luís. II. Título.

CDD 629.1326

TERMO DE APROVAÇÃO

ANDRÉ LUCIANO MALHEIROS

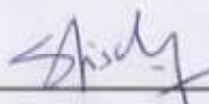
DESENVOLVIMENTO DE UM VANT (VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO) PARA MONITORAMENTO DA CAMADA-LIMITE ATMOSFÉRICA E ANÁLISE DO MODELO INTEGRAL PARA CÁLCULO DE FLUXO SUPERFICIAL DE CALOR SENSÍVEL

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



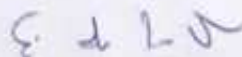
Prof. Dr. Nelson Luis da Costa Dias

(Orientador) Membro do PPGMNE/UFPR.



Prof. Dr. Gilberto Fernando Fisch

Membro do Centro Técnico Aeroespacial. Instituto de Aeronáutica e Espaço.
Divisão de Ciências Atmosféricas. São José dos Campos/SP.



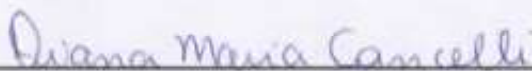
Prof. Dr. Ernani de Lima Nascimento

Membro do Dep. de Física da Universidade Federal de Santa Maria/RS.



Prof. Dr. Mauricio Felga Gobbi

Membro do PPGMNE/UFPR.



Dr.ª Diana Maria Cancelli

Membro do LEMMA/UFPR.

Curitiba, 15 de abril 2014.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao Prof. Nelson Luís Dias, pelos ensinamentos durante muitos anos sob sua orientação. Agradeço também a toda a equipe do **Lemma** – Laboratório de Estudos em Modelagem e Monitoramento Ambiental e aos demais colegas que auxiliaram nas diversas etapas deste estudo, especialmente nos trabalhos de campo.

Aqui destaco a grande contribuição do amigo José Eduardo Gonçalves (**SIMEPAR**) que, além de entusiasta, motivador e pesquisador em aplicações com VANT, contribuiu diretamente nesta pesquisa durante alguns anos, em campo e laboratório. Outro agradecimento especial é para o amigo, compadre e sócio Helder Nocko (**SIMEPAR**, **Lemma** e **EnvEx**), pela colaboração na pesquisa e por suprir minha ausência no escritório e também por cuidar da Laísa junto com a comadre Dayanna na fase final do trabalho. A tantos outros agradeço pela ajuda e por tornarem os experimentos de campo e as discussões técnicas ainda mais agradáveis: Selma, Ernani, Afonso, Diana, Akemi, Sandro, Wolf, Livia, Cynara, Chamecki, Dornelles, Manoel, Matheus, Tomohiro, Henrique e aos demais que estiveram em algum momento conosco.

Agradeço aos professores Gilberto Fisch (**CTA/IAE**), Ernani Nascimento (**UFSM**), Maurício Gobbi (**UFPR**) e Diana Cancelli (**Lemma**), que aceitaram fazer parte da banca avaliadora e que se empenharam na leitura do trabalho, evidenciando os êxitos e as correções necessárias, contribuindo para o aprimoramento da tese e futuros trabalhos.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, por disponibilizar sua infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigao aos coordenadores, professores e à secretaria do Programa, que sempre atuaram com muita dedicação e competência. Tenho muito orgulho da história acadêmica que pude viver como aluno desta instituição. Agradeço também às demais instituições que nos apoiaram durante a pesquisa: **CNPq** pelo financiamento dos nossos primeiros exprimentos; **SIMEPAR** pelo apoio logístico, financeiro e operacional; e **CINDACTA-II** pela prestatividade e competência no processo de obtenção das licenças para os voos com os VANTs, que permitiram a realização dos experimentos com segurança à aviação comercial e à sociedade.

Agradeço a toda minha família, em especial a minha mulher Mayra, pelo apoio, e a minha bebê Laísa, pela inspiração na etapa final do trabalho. Aos amigos pessoais e aos companheiros da **EnvEx Engenharia e Consultoria** sou grato pelo apoio e incentivo.

Epígrafe

A persistência é o menor caminho do êxito.

Charles Chaplin

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xii
Lista de Siglas	xiv
Lista de Símbolos	xv
Resumo	xvii
Abstract	xviii
1 Introdução	1
1.1 Definição do problema e motivação	2
1.2 Objetivos da pesquisa	4
1.3 Estrutura da tese	5
2 Conceitos Fundamentais da Física da Camada-Limite Atmosférica	6
2.1 A estrutura e dinâmica da CLA	6
2.2 Temperatura potencial e temperatura potencial virtual	8
2.3 Equações governantes	9
2.3.1 Decomposição de Reynolds e aproximações para o fluxo médio	10
2.3.2 Produção, distribuição e dissipação de energia cinética da turbulência	12
2.4 O balanço de energia na superfície	13
3 Sistemas de Monitoramento da CLA	16

3.1	Medições com torres micrometeorológicas	16
3.2	Medições diretas (<i>in-situ</i>) do perfil atmosférico	17
3.3	Medições da CLA com sensoriamento remoto	19
3.4	VANTs: uma nova plataforma de monitoramento da CLA	22
3.5	As dificuldades na interpretação de dados de perfis da CLA com medições diretas ..	31
4	Desenvolvimento Experimental: Um Mini-VANT para Medições da Camada-Limite Convectiva	34
4.1	A concepção do Veículo Aéreo Não Tripulado	35
4.1.1	As diferentes versões de aeronaves	35
4.1.2	Testes e calibração das aeronaves e piloto automático	37
4.2	Sítios experimentais	39
4.2.1	Balsa Nova	41
4.2.2	Tijucas do Sul	43
4.3	<i>Aerolemma-1</i>	47
4.4	<i>Aerolemma-2</i> e outros aeromodelos de testes	54
4.5	<i>Aerolemma-3</i>	56
4.6	Requisitos de segurança	59
5	Medições da Camada-Limite Convectiva Obtidas com o VANT	61
6	Modelo Integral de Crescimento da Camada-Limite Convectiva	74
6.1	Fundamentos do modelo integral	76
6.2	Equações do modelo integral de crescimento da CLC	78
6.2.1	A solução de quadratura	80
6.2.2	Parametrização da equação de ECT: fechamento do sistema de equações do modelo integral	81
7	Avaliação do Modelo Integral para Estimativa do Fluxo Superficial de Calor Sen-	

sível com Dados do FIFE.....	86
7.1 Dados utilizados do experimento FIFE	87
7.1.1 Dados de radiossondagens	87
7.1.2 Dados das estações de fluxos de covariâncias.....	88
7.1.3 Pré-processamento dos dados	89
7.2 Cálculo do fluxo de calor sensível virtual com base no modelo integral	92
7.2.1 Modelo integral com dinâmica de $\Delta\theta_v$	93
7.2.2 Modelo integral sem dinâmica de $\Delta\theta_v$	97
7.3 Discussão dos resultados e análise detalhada dos perfis de $\overline{\theta}_v$	101
7.3.1 Dificuldades nas aproximações dos perfis reais para perfis teóricos do modelo integral	104
7.4 Conclusões e recomendações para uso do modelo integral invertido.....	108
8 Conclusões e Recomendações	110
Referências Bibliográficas	112

Lista de Figuras

Figura 2.1	Variação da temperatura potencial na camada limite atmosférica para situações típicas de atmosfera instável (convectiva) e estável.	7
Figura 4.1	Tela do programa <i>Horizon</i> , que monitora o voo com o MicroPilot.	38
Figura 4.2	Localização geográfica dos sítios experimentais.	40
Figura 4.3	Sítio experimental de Balsa Nova/PR.	42
Figura 4.4	Sítio experimental de Tijucas do Sul/PR.	44
Figura 4.5	Estação de monitoramento de superfície.	46
Figura 4.6	<i>Aerolemma-1</i> em fabricação e em seus primeiros testes.	47
Figura 4.7	Histerese na temperatura medida com sensor dentro da fuselagem do <i>Aerolemma-1</i>	50
Figura 4.8	Primeira câmera instalada na para transmissão de vídeo.	51
Figura 4.9	Detalhes dos sensores fora da aeronave.	52
Figura 4.10	Medição de temperatura com efeito de histerese bastante reduzido, com sensor fora da fuselagem do <i>Aerolemma-1</i>	52

Figura 4.11 Segunda câmara instalada e antena especial para transmissão de vídeo).	53
Figura 4.12 <i>MicroPilot</i> instalado no <i>Aerolemma-1</i> 25/10/2007.	53
Figura 4.13 <i>Aerolemma-1</i> após colisão do dia 20/11/2007.	54
Figura 4.14 Outros aeromodelos utilizados para testes do piloto automático (a) e de catapulta (b).	55
Figura 4.15 <i>Aerolemma-2</i> sendo preparado para voo em pista de grama.	56
Figura 4.16 <i>Aerolemma-3</i> sendo equipado em laboratório e em procedimento de decolagem por catapulta.	58
Figura 4.17 NOTAM emitida para os experimentos em Tijucas do Sul.	59
Figura 5.1 Perfis de temperatura potencial e umidade em 05/03/2009–13h15. Na figura da esquerda, o perfil mais quente representa a subida do VANT.	63
Figura 5.2 Variação no tempo da altura da VANT (h), umidade específica (q), temperatura potencial virtual (θ_v) e temperatura (T) para o mesmo voo da figura 5.1.	65
Figura 5.3 Perfis de temperatura e umidade para duas medições sequenciais: (a) em 22/05/2009: 9h30 – com histerese; (b) 10h15 – sem histerese (após retirada da capa protetora do sensor).	66
Figura 5.4 Perfil de temperatura potencial virtual e umidade da atmosfera em 22/05/2009: 11h00.	67
Figura 5.5 Perfil de temperatura potencial virtual e umidade da atmosfera em 22/05/2009:	

11h30.	68
Figura 5.6 Série temporal da altura h , umidade específica q , temperatura potencial vidual θ_v e temperatura T em 11/08/2009: 11h00.	69
Figura 5.7 Sensor HMP50 instalado dentro de um cilindro de proteção.	69
Figura 5.8 Comparação entre o perfil do voo (10h15) e da radiossondagem (9h00), para o dia 29/04/2009.	71
Figura 5.9 Comparação entre o perfil do voo (10h00) e da radiossondagem (9h00), para o dia 19/06/2009.	72
Figura 5.10 Comparação entre o perfil do voo (12h30) e da radiossondagem (9h00), para o dia 19/06/2009.	73
Figura 7.1 Comparação dos valores estimados de H com a parametrização TE73 (H_{TE73}) e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em $W m^{-2}$. ..	95
Figura 7.2 Comparação dos valores estimados de H com a parametrização ZI75 (H_{ZI75}) e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em $W m^{-2}$	96
Figura 7.3 Comparação dos valores estimados de H com a parametrização ZT77 (H_{ZT77}) e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em $W m^{-2}$. ..	97
Figura 7.4 Comparação dos valores estimados de H com a solução em quadratura (H_{QUAD}) e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em $W m^{-2}$. ..	98
Figura 7.5 Comparação dos valores estimados de H com o modelo integral sem considerar a dinâmica de $\Delta\theta$ (H_{SEMD}), usando $c_F = 0,2$ e $A = 2,5$, e com dados medidos do experimento FIFE(H_{FIFE}). Valores em $W m^{-2}$	100

Figura 7.6	Comparação dos valores estimados de H com o modelo integral sem considerar a dinâmica de $\Delta\theta$ (H_{SEMD}), usando $c_F = 0, 1$ e $A = 2, 5$, e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em $W m^{-2}$	101
Figura 7.7	Comparação dos valores estimados de H com o modelo integral sem considerar a dinâmica de $\Delta\theta$ (H_{SEMD}), usando $c_F = 0, 1$ e $A = 2, 5$, e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Neste caso o modelo integral foi evoluído com h calculado com base no balanço de energia na ZE ao invés da base da inversão. Valores em $W m^{-2}$	102
Figura 7.8	Comparação dos valores estimados de H com o modelo integral sem considerar a dinâmica de $\Delta\theta$ (H_{SEMD}), usando $c_F = 0, 0$ e $A = 0, 0$, e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em $W m^{-2}$	102
Figura 7.9	Perfis de radiossondagens medidas e ajustadas para o dia 26/06/1987.	105
Figura 7.10	Perfis de radiossondagens medidas e ajustadas para o dia 03/06/1987.	106
Figura 7.11	Perfis de radiossondagens medidas e ajustadas para o dia 01/06/1987.	107
Figura 7.12	Perfis de radiossondagens medidas e ajustadas para o dia 05/06/1987.	108
Figura 7.13	Perfis de radiossondagens medidas e ajustadas para o dia 09/08/1987.	109

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Principais VANTs em uso na área de micrometeorologia. Adaptado de Dias et al. (2012).	30
Tabela 4.1	Características do <i>Aerolemma-1</i> .	48
Tabela 4.2	Características dos voos do <i>Aerolemma-1</i> .	48
Tabela 4.3	Sensores a bordo do <i>Aerolemma-1</i> .	51
Tabela 4.4	Características do <i>Aerolemma-2</i> .	55
Tabela 4.5	Características dos voos do <i>Aerolemma-2</i> .	55
Tabela 4.6	Características do <i>Aerolemma-3</i> .	57
Tabela 4.7	Características dos voos do <i>Aerolemma-3</i> .	57
Tabela 4.8	Sensores a bordo do <i>Aerolemma-3</i> .	58
Tabela 5.1	Perfilamentos realizadas com o <i>Aerolemma-3</i> .	62
Tabela 5.2	Alturas máximas para cada voo (ver tabela 5.1).	64
Tabela 5.3	Evolução da CLA durante a manhã de 22/05/2009.	67

Tabela 5.4	Padrão para agrupamento de dados das radiossondagens.	70
Tabela 6.1	Valores das constantes empíricas c_T , c_M , c_F e c_D utilizadas na parametrização da equação da energia cinética da turbulência (Adaptado de Villani et al. (2005)).	85
Tabela 7.1	Período de dados de radiossondagens disponíveis do experimento FIFE. ...	88
Tabela 7.2	Estações de fluxos de covariâncias do experimento FIFE utilizadas neste trabalho.	89
Tabela 7.3	Pares de radiossondagens do experimento FIFE utilizadas neste trabalho. ...	90

Lista de Siglas

CLA	Camada-Limite Atmosférica
SODAR	<i>Sonic Detection and Ranging</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
CLC	Camada-Limite Convectiva
CS	Camada Superficial
ZE	Zona de Entranhamento
AL	Atmosfera Livre
CLE	Camada-Limite Estável
CR	Camada Residual
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
CM	Camada Misturada
RASS	<i>Radio Acoustic Sounding System</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CM	Camada Misturada
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
IFC	<i>Intensive Field Campaigns</i>

Lista de Símbolos

θ	temperatura potencial
p	pressão atmosférica
T	temperatura
p_0	pressão no nível de referência
c_p	calor específico do ar úmido a pressão constante
\mathfrak{R}	constante do gás
Γ_d	taxa de variação adiabática do ar seco
z	altura vertical em relação à superfície
c_{pd}	calor específico do ar seco a pressão constante
T_v	temperatura virtual
q_a	umidade específica do ar
θ_v	temperatura potencial virtual
a	valor instantâneo da variável genérica a
\bar{a}	valor médio da variável genérica a
a'	flutuação em torno da média da variável genérica a
x_i	coordenadas cartesianas em notação indicial
$u_i(x_i)$	componentes da velocidade do vento nas direções x_i em notação indicial
t	tempo
f_c	parâmetro de <i>Coriolis</i>
u_g	velocidade do vento geostrófico em x
v_g	velocidade do vento geostrófico em y
ρ	densidade do ar
p	pressão atmosférica
S_q	termo fonte de umidade

L_v	calor latente de vaporização
E	taxa de evaporação
Q_j^*	radiação líquida na direção j
e	energia cinética da turbulência específica
g	aceleração da gravidade
w	velocidade vertical do vento
u	velocidade do vento na direção horizontal x
ε	dissipação de energia cinética da turbulência
H	fluxo de calor sensível
LE	fluxo de calor latente
G	fluxo de calor no solo
R_s^\downarrow	irradiância solar incidente
R_s^\uparrow	irradiância solar refletida
R_a^\downarrow	irradiância atmosférica incidente
R_a^\uparrow	irradiância atmosférica refletida
R_e^\uparrow	irradiância emitida pela superfície
τ	fluxo de quantidade de movimento
$\overline{a'b'}$	covariância entre as flutuações de a e b
u_*	escala turbulenta de velocidade
θ_*	escala turbulenta de temperatura
q_*	escala turbulenta de umidade específica
w_*	escala turbulenta de velocidade convectiva
H_v	fluxo de calor sensível virtual
Δu	diferença de velocidade do vento na Camada-Limite Convectiva e na Atmosfera Livre
h	altura da CLC
L	comprimento de estabilidade de Obukhov

Resumo

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um veículo aéreo não-tripulado (VANT) para monitoramento da camada-limite atmosférica (CLA), com medições do perfil de temperatura, umidade e pressão. O sistema tem capacidade de contribuir em diversas aplicações em engenharia ambiental, meteorologia, hidrologia e qualidade do ar. A consolidação do VANT compreendeu mais de três anos de testes em campo e laboratório, com três aeronaves diferentes e diversos equipamentos utilizados até se chegar ao *Aerolemma-3*: um conjunto aeronave-sensores capaz de fornecer voos seguros e medir o perfil atmosférico em alta resolução espacial e temporal. O desenvolvimento experimental envolveu soluções de diversos problemas, tais como tamanho e peso das aeronaves, espaço e capacidade de carga para instalação de equipamentos, comunicação da aeronave com a estação-base, guiagem remota e autônoma, influências da fuselagem e do motor do VANT nas medições, disposição e tempo de resposta dos sensores. Quesitos de segurança e autorizações para os voos foram outros desafios. Os perfis de temperatura e umidade obtidos pelo VANT sugeriram o uso invertido dos modelos integrais para se obter o fluxo de calor sensível superficial. Na falta de boas medições de fluxos superficiais no sítio experimental do VANT, recorreu-se aos dados do FIFE (*First International Satellite Land Surface Climatology Project Field Experiment*), experimento micrometeorológico intensivo realizado nos Estados Unidos nos anos de 1987 e 1989. Desse experimento foram utilizados dados de radiossondagens e medições superficiais de fluxos de covariâncias em quantidade suficiente para avaliar o desempenho do modelo integral invertido. Foram avaliadas diversas parametrizações a fim de indicar as potencialidades e restrições quanto ao uso de dados do perfil da CLA para cálculo do fluxo superficial.

Palavras-chave: veículo aéreo não tripulado (VANT), camada-limite atmosférica (CLA), camada-limite convectiva (CLC), fluxo de calor sensível.

Abstract

This work presents the development of an unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring the boundary-layer meteorology (BLM), with measurements of temperature, humidity and pressure profiles. The system has the capacity to contribute in several areas, such as environmental engineering, meteorology, hydrology and air quality. The consolidation of UAV took more than three years of testing in field and laboratory with three different aircraft and a lot of equipments used to get to the *Aerolemma -3*: an aircraft-sensors system able to provide safe flights and measure atmospheric profile in high spatial and temporal resolutions. Experimental development involved solutions to various problems, such as the size and weight of the aircraft, space and load capacity for installation of equipment, aircraft communication with the base station, remote and autonomous guidance, the fuselage of UAV and its engine in measurements and sensor array response time. Questions of security and the authorization for the flights were other challenges. Humidity and temperature profiles obtained by UAV suggested the inverted use of integral model to obtain the surface sensible heat flux. In the absence of good measurements of surface flux in the experimental site of the UAV, we used a data set from FIFE (*First International Satellite Land Surface Climatology Project Field Experiment*), intensive micrometeorological experiment conducted in the United States in 1987 and 1989. From this experiment we used radiosonde data and surface measurements of covariance flux sufficient to evaluate the performance of the integral model. Several parameterization were evaluated to indicate the potential and restrictions on the use of BLM profile data to calculate the surface flux.

Keywords: unmanned aerial vehicle (UAV), boundary-layer meteorology (BLM), convective boundary-layer (CBL), sensible heat flux.

1 Introdução

A camada-limite atmosférica (CLA) é a porção mais baixa da troposfera, com espessura variável atingindo geralmente 1000–2000 m de altura, em latitudes médias, no período vespertino. Nesta região ocorrem os principais fenômenos micrometeorológicos que são importantes para a compreensão de processos de poluição atmosférica, hidrologia e meteorologia.

A estrutura da CLA varia principalmente com a evolução do ciclo diurno de aquecimento e resfriamento da superfície e pela ação mecânica (atrito) do vento. A sua altura pode aumentar em torno de dez vezes num intervalo de algumas horas. A rápida variação das características da CLA indica que o seu estudo detalhado deve ser feito em escalas de tempo menores do que uma hora (STULL, 1988; GARRATT, 1994; ARYA, 2001).

Estudos da CLA geralmente são feitos a partir de dados superficiais obtidos de torres micrometeorológicas (operacionais ou experimentais), com registro das informações em escala compatível. Entretanto, são importantes também informações do perfil atmosférico, mais difíceis e caras de se obter na escala horária, mesmo em trabalhos de pesquisa.

A dificuldade na execução de medições do perfil e a necessidade de informações da dinâmica da CLA exigem o uso de modelos de crescimento da CLA, para aplicações em micrometeorologia e qualidade do ar. Quando possível esses modelos devem ser testados e calibrados, com base em comparações de resultados com medições adequadas. Por isso, geralmente os estudos da dinâmica da CLA envolvem o tratamento dos aspectos observacionais e de modelagens.

1.1 Definição do problema e motivação

Medições do perfil atmosférico são realizadas operacionalmente com uso de radiossondas, que consistem em balões meteorológicos equipados com sensores e equipamentos de monitoramento capazes de atingir alturas superiores a 30 km, na estratosfera. Ainda que as radiossondas possam monitorar detalhadamente a atmosfera, elas são tipicamente utilizadas para medir temperatura, umidade, pressão e vento em níveis pré-determinados e em níveis significativos, quando ocorre alteração brusca no gradiente de alguma variável monitorada.

Esse método é utilizado rotineiramente há algumas décadas, para fins de monitoramento e previsão meteorológica e apoio às atividades aéreas. Os balões são lançados geralmente uma ou duas vezes ao dia (0 GMT e 12 GMT), normalmente de aeroportos. No Brasil, há em torno de 50 estações de radiossondagens cadastradas.

É possível fazer medições do perfil atmosférico com maior resolução temporal e espacial na atmosfera, mesmo com uso de radiossondas. Mas como normalmente não é possível recuperar os sensores a bordo do balão, o custo dessas medições torna-se alto para medições em escala de tempo de uma hora ou menos.

Uma alternativa às radiossondagens é usar balões cativos, os quais são içados e, por isso, não há o problema de perda de sensores. Entretanto, há limitações operacionais para esse tipo de sistema para o monitoramento de toda a extensão da CLA.

Torres meteorológicas extremamente altas podem superar 200 m de altura e possibilitam a medição da CLA noturna, mas não são capazes de medir a extensão da CLA em condições diurnas, que chegam a altura superiores a 1 km.

Aviões tripulados e equipados com sensores podem também auxiliar no levantamento de dados da CLA, porém com alto custo operacional.

Outras formas de medição envolvem o uso de sensoriamento remoto, tais como SODAR (*Sonic Detection and Ranging*), LIDAR (*Light Detection and Ranging*) e RADAR (*Radio Detection and Ranging*). Esses equipamentos são caros e muitas vezes apresentam dificuldades

operacionais.

Em função das vantagens e limitações de cada sistema de monitoramento, é recomendado que os estudos da CLA sejam feitos com base na composição de informações obtidas por diferentes plataformas de medição (HÄGELI et al., 2000; ENGELBART; STEINHAGEN, 2001; PIRINGER, 2001).

Nesse contexto, a motivação original deste trabalho de pesquisa foi o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da CLA por meio de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), que fosse capaz de fazer medições do perfil atmosférico até pelo menos 1,5km de altura, para estudos de sua estrutura e dinâmica.

O sistema foi desenvolvido durante 3 anos, até se obter uma configuração adequada para medições da CLA. O sistema final foi batizado como *Aerolemma-3* e as etapas de desenvolvimento e resultados obtidos são objeto desta tese.

Como existe demanda muito grande de dados da altura da CLA para uso em modelos de dispersão de poluentes, por exemplo, Malheiros e Dias (2004) propuseram modelos simples para o crescimento da CLA urbana, os quais se baseiam no perfil de temperatura de apenas uma radiossondagem ao dia (do período da manhã) e estimam essa altura apenas com base na variação da temperatura na superfície e conceitos de estabilidade atmosférica (STULL, 1991).

Outros modelos de crescimento da CLA baseiam-se em formulações mais detalhadas e necessitam de dados do perfil da atmosfera e de fluxos superficiais (VILLANI et al., 2005). A partir da equação do balanço de energia cinética turbulenta e em medições apenas da temperatura média na CLA e do gradiente da temperatura na atmosfera livre, os modelos tentam reproduzir o perfil de vento, umidade, temperatura e outros escalares na atmosfera.

Com base em dados detalhados da CLA, esses modelos de crescimento podem ser testados e validados a partir de medições detalhadas do perfil da CLA, que foi a primeira motivação do desenvolvimento do VANT que será mostrado.

Foram feitas campanhas com o *Aerolemma-3* para medição dos perfis verticais de tem-

peratura, umidade e pressão, que permitiram o desenvolvimento de diversos estudos, tais como avaliação de flutuações de temperatura na CLA e seus espectros, cálculo do fluxo de entranhamento e avaliação de modelos de crescimento da altura da CLA (GONÇALVES et al., 2006; MALHEIROS et al., 2009; DIAS et al., 2012; FREIRE; DIAS, 2013).

Além do detalhamento desses estudos realizados no contexto desta tese, o presente trabalho mostra mais uma possível aplicação dos perfis obtidos com o VANT: um método de cálculo do fluxo de calor sensível superficial regional, com base na inversão do modelo integral de crescimento da CLA. Entretanto, na ausência de dados superficiais detalhados, foi necessário aplicar a metodologia para algum sítio experimental que já contasse com essas medições, o que motivou o uso dos dados do experimento FIFE.

1.2 Objetivos da pesquisa

Este trabalho mostra as etapas de desenvolvimento de um VANT para monitoramento em alta resolução espacial e temporal do perfil de temperatura, umidade e pressão, capaz de atingir mais de 1500m de altura, com baixo custo operacional, para estudos micrometeorológicos da CLA.

A tese também contempla a aplicação de um método de cálculo do fluxo superficial de calor sensível com base em informações detalhadas do perfis verticais da CLA. O modelo integral invertido para cálculo de fluxo superficial e a sua aplicabilidade são avaliados a partir de testes do modelo com dados do experimento FIFE

Este estudo está concentrado em condições instáveis, ou seja, da camada-limite convectiva (CLC), pelos seguintes motivos:

- os voos com o VANT foram realizados apenas em período diurno; e
- o modelo integral de crescimento da CLA utilizado para calcular o fluxo de calor sensível é válido apenas para as condições convectivas.

1.3 Estrutura da tese

Esta tese está estruturada em 8 capítulos. Após o capítulo introdutório, o capítulo 2 traz os conceitos fundamentais e expõe algumas questões básicas sobre a estrutura e dinâmica da CLA e diversas definições. O capítulo 3 traz uma revisão sobre os avanços nos métodos de monitoramento da CLA e do recente uso de VANTs em micrometeorologia. O capítulo 4 mostra todo o desenvolvimento experimental dos diferentes VANTs. Os resultados obtidos pelo *Aerolemma-3* estão descritos no capítulo 5. O capítulo 6 contém uma revisão sobre o modelo integral da CLA e das suas parametrizações, além de avaliar sua formulação para uso no cálculo de fluxo superficial de calor sensível. O capítulo 7 contém a verificação do modelo integral para cálculo do fluxo de calor sensível. Por fim, no capítulo 8 são apresentadas as conclusões do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

2 Conceitos Fundamentais da Física da Camada-Limite Atmosférica

Este capítulo aborda alguns conceitos básicos teóricos da CLA que úteis para os capítulos subsequentes. Inicialmente é apresentado um resumo sobre a estrutura da CLA e em seguida são mostradas as equações de conservação, uma vez que elas representam a dinâmica da CLA e serão parcialmente utilizadas na modelagem do fluxo de calor sensível superficial.

É apresentada também a equação da energia cinética da turbulência, importante para a compreensão dos processo turbulentos na CLA, com avaliação dos termos de produção, dissipação e redistribuição de energia cinética da turbulência na atmosfera. A produção de turbulência de origem térmica e mecânica ocorre em grande parte na superfície e, por isso, o capítulo também traz a equação do balanço de energia na superfície com um abordagem sobre os fluxos superficiais de calor sensível e calor latente.

O presente trabalho consiste na obtenção e análise de dados monitorados com VANTs, cujas medições foram feitas em período diurno e sem ocorrência de precipitação. Por isso, o foco do estudo é sobre as condições diurnas da CLC, geralmente instáveis, ainda que alguns vôos tenham sido feitos próximos aos períodos de transição (início e final do dia), que apresentam condições neutras ou estáveis na camada-limite atmosférica.

2.1 A estrutura e dinâmica da CLA

A camada-limite atmosférica é a região mais baixa da troposfera que se altera ao longo do ciclo diário, respondendo aos forçantes superficiais de origem térmica e dinâmica. A alteração da estrutura e dinâmica da CLA é resultado de fatores que agem em diferentes escalas

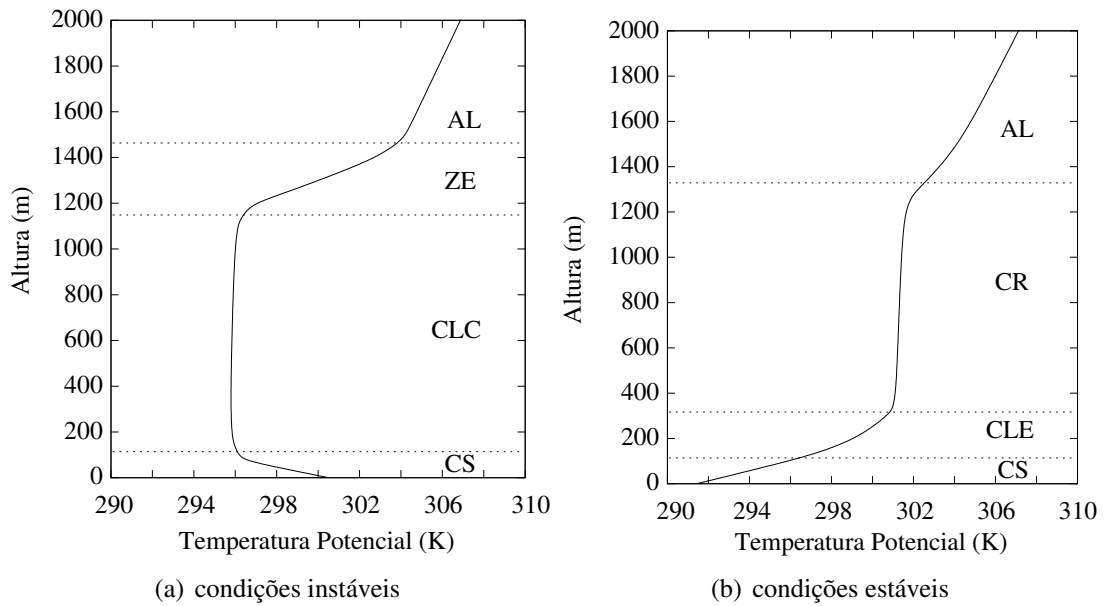


Figura 2.1: Variação da temperatura potencial na camada limite atmosférica para situações típicas de atmosfera instável (convectiva) e estável.

espaciais e temporais.

Segundo Orlanski (1975) *apud* Stull (1988), considera-se que existe alteração significativa da CLA em escala de tempo de uma hora e a escala espacial horizontal é de até 2000 m. Na escala vertical, a CLA é caracterizada também nos primeiros 2000 m da atmosfera. A variabilidade das condições dos forçantes atmosféricos e da superfície podem alterar a estrutura e dinâmica da CLA nessas escalas micrometeorológicas (BUSINGER, 1982). Os perfis de temperatura, umidade, vento e fluxos de energia são também variáveis, respondendo às alterações dinâmicas da CLA.

O perfil de temperatura potencial é o mais utilizado para avaliação da estrutura da CLA. A figura 2.1(a) apresenta o perfil idealizado de θ para situações convectivas diurnas. Nessas condições, observa-se a camada superficial (CS) em contato com o solo, a camada-limite convectiva, que apresenta um perfil de θ praticamente constante, e a zona de entranhamento (ZE), que é a camada da inversão térmica. Acima da CLA encontra-se a atmosfera livre (AL), região estratificada, onde a intensidade da turbulência é muito menor, praticamente laminar.

A figura 2.1(b) mostra o perfil típico em situações estáveis, com a camada-limite estável (CLE) e a camada residual (CR) abaixo da AL (STULL, 1988).

Em condições reais, a altura da CLA é variável ao longo do dia, podendo ter altura inferior a 100 m durante a noite e superior a 2000 m durante o dia. A condição de estabilidade e presença (ou não) das sub-camadas (figura 2.1) são fundamentais na determinação da altura da CLA. Conforme será visto na seção 3.5, há outras dificuldades na interpretação dos perfis atmosféricos da CLA, que muitas vezes só são resolvidas avaliando-se simultaneamente mais de um parâmetro ou utilizando-se mais de um método de medição.

2.2 Temperatura potencial e temperatura potencial virtual

É conveniente introduzir o conceito de temperatura potencial θ , que se mantém constante quando uma parcela de ar seco se eleva ou desce adiabaticamente. A partir da lei dos gases ideais e de considerações sobre um processo adiabático reversível, pode-se definir

$$\theta \equiv T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\mathfrak{R}/c_p}, \quad (2.1)$$

que representa a temperatura de uma parcela de ar seco à pressão p e temperatura T sob efeito de expansão ou compressão adiabática para a pressão de referência p_0 (geralmente 1000 hPa). Na equação 2.1, c_p é o calor específico do ar úmido a pressão constante e \mathfrak{R} é a constante do gás. Portanto, θ é uma grandeza conservativa para transformações adiabáticas.

Na CLA a equação 2.1 pode ser aproximada por

$$\theta \cong T - \Gamma_d z \quad (2.2)$$

onde $\Gamma_d = -g/c_{pd} = -9,8 \text{ K km}^{-1}$ representa a taxa de variação adiabática do ar seco, sendo z a altura vertical em relação ao nível de referência e c_{pd} o calor específico do ar seco a pressão constante.

Pode ser também introduzido o conceito de temperatura virtual T_v , que leva em conta o efeito da umidade atmosférica e que para os casos não saturados é dada por

$$T_v = T(1 + 0,61q_a), \quad (2.3)$$

onde q_a é a umidade específica do ar, definida como a razão da massa de vapor d'água pela massa do ar úmido.

Analogamente, a temperatura potencial virtual θ_v é

$$\theta_v = \theta(1 + 0,61q_a). \quad (2.4)$$

Como o peso molecular da água é menor do que o do ar, tem-se que $T_v > T$ e $\theta_v > \theta$ (BRUTSAERT, 1982).

2.3 Equações governantes

De maneira geral, a mecânica dos fluidos é governada pelas equações de Navier-Stokes que, segundo Frisch (1995), provavelmente contêm toda a informação sobre os escoamentos.

Nieuwstadt e Duynkerke (1996) afirmam que o estudo da CLA é equivalente à análise da turbulência atmosférica. Na CLA, as variáveis meteorológicas se ajustam em função das condições de contorno da atmosfera livre e da superfície da terra. A turbulência é a principal fonte de transporte e mistura de energia, quantidade de movimento e escalares na atmosfera.

O tratamento das equações governantes da CLA na teoria da turbulência pode ser feito da maneira clássica por meio da separação dos termos em diferentes escalas. Nas grandes escalas são representados os grandes vórtices, que são associados ao comportamento médio do escoamento. Nas pequenas escalas são representadas as flutuações do escoamento. Segundo o conceito de cascata de energia de *Kolmogorov*, a energia das grandes escalas é transmitida aos pequenos vórtices até que ela seja dissipada pela viscosidade do fluido (NIEUWSTADT; DUYNKERKE, 1996).

2.3.1 Decomposição de Reynolds e aproximações para o fluxo médio

A separação dos efeitos médios e turbulentos de um escoamento pode ser feita a partir da decomposição de Reynolds, que sugere que o valor local e instantâneo de uma variável a pode ser decomposto em um valor médio \bar{a} e uma perturbação (flutuação) a' :

$$a = \bar{a} + a'. \quad (2.5)$$

Estudos de turbulência na CLA geralmente baseiam-se em medições com sensores de alta frequência. Na prática, medições eulerianas (feitas em torres, por exemplo) podem ser representadas por uma média temporal \bar{a} . Conhecendo seu valor instantâneo, é possível determinar qual é a flutuação turbulenta a' do escoamento. Detalhes sobre a teoria e os postulados de decomposição de Reynolds podem ser encontrados em referências clássicas sobre o tema (como, por exemplo, em Stull (1988)).

A aplicação da decomposição de Reynolds e outras hipóteses permitem representar o escoamento turbulento com suas características médias.

Nos problemas de camada-limite atmosférica, nas escalas que ocorrem os fenômenos e sob a ótica das *aproximações de Boussinesq*, as equações de conservação podem ser escritas na forma mostrada a seguir (BUSINGER, 1982; STULL, 1988).

As equações das variáveis médias em fluxo turbulento apresentadas abaixo seguem a notação tensorial, conforme Stull (1988).

A equação de conservação da massa, pode ser expressa como

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2.6)$$

onde, em notação indicial, x_i representa as 3 coordenadas cartesianas (x , y e z) e $u_i(x_i)$ as respectivas componentes do campo de velocidade.

De acordo com as hipóteses que representam o escoamento na CLA e aplicando a

decomposição de Reynolds e as aproximações de *Boussinesq* (STULL, 1988), as equações de quantidade de movimento para as variáveis médias do fluxo turbulento são

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}}{\partial x_j} = -f_c(\bar{v}_g - \bar{v}) - \frac{\partial \overline{u'_j u'}}{\partial x_j} \quad (2.7)$$

e

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} = f_c(\bar{u}_g - \bar{u}) - \frac{\partial \overline{u'_j v'}}{\partial x_j}, \quad (2.8)$$

onde t é o tempo e f_c é o parâmetro de *Coriolis*. u_g e v_g são as componentes horizontais do vento geostrófico, que são definidas pelos respectivos gradientes horizontais de pressão:

$$\bar{u}_g = -\frac{1}{f_c \bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \quad (2.9)$$

e

$$\bar{v}_g = \frac{1}{f_c \bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x}. \quad (2.10)$$

onde ρ é a densidade do ar e p é a pressão atmosférica. Para a conservação da umidade na atmosfera a equação é

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_j} = \frac{1}{\bar{\rho}} S_q - \frac{\partial \overline{u'_j q'}}{\partial x_j}, \quad (2.11)$$

onde S_q é o termo fonte de umidade.

A equação de conservação de energia interna pode ser escrita como

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\bar{\rho} c_p} \left[L_v E + \frac{\partial Q_j^*}{\partial x_j} \right] - \frac{\partial \overline{u'_j \theta'}}{\partial x_j}, \quad (2.12)$$

onde L_v é o calor latente de vaporização, E é a taxa de evaporação e Q_j^* é a radiação líquida na

direção j .

Nas equações 2.7 a 2.12 os últimos termos representam a divergência do fluxo turbulento. Os pares de flutuações (como, por exemplo, $u'_j\theta'$) mostram a importância do tratamento estatístico e da presença de termos turbulentos mesmo na representação do escoamento médio. Nas equações de conservação de quantidade de movimento (equações 2.7 e 2.8), os termos turbulentos representam a influência do tensor de tensões no movimento médio.

2.3.2 Produção, distribuição e dissipação de energia cinética da turbulência

As equações da seção anterior representam o escoamento médio. Entretanto, a decomposição de Reynolds gera também um conjunto de equações que descrevem o aspecto estatisticamente turbulento da atmosfera, além das equações apresentadas para o estado médio de escoamentos.

Uma das equações mais importantes resultantes da aplicação da decomposição é a da energia cinética da turbulência (ECT), também muito útil para entender a dinâmica da CLA. A energia cinética da turbulência específica (e) pode ser escrita como

$$\bar{e} = \frac{1}{2} \left(\overline{u_i'^2} \right). \quad (2.13)$$

Se essa definição for aplicada às equações de movimento do escoamento turbulento, considerando o sistema de coordenadas alinhado com o vento médio e homogeneidade horizontal, chega-se à seguinte equação de balanço de energia cinética da turbulência (STULL, 1988):

$$\frac{\partial \bar{e}}{\partial t} = \frac{g}{\theta} \overline{(w'\theta')} - \overline{w'u'} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{w'e'} + \frac{\overline{w'p'}}{\rho} \right) - \varepsilon. \quad (2.14)$$

Nesta equação g é a aceleração da gravidade, w é a velocidade vertical do vento, u é a velocidade do vento na direção horizontal x e ε é a dissipação de energia cinética da turbulência. O primeiro termo apresenta a variação local da ECT. O segundo termo é a produção de turbulência pelo processo de convecção, que está relacionado ao balanço de energia na superfície. O

terceiro termo representa a produção de energia originada pelo efeito de cisalhamento do vento. O quarto termo representa o transporte de turbulência e a sua redistribuição por flutuações de pressão. O último termo representa a dissipação da energia.

No termo convectivo, $\overline{w'\theta'}$ representa o fluxo de calor sensível, que parcialmente é originado na superfície. No termo de cisalhamento, $\overline{u'w'}$ é o fluxo de quantidade de movimento. O termo a dissipação de energia ε , causado pela viscosidade, caracteriza a equação da ECT como não conservativa, o que significa que a turbulência na CLA só é mantida se houver processos que forneçam energia, que só podem ter origem nos termos de produção térmica ou mecânica (GARRATT, 1994).

A equação da ECT complementa o sistema composto pelas equações 2.6 – 2.12. Esta equação da ECT é fundamental na avaliação de modelos da CLC. Ela será utilizada adiante com parametrização local na zona de entranhamento para fechamento do sistema de equações do modelo integral de crescimento da CLC.

2.4 O balanço de energia na superfície

Conforme visto acima, os fluxos superficiais turbulentos de calor sensível H e calor latente LE são parâmetros importantes na dinâmica da CLA. O balanço de energia da superfície relaciona H e LE em função da distribuição da radiação líquida da superfície R_l e do fluxo de calor no solo G .

A radiação líquida é definida pelo balanço de radiação de ondas curtas e longas na superfície. As parcelas do balanço são: irradiância solar incidente (R_s^\downarrow), irradiância solar refletida (R_s^\uparrow), irradiância atmosférica incidente (R_a^\downarrow), irradiância atmosférica refletida (R_a^\uparrow) e irradiância da superfície (R_e^\uparrow).

A equação do balanço é

$$R_l = R_s^\downarrow - R_s^\uparrow + R_a^\downarrow - R_a^\uparrow - R_e^\uparrow. \quad (2.15)$$

O saldo do balanço de radiação representa a energia disponível na superfície. Esta energia é redistribuída em função das condições do solo e da atmosfera. Os processos de evaporação necessitam de energia, que é representada pelo fluxo de calor latente LE . O ar em contato com a superfície, quando em processo de convecção, transporta parte da energia da superfície em forma de fluxo de calor sensível H . O restante da energia é utilizada para aquecer a própria superfície (G). Portanto, o balanço de energia, sem considerar o efeito da biomassa, pode ser expresso por:

$$G = R_l - H - LE. \quad (2.16)$$

Neste trabalho a parcela de maior importância é H . Geralmente este é um parâmetro de entrada dos modelos de evolução da CLA, por ser possível sua determinação por meio de medições micrometeorológicas de estações superficiais.

A análise turbulenta dos fluxos é realizada com a associação de flutuações, onde as variáveis relevantes são as flutuações de velocidade vertical do vento w' , velocidade horizontal (u'), temperatura potencial (θ') e umidade específica (q'). Definem-se os fluxos superficiais de quantidade de movimento τ , calor sensível H e umidade E da seguinte forma:

$$\tau = -\rho \overline{w'u'} = \rho u_*^2, \quad (2.17)$$

$$H = \rho c_p \overline{w'\theta'} = \rho c_p u_* \theta_*, \quad (2.18)$$

$$E = \rho \overline{w'q'} = \rho u_* q_*, \quad (2.19)$$

onde $\overline{a'b'}$ - representa a covariância entre as flutuações das variáveis genéricas a e b . As equações acima definem também as escalas turbulentas de velocidade u_* , de temperatura θ_* e de umidade específica q_* . É conveniente também definir a escala turbulenta de velocidade convectiva w_* :

$$w_* = \left[\frac{gh}{\theta_v} \overline{w'\theta'_{v,s}} \right]^3, \quad (2.20)$$

onde h é a altura da CLA.

O presente trabalho utiliza cálculo do fluxo de calor sensível virtual na superfície (H_v), que é também chamado de fluxo por empuxo (*buoyancy*), pode ser calculado diretamente das flutuações de w' e θ'_v na obtenção direta de $\overline{w'\theta'_v}$ ou pode ser convertido a partir da equação (KUSTAS; BRUTSAERT, 1987)

$$\overline{w'\theta'_v} = \overline{w'\theta'} + 0,61T(\overline{w'q'}). \quad (2.21)$$

3 Sistemas de Monitoramento da CLA

O monitoramento meteorológico remonta ao século XVII, época das invenções do termômetro, higrômetro e barômetro. Entretanto, a compreensão dos processos físicos na camada-limite atmosférica aconteceu após as medições sistemáticas da atmosfera, a partir do século XIX.

As primeiras medições eram feitas apenas perto da superfície, dando origem às estações meteorológicas montadas em torres. A evolução em medições do perfil atmosférico ocorreram com a operacionalização das radiossondagens e aumento do uso de outros tipos de perfiladores e de técnicas de sensoriamento remoto. Uma breve revisão sobre essa evolução é mostrada a seguir, com maior ênfase aos VANT.

3.1 Medições com torres micrometeorológicas

As estações superficiais de micrometeorologia são montadas sobre torres. Ainda que as maiores torres não sejam altas o suficiente para medir toda a extensão da CLA, elas podem ser equipadas para a medição dos primeiros 300 m de altura possibilitando o monitoramento da camada superficial e da camada-limite estável.

Geralmente as torres permitem estudos específicos da estrutura da camada-limite noturna. Em condições convectivas, entretanto, a medição de toda a camada é inviável, uma vez que o topo da CLC atinge alturas maiores do que 1 km (MAHRT; VICKERS, 2002).

A evolução da CLA depende do balanço de energia na superfície, o que faz com que a medição de fluxos superficiais em torres micrometeorológicas seja fundamental para os estudos

micrometeorológicos, mesmo quando são utilizadas outras plataformas de medição (STULL, 1988; BURBA; ANDERSON, 2010).

3.2 Medições diretas (*in-situ*) do perfil atmosférico

O monitoramento do perfil vertical da atmosfera é realizado desde o início do século XIX com uso de pipas. Por volta da virada do século XX, as medições com uso desta técnica eram quase diárias em muitos observatórios em todo o mundo. As informações coletadas com pipas permitiram os primeiros estudos sistemáticos da atmosfera livre e forneceram os primeiros elementos para o desenvolvimento de técnicas de coleta de dados usando radiossondas, aviões e posteriormente satélites (BALSLEY; FREHLICH, 1998).

Considera-se que os avanços mais significativos no monitoramento atmosférico aconteceram após a invenção da radiossonda. Embora a evolução do monitoramento atmosférico tenha ocorrido em diversas partes do mundo, atribui-se a denominação radiossonda aos franceses Robert Bureau e Pierre Idrac no final dos anos 1920 (PARLANGE; BRUTSAERT, 1990).

As medições verticais de longo alcance permitiram experimentos observacionais que colaboraram com o desenvolvimento da meteorologia, especialmente dos conceitos sobre a estrutura atmosférica e os processos de fluxos na CLA.

Rapidamente a radiossondagem se transformou no padrão para medições do perfil de temperatura, umidade e vento (PARLANGE; BRUTSAERT, 1990). Hoje, com vários recursos adicionais, novos sensores, sistema de comunicação e transmissão de dados e localização geográfica, esta é ainda a metodologia padrão para o monitoramento de ar superior.

A rede mundial de monitoramento conta com milhares de pontos de lançamento de radiossondas, a maioria em aeroportos, com um ou dois lançamentos por dia. Normalmente, as radiossondagens são programadas para medições em níveis obrigatórios e níveis significativos, conforme estabelecido pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM). Os dados obtidos por radiossondagens operacionais são tipicamente medidos nos níveis de pressão (1000, 850,

700, 500, 400, 300, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 e 10 hPa) e em níveis significativos, onde ocorrem mudanças abruptas no perfil de temperatura, umidade ou de vento na trajetória ascendente da radiossonda. Portanto, nos dados históricos operacionais da rede mundial de radiossondagens há pouca informação da CLA (SEIBERT et al., 2000).

O histórico do desenvolvimento dos estudos da camada-limite atmosférica mostram que a maioria dos experimentos foram acompanhados do uso de radiossondas para o perfilamento atmosférico.

Parlange e Brutsaert (1990) compararam medições de radiossondagens com uma técnica de sensoriamento remoto (SODAR), a fim de avaliar se a escala de tempo das radiossondagens são apropriadas para caracterizar os perfis de vento na CLA. Os autores observaram que a escala de tempo da radiossonda, que leva em torno de 5 minutos para atravessar a CLA, não é adequada. Entretanto, eles encontraram boas correlações na maioria dos resultados e afirmam que as diferenças nos valores encontrados para a velocidade de atrito, um dos objetivos do seu estudo, não devem ser atribuídas ao método da radiossondagem. Eles concluem que ambas as plataformas de medição utilizadas no estudo possuem limitações.

Versões simplificadas para sondagens foram apresentadas por Myrick et al. (1994), com base em medições feitas entre 1988 a 1993 no Canadá com o uso de minissondadores, que consistiam em pequenos balões, lançados em intervalos de 1h30 a 3h00 com trajetória acompanhada por um par de teodolitos. Os resultados obtidos trouxeram conclusões muito diferentes em relação aos dados avaliados com radiossondagem tradicional.

Outra opção de perfilamento atmosférico é com o uso de balões cativos. Os balões são içados carregando equipamentos que são recuperados a cada sondagem. Há limitações para monitoramento em alturas superiores a 500 m e seu uso em situações com rajadas de vento ou condições de forte convecção, restringindo o uso desse sistema (SEIBERT et al., 2000).

Aviões tripulados, de pesquisa ou comerciais, equipados com sensores, também podem fornecer informações da variabilidade vertical e horizontal da CLA. Embora sejam robustos, eles não conseguem fazer medições muito baixas, por questão de segurança. Além disso, o

custo operacional é elevado (SEIBERT et al., 2000).

3.3 Medições da CLA com sensoriamento remoto

O avanço da tecnologia permitiu também a evolução de métodos de monitoramento da atmosfera com sensoriamento remoto, que consistem em equipamentos que realizam medição indireta, como, por exemplo, sinais de rádio, *laser*, ou outros. As técnicas de monitoramento da CLA a partir de sensoriamento remoto avançaram muito nas últimas décadas, colaborando para estudos da CLA (HAEFFELIN et al., 2012).

Uma vantagem da maioria dos sistemas de sensoriamento remoto é que, além da altura de mistura, eles também permitem avaliar outros parâmetros, como a estabilidade atmosférica e a concentração de aerossóis, permitindo melhor análise das condições de transporte e difusão de substâncias na CLA. Por exemplo, a distribuição de concentrações de determinada substância na atmosfera pode auxiliar na identificação das sub-camadas da CLA, com as respectivas alturas. Além disso, é possível medir a CLA com alta resolução temporal e espacial e sob condições meteorológicas adversas (BATCHVAROVA; GRYNING, 1994; HÄGELI et al., 2000).

Aeroportos geralmente possuem um equipamento denominado tetômetro para medição da altura de nuvens. Esses equipamentos podem operar de noite ou de dia, e são compostos por um sistema de emissão e de um recepção de radiação refletida das nuvens (normalmente no espectro da radiação ultravioleta ou *laser*). O resultado obtido é a altura das diferentes camadas de nuvens, além da visibilidade. Esses equipamentos originados na aviação também podem ser utilizados no monitoramento da altura da CLA (ERESMAA et al., 2012).

Outro sistema de sensoriamento remoto bastante utilizado para medições de vento e da estrutura da CLA é com uso de SODAR. Este equipamento é utilizado para estudos em diversas condições meteorológicas e diferentes características de superfície, porém, ainda existem controvérsias com relação ao seu uso para a determinação da altura CLA. Além disso, sua utilização é limitada pelo intervalo de alcance de medição, que não permite detectar valores muito próximos à superfície (menos de 50 m) e acima de uma determinada de 1000 m (BEYRICH,

1992, 1997). Para estudos da CLE existe um equipamento especial, um mini-SODAR, que é capaz de medir a partir de uma altura inferior a 10 m e com resolução vertical de 5 m com alcance vertical de até 500 m (SEIBERT et al., 2000).

Emeis e Schäfer (2006) utilizaram medidas simultâneas com uso de SODAR e tetômetro e mostraram que ambos os métodos permitem a determinação da variação da estrutura da camada-limite em alta resolução temporal.

Avanços na medição conjunta com SODAR e tetômetro permitiram observar que, sob condições convectivas, a altura de mistura corresponde ao meio ou ao topo da zona de entranhamento, respectivamente ao método de medição. Para condições estáveis, a medição da altura de mistura está relacionada com a altura a partir da qual a viscosidade turbulenta tem seus menores valores (SODAR) ou com a altura em que se identifica turbulência mecânica residual (tetômetro) (EMEIS; SCHÄFER, 2006; DANDOU et al., 2009).

O LIDAR consiste em um equipamento que utiliza sinal *laser* e tem diversas aplicações. Nos estudos da CLA, ele pode ser utilizado para avaliar a sua estrutura de acordo com a concentração de substâncias (p.ex., poluentes, aerossóis, partículas de água). Embora Couter (1979) ap. Hägeli et al. (2000) tenha afirmado que o resultado de medições com LIDAR pode ser considerado como um valor real da altura da CLA, deve-se ter cuidado na interpretação de seu sinal, pois ele pode estar detectando partículas residuais na atmosfera, além de sofrer interferência na presença de nuvens ou na ocorrência de precipitação.

Hägeli et al. (2000) estudaram a camada misturada (CM) e a zona de entranhamento, considerando suas variações espaciais e temporais. Em alguns casos a ZE apresentou espessuras muito elevadas, explicado pelo fato de ser início do dia e o LIDAR estar detectando a camada residual do dia anterior. Chen et al. (2001) observaram a CLA sobre uma região urbana por um ano a partir do monitoramento com um LIDAR compacto e compararam com observações de radiossondagens e modelagem. O estudo mostrou que um LIDAR compacto é apropriado para medições de longo período.

A realização de medições com LIDAR possibilita a determinação da altura da CLA,

a partir de uma combinação entre método de médias das variâncias e o método do gradiente em alta resolução. Com este tipo de equipamento, Hennemuth e Lammert (2006) encontraram resultados melhores do que com métodos que estimam a altura da CLA com radiossondagens, principalmente por não causar erros de estimativas das camadas superiores.

Hennemuth e Lammert (2006) mostram medições de nuvens com LIDAR. Os resultados das estimativas foram bons para a base da nuvem mas não para o seu topo, devido à atenuação do sinal. Além disso, os autores verificaram que o calor latente liberado pelo processo de condensação nas nuvens pode fazer com que a altura da CLA seja mais alta do que a base das nuvens, com inversão térmica apenas acima delas, conforme observaram também com medições com radiossondas. Em um dos casos com presença de nuvens, por exemplo, a diferença encontrada na altura da CLA pelos métodos LIDAR e radiossondagem foi de 1000 m. Em casos mais comuns o desvio-padrão da altura da CLA foi da ordem de 200 m.

RADAR é um equipamento que funciona com pulsos eletromagnéticos que são capazes de determinar o vento por meio da análise de um índice de refração. O sistema RASS (*Radio Acoustic Sounding System*) utiliza também um detector acústico que é capaz de determinar o perfil de temperatura da atmosfera, auxiliando na avaliação da CLA. As principais limitações do uso de RADAR é que eles geralmente não medem abaixo de 200 m, possuem baixa resolução vertical e têm custo elevado (SEIBERT et al., 2000).

Conforme observado acima, cada sistema possui suas vantagens e limitações. Geralmente é necessária a utilização conjunta de mais de um sistema para uma completa avaliação da CLA (HÄGELI et al., 2000; ENGELBART; STEINHAGEN, 2001; PIRINGER, 2001). O critério para escolha de um sistema ou uma combinação deles deve ser o objetivo das medições, levando em conta as questões relacionadas a custos do monitoramento, alcance vertical, resoluções espaciais e temporais da medição e restrições de uso em função das condições locais e atmosféricas (BEYRICH, 1997; SEIBERT et al., 2000):

Na seção seguinte apresentam-se as recentes evoluções no monitoramento atmosférico com uso de VANTs, que é mais uma alternativa de monitoramento da CLA.

3.4 VANTs: uma nova plataforma de monitoramento da CLA

O surgimento das primeiras ideias de veículos aéreos sem tripulação se confunde com a criação e avanço da aviação (VALAVANIS; KONTITSIS, 2007a). Entretanto, foi no início do século XX que houve o desenvolvimento das primeiras versões de aviões pilotados remotamente, que hoje é um conceito que caracteriza um VANT (CHAO et al., 2010).

Os VANTs foram desenvolvidos principalmente na área militar e tiveram aplicação durante a Guerra Civil norte-americana, com uma espécie de balão. Na Primeira Guerra Mundial, utilizaram-se protótipos que misturavam características híbridas de avião e helicóptero. No Vietnã, o uso de VANTs foi intensivo e na Guerra do Golfo eles mostraram sua grande aplicabilidade em ambientes hostis (VALAVANIS; KONTITSIS, 2007b).

Aeronaves não tripuladas vêm sendo utilizadas substituindo os voos tripulados, principalmente em tarefas cujo risco à vida é muito alto, como, por exemplo, monitoramento de tropas inimigas ou vigilância de fronteiras (VALAVANIS et al., 2007). VANTs também podem ser construídos em escala muito menor do que aviões tripulados, trazendo diversos benefícios (NONAMI et al., 2010).

O Departamento de Defesa Aérea dos Estados Unidos define VANT da seguinte forma: “um poderoso veículo aéreo que não carrega um operador humano, usa forças aerodinâmicas para flutuar, pode voar autonomamente ou ser pilotado remotamente, pode ser descartável ou recuperável, e pode carregar arma letal ou não letal. Veículos balísticos ou semi-balísticos, míssil de longo alcance e projéteis de artilharia não são considerados VANTs” (US-DOD, 2010).

Embora o seu desenvolvimento tenha sido principalmente na área militar, os sistemas de voos autônomos têm sido empregados em diversas outras aplicações civis. Alguns VANTs possuem capacidade de voar em grandes altitudes (maiores do que 16 km), longas distâncias (mais do que 2000 km) e carregar quase uma tonelada. Um exemplo é o *Global Hawk*, VANT utilizado em missão científica para estudos em escala planetária, com alcance de 25000 km (VALAVANIS; KONTITSIS, 2007b).

A Agência Espacial Americana (NASA) utiliza VANTs em diversas aplicações militares e não militares, estando estas organizadas em três grandes áreas: ciências da Terra, uso e ocupação do solo e segurança interna (COX et al., 2006).

A partir da década de 90, o avanço em equipamentos reduzidos e sistemas de comunicação sem fio e, conseqüentemente, a diminuição do custo, tornaram o uso de VANT acessível para pesquisas com menos recursos (CHAO et al., 2010). Os VANTs diversificam-se em tipologia, porte, motorização, autonomia de voo, segurança, etc., e estão sendo amplamente utilizados para diversas aplicações, sendo meteorologia apenas uma delas.

Ainda que haja VANTs de diversos tipos e portes, a medição da CLA torna-se atrativa com VANTs se eles forem de pequeno porte, de baixo custo e capazes de transportar equipamentos de monitoramento atmosférico. Além disso, diferentemente da maioria das aplicações com VANTs de pequeno porte, a medição da CLA exige voos relativamente altos, acima de 1500 m de altura (DIAS et al., 2012).

As escalas temporais e espaciais na medição da CLA por meio de radiossondagens tradicionais geralmente não são adequadas (PARLANGE; BRUTSAERT, 1990) e a experiência tem mostrado que VANTs civis são adequados para a realização de medições na CLA, porque é possível realizar o perfilamento da atmosfera com maiores resoluções no tempo e no espaço com custos menores do que radiossondagens (DIAS et al., 2012).

A seguir são mostrados alguns casos de aeronaves utilizadas para medições na CLA.

Aerosonde

Um dos primeiros projetos de um VANT como instrumento de medições meteorológicas de baixo custo teve sua concepção em 1992, com trabalho publicado no Boletim da *American Meteorology Society*, por Holland et al. (1992). O objetivo era projetar e construir um VANT de pequeno porte (peso abaixo de 20 kg), com sensores meteorológicos a bordo para produzir medições com qualidade e robustez equivalente às feitas com radiossondagens. A estimativa dos autores era que o avião poderia subir até 100 hPa de altitude e completar sua trajetória de

descida em 4 horas, desde que houvesse motor que possibilitasse tal autonomia. Neste caso, o custo de cada sondagem seria competitivo em relação às radiossondagens, com a vantagem da flexibilidade operacional (HOLLAND et al., 1992).

O seu desenvolvimento operacional aconteceu de 1995 a 1998, na Austrália. O sistema foi batizado de *Aerosonde Mark 1* e no ano de 2001, após 2000 h de voos de testes, chegou à sua terceira versão, o *Aerosonde Mark 3*. Destaca-se que esse projeto envolveu também o projeto do próprio avião e sua robótica (HOLLAND et al., 2001).

As medições realizadas pelo *Aerosonde Mark 3* incluem diversas aplicações, uma vez que os equipamentos a bordo poderiam ser facilmente selecionados. A Tabela 2 do artigo de Holland et al. (2001) mostra uma extensa lista de possíveis instrumentos e medições que podem ser feitas com o VANT:

- operação e navegação: posição (GPS) e detector de gelo na aeronave;
- meteorologia: temperatura, pressão, umidade, vento, campos tridimensionais de vapor e medições de alta frequência (turbulência);
- medição de concentração de gases: H₂O, CO₂, O₃, CO e SO₂;
- radiômetros: radiações de ondas curtas, infravermelha, ultra-violeta e temperatura da superfície;
- nuvens e aerossóis: quantidade de água líquida, concentração de cristais de gelo e núcleos de condensação;
- sensoriamento remoto da superfície: altitude, mapeamento topográfico, imageamento visível da superfície, imagens no infravermelho, ventos e ondas em oceanos e mapeamento geomagnético.

Nem todas as medições foram feitas pelos autores e não há publicações que mostrem sucesso em todas elas. Entre as grandezas listadas acima, as que foram efetivamente testadas pelos autores são: posição, gelo na aeronave, temperatura do ar, pressão, umidade, velocidade

do vento, campos tridimensionais de umidade, concentração de gases (CO₂, O₃, CO e SO₂), radiações solar, ultra-violeta e atmosférica e temperatura da superfície. As que foram medidas e validadas a partir de comparações com radiossondagens são as tipicamente medidas por esta plataforma: temperatura, umidade, pressão e vento (SODDELL et al., 2004).

Embora o sistema mostre certa robustez, o tempo esperado de perda da aeronave (e sensores) era de 500 horas de voo, na versão Aerosonde Mark 3. Considerando o objetivo dos autores de 4 horas para chegar até ao nível de 100 hPa, o sistema seria utilizado para 125 sondagens de grande altitude. O maior problema de se perder a aeronave não é o custo do avião e dos equipamentos, mas a segurança de voo, por possíveis colisões e porque a queda desses equipamentos pode trazer danos que não ocorrem com a radiossondagens. No caso dos trabalhos do Aerosonde, os voos de testes foram feitos em locais remotos e sem população e com seguro contra danos a terceiros (HOLLAND et al., 1992, 2001; SODDELL et al., 2004).

A companhia *Aerosonde Pty Ltd* é a fabricante desse VANT, que está em sua versão *Aerosonde Mark 4.7* cujo diferencial é realizar voos de longo alcance e capacidade de decolagens e pousos em pequenos espaços, com o uso de sistemas auxiliares (catapulta, por exemplo). Este sistema foi o primeiro a ser utilizado para o monitoramento no olho de um furacão, em 2007 (www.aerosonde.com).

RPMSS

Pesquisadores chineses desenvolveram um sistema completo chamado de RPMSS (*robotic plane meteorological sounding system*). O conjunto era composto por uma miniatura de avião robotizado, equipamentos de sondagem atmosférica, sistema de controle de voo e a estação em solo, com transmissão de dados em tempo real. Pousos e decolagens eram guiados por rádiocontrole e o restante do voo seguia em rota pré-programada pelo sistema de voo autônomo (MA et al., 2004).

O mini-VANT, com 3,0 m e capacidade de carregar até 4 kg, foi equipado com sensores de temperatura, umidade, pressão e sensor para concentração de gases. Com base nos dados da

velocidade do deslocamento da aeronave em rota circular (obtidos do GPS), MA et al. (2004) propuseram um método de estimativa da velocidade do vento.

Os autores descrevem algumas campanhas de monitoramento realizadas com o RPMSS. Em 1998, por exemplo, a campanha contou com 54 voos que foram utilizados para medição de perfis de vento, umidade e temperatura da CLA. O VANT também foi utilizado para monitoramento do perfil de concentração de ozônio na CLA, em 2001 e 2003.

Os autores concluem que o mini-VANT mostrou boa performance nas medições do perfil da CLA, podendo chegar até 5 km de altura. O controle da aeronave pode ser feito até distâncias de 100 km, o que possibilita o monitoramento da atmosfera mesmo em locais remotos.

Kite Plane

Watai et al. (2006) montaram um sistema flexível e econômico para medições de CO₂. Eles equiparam um pequeno VANT, com asa em forma de diamante, motor a combustão, com 3,1 m de envergadura, 2,2 m de comprimento, com aproximadamente 16 kg e capaz de transportar 4 kg de equipamentos.

O VANT, sob o nome de Kite Plane, foi desenvolvido para investigação da distribuição e variação de CO₂ acima e abaixo da camada-limite atmosférica. Watai et al. (2006) realizaram 15 medições, no ano de 2000, sobre uma Floresta Boreal no Japão. O primeiro dia de experimento contou com 3 voos, o segundo com 5 e o terceiro com 7 voos. Cada voo tinha duração de 1–1,5 h, atingindo até 2 km de altura. O conjunto de dados possibilitou a medição de dados de variação horizontal, vertical e temporal de CO₂.

Os autores consideraram o sistema fácil de operar e não mencionam dificuldades no desenvolvimento do sistema e nem limitações de uso. Um dos motivos é que o sistema de medição foi adaptado em um VANT comercial, desenvolvido pela empresa japonesa *Sky Remote Co.* (NONAMI et al., 2010).

Manta

Ramana et al. (2007) estudaram a CLA com uso do VANT denominado *Manta*, sistema completo comercializado pela *BAE Systems*. O sistema podia utilizar diferentes combinações de sensores, dependendo da missão, com carga variando de 3,9 kg a 5,4 kg. Os VANTs utilizados eram equipados para monitoramento de concentração total de aerossóis, distribuição de aerossóis, coeficiente de absorção, radiação solar, radiação fotossinteticamente ativa, distribuição de tamanho de gotas, conteúdo de água líquida, rajada de vento, temperatura, umidade relativa e pressão.

Com uso de 3 VANTs simultaneamente e dados adicionais de estação superficial, Ramana et al. (2007) monitoraram albedo, absorção de energia solar e aquecimento da atmosfera. Neste estudo, que teve apoio da NASA, NOAA e NFS, eram lançados os 3 VANTs em rotas praticamente iguais, mas em alturas diferentes: um a 3 km acima do nível do mar, outro na altura da camada de nuvens e o último a 100 m abaixo das nuvens.

O sistema de monitoramento auxiliou na análise de incertezas quanto à absorção de radiação solar pela atmosfera. Os autores confirmaram que as simulações de taxas de aquecimento para céu claro são consistentes com as medições realizadas.

A avaliação dos dados de concentração de fuligem do mesmo experimento mostrou que as medições na superfície não representam as propriedades dos aerossóis na coluna vertical da CLA, principalmente nos casos em que há influência de processos advectivos que resultam em transporte de substâncias a longas distâncias. Os dados obtidos por este sistema colaboraram significativamente na avaliação de erros nas estimativas do balanço de energia na atmosfera (CORRIGAN et al., 2007, 2008).

M²AV

O VANT *M²AV* é uma aeronave um pouco menor do que os 4 modelos apresentados acima. Tem 2,0 m de envergadura, capacidade de carga de aproximadamente 1 kg (ver tabela 3.1) e mede temperatura, umidade relativa, pressão e vento.

Em relação aos demais VANTs este é equipado para medir ventos em 3 dimensões e flutuações de temperatura e velocidade. Essas medições em alta frequência tornam o M^2AV capaz de medir turbulência na CLA (PIESS et al., 2007; KROONENBERG et al., 2008).

A concepção do VANT para medição de turbulência exige ainda mais cuidado na instalação dos equipamentos, no funcionamento do motor e das próprias condições de voo, para que as medições não sejam contaminadas, por efeitos de vibração, gases de combustão, pela fuselagem do avião ou pela alteração do escoamento ao redor da aeronave.

O M^2AV tem se mostrado uma plataforma de monitoramento robusta e com diversas aplicações em micrometeorologia, tendo sido utilizado para a medição da velocidade do vento (KROONENBERG et al., 2008), do perfil atmosférico da baixa troposfera (MARTIN et al., 2011), da função estrutura de temperatura (KROONENBERG et al., 2012) e da zona de entranhamento (MARTIN et al., 2014).

SUMO

Um grupo de pesquisa da Noruega desenvolveu um mini-VANT, o qual chamaram de *SUMO* (*small unmanned meteorological observer*). O sistema contava com pequenos sensores para o perfilamento da atmosfera, pesava apenas 580 gramas e foi capaz de chegar a altitudes de quase 3 km.

Este projeto contou com o uso de um sistema de pilotagem automática de projeto aberto (*open source*), denominado *Paparazzi* (http://paparazzi.enac.fr/wiki/Main_Page) (REUDER et al., 2008, 2009).

As medições feitas pelo *SUMO* são as mesmas comuns aos outros sistemas: temperatura, umidade e pressão. Ainda que este VANT não tenha sido equipado com sensores para medir flutuações de turbulência (como é o caso do M^2AV), os experimentos do *SUMO* apresentam alguns dos melhores resultados obtidos com VANTs em termos de medições na CLA, que estão parcialmente apresentados em Reuder et al. (2009).

Smartsonde

A partir das experiências do *SUMO*, a Universidade de Oklahoma e o Centro de Pesquisa de Radar Atmosférico, nos Estados Unidos, desenvolveram o projeto *Smartsonde* (*small multi-function autonomous reserarch an teaching sonde*). O uso proposto era diversificado, com foco em monitoramento da CLA (CHILSON et al., 2009).

O VANT consistiu de uma adaptação de um aeromodelo (*Hobbico NexSTAR EP*) e também utilizou o sistema de voo autônomo *Paparazzi*. Com 1,74 m de envergadura e capacidade de carga significativamente superior ao *SUMO* (aproximadamente 1 kg), os experimentos reportados em Chilson et al. (2009) limitaram-se a aproximadamente 200 m. Este trabalho indica diretrizes ao projeto *Smartsonde* a fim de aumentar sua aplicabilidade.

Bonin et al. (2013) apresenta diversos dados monitorados e aplicações com o *Smartsonde*, mas restritos às medições que só foram obtidas nos primeiros 200 m da atmosfera.

Aerolemma

O projeto *Aerolemma* foi tema e motivação do projeto desta tese. Os primeiros equipamentos que permitiram a montagem do *Aerolemma-1* foram financiados pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). O desenvolvimento do sistema e sua evolução estão detalhados no capítulo 4.

O sistema foi concebido para realizar voos de até 2 km de altura, carregando equipamentos para a medição de temperatura, umidade e pressão na CLA. Inicialmente, foram projetadas 2 aeronaves: a primeira (*Aerolemma-1*) com 3,0 m de envergadura e 4,7 kg e a segunda (*Aerolemma-2*) um pouco menor, com 2,6 m de envergadura e 4,7 kg. Após 3 anos de desenvolvimento chegou-se ao *Aerolemma-3*, com maior segurança, flexibilidade para decolagem e pouso, permitindo seu uso em diversos sítios experimentais, que eram as principais limitações das duas primeiras versões.

Nesta versão, foi adquirido um aeromodelo comercial (*Hobbico Hobbistar 60 Mk3*)

que foi adaptado para a instalação do sistema de medição e piloto automático. O *Aerolemma-3* ficou consideravelmente menor do que as duas primeiras versões, com 2,0 m de envergadura e apenas 2,0 kg. O VANT permite lançamento por catapulta ou manualmente, não precisando de pista para decolagens. Os pousos podem ser feitos em pequenas pistas de grama ou outros pisos, mesmo que um pouco irregulares.

Sensores de temperatura, umidade relativa e de pressão foram instalados juntamente com um sistema de guiagem automático denominado *MicroPilot MP2028g*. Um sistema de aquisição de dados também foi instalado a bordo para registrar os dados a uma frequência de 1Hz.

O termo-higrômetro foi instalado em um mastro adaptado à frente do nariz e sobre a hélice, e recebeu um abrigo para proteger o sensor contra influências da aeronave. O VANT revelou-se capaz de realizar voos até o topo da CLA diurna e medir flutuações turbulentas de temperatura e coletar dados para estimativa do fluxo de entranhamento de calor sensível virtual. Uma descrição das aplicações científicas mais bem sucedidas do *Aerolemma-3* pode ser encontrada em Dias et al. (2012).

Resumo dos principais VANTs desenvolvidos para medições da CLA

Os principais VANTs que foram desenvolvidos para uso em monitoramento da CLA estão resumidos a tabela 3.1, com suas principais informações.

Tabela 3.1: Principais VANTs em uso na área de micrometeorologia. Adaptado de Dias et al. (2012).

UAV	Envergadura (m)	Carga útil (Kg)	Autonomia	Altura ¹ (m)
<i>RPMSS</i>	3,00	4 ²	4–8 h	5000
<i>Aerosonde Mark 3</i>	2,90	5	40 min	6000
<i>Kite Plane</i>	3,10	4	1–1,5 h	6000
<i>Manta</i>	2,70	5,4	5 h	3500
<i>M²AV</i>	2,00	1	< 1 h	800
<i>SUMO</i>	0,80	0,2 ²	20 min	3500
<i>Smartsonde</i>	1,74	1 ²	15 min	< 300
<i>Aerolemma-3</i>	1,20	1,2	15 min	2000

¹ altura máxima acima do solo reportada nas referências bibliográficas

² valor estimado

3.5 As dificuldades na interpretação de dados de perfis da CLA com medições diretas

A seguir é apresentada uma revisão sobre as dificuldades na leitura de dados de perfis com medições diretas, para a determinação da altura da CLC, da espessura da Zona de Entranhamento, do gradiente de temperatura na atmosfera livre.

Nos casos reais os perfis de temperatura, umidade e vento não são tão bem comportados e definidos e, por isso, muitas vezes não é possível identificar facilmente as sub-camadas e altura da CLA (SEIBERT et al., 2000). Por isso, esta seção mostra também a importância do correto uso e interpretação de dados do perfil atmosférico.

Stull (1991), por exemplo, avalia situações em que há variações da estabilidade em sub-camadas e alternância de condições estáveis e instáveis. Ou seja, em condição instável, a CLC pode conter dentro dela sub-regiões estáveis entre a superfície e a zona de entranhamento, o que seria equivalente a dizer que o perfil possui mais de uma camada de inversão, sendo que a mais elevada é efetivamente a ZE. Para esses casos, o autor sugere usar um conceito de estabilidade estática não-local para a determinação da altura da CLC, uma vez que definir essa altura apenas como a base ou o meio da inversão pode trazer dúvidas na decisão de qual inversão é representativa para definir o topo da CLC.

Piringer et al. (1998) utilizaram dados de radiossondas, balões cativos e resultados de modelagens para avaliar altura da CLA em Viena, na Áustria. Os autores analisaram nos perfis a existência ou não de uma “inversão crítica”. Esta inversão é determinada como a primeira camada de inversão cujo gradiente negativo de temperatura T seja maior que ou igual a 5 K km^{-1} . A altura da CLA foi determinada como o ponto da camada de inversão em que a temperatura é 2 K maior do que em sua base (denominado como método de *Heffer*). Além deste método, eles também utilizaram o método de Stull (1991) citado acima para situações instáveis. Eles observaram que os métodos encontram alturas próximas em condições de CLA completamente convectiva, mas divergem em algumas situações, especialmente em transições de condições estáveis-instáveis ou vice-versa e situações neutras.

A dificuldade da determinação da altura da CLA nos períodos de transição (início e final de dia) e na presença de camadas residuais também é relatada por diversos outros autores (BERMAN; KU, 1997; PIRINGER et al., 1998; HÄGELI et al., 2000; EMEIS; SCHÄFER, 2006).

No período noturno também há dificuldades de se aplicar métodos objetivos para definição da altura da CLE com base no perfil atmosférico (SEIBERT et al., 2000). Tipicamente a altura da CLE é determinada como o nível em que $d\theta/dz \approx 0$, porém nem sempre esta condição é verificada (YU, 1978) *ap.* (GASSMANN; MAZZEO, 2001). Outras formas de análise da camada noturna podem ser feitas através da análise do perfil de vento na CLA, como, por exemplo, determinando o nível dos *jatos noturnos*, que nem sempre ocorrem, limitando o uso deste critério (LENA; DESIATO, 1999).

Além da dificuldade de ajustar o perfil real ao idealizado, definições e conceitos divergentes podem trazer diferenças na análise das variações de propriedades na CLA. Mesmo tendo resultados de monitoramento ou de simulações, a determinação da altura da CLA pode divergir em função do método utilizado (DEARDORFF, 1979; BATCHVAROVA; GRYNING, 1994; HENNEMUTH; LAMMERT, 2006; TOMBROU et al., 2007; DANDOU et al., 2009).

A altura da CLC pode ser definida avaliando-se o nível da inversão térmica. Entretanto, alguns autores utilizam como referência a base da camada estável (inversão) representativa e outros afirmam que a altura da CLC é a metade ou ainda o topo da camada de inversão (SEIBERT et al., 2000; TOMBROU et al., 2007).

A zona de entranhamento representa a espessura da camada estável de inversão térmica e diversos estudos mostram que esta camada pode ter uma grande espessura, o que faz com que a escolha entre a base ou o meio da inversão resulte em valores bastante diferentes para a altura da CLC (BATCHVAROVA; GRYNING, 1994; HÄGELI et al., 2000; MYRICK et al., 1994).

Com base em dados medidos e modelagens da CLA, Dandou et al. (2009) observaram que a altura da CLC localiza-se na metade da ZE quando se observam dados medidos com SODAR ou como o topo da ZE quanto se utiliza dados do tetômetro. Myrick et al. (1994)

apresentam também diferenças na altura da CLC em função do método de levantamento.

Stull (1988) mostrou que maiores espessuras da ZE podem estar associadas a processos convectivos que geram as térmicas na atmosfera.

A medição ou cálculo da altura da CLA é importante em estudos de poluição atmosférica e dispersão de poluentes. Neste caso, geralmente utiliza-se o conceito de camada misturada (CM), que é definida como a altura da camada adjacente ao solo sobre a qual os poluentes tornam-se verticalmente misturados (SEIBERT et al., 2000). Entretanto, a altura da base da inversão e a altura da CM identificada a partir de medições da variação da concentração dos poluentes nem sempre coincidem, conforme observam Tombrou et al. (2007), muitas vezes em função de espessas camadas de entranhamento.

Não há como afirmar qual é a definição mais correta e a escolha do critério dependerá do objetivo e dos métodos disponíveis para medições ou cálculos da CLA (TOMBROU et al., 2007; JOHANSSON; BERGSTRÖM, 2005). Segundo Kaimal et al. (1982), que testou oito diferentes sistemas (com torre, avião, radiossonda, SODAR, LIDAR e diferentes radares), não há método capaz de medir a altura da CLA em todas as suas condições de estabilidade e estrutura, pois cada sistema possui suas limitações.

Conforme será visto adiante, o modelo de salto (*jump model*) considera um perfil idealizado da atmosfera, com uma região convectiva com temperatura constante, limitada superiormente por um salto no perfil e a camada livre acima apresentando gradiente constante de temperatura (LILLY, 1968; DEARDORFF, 1979).

4 Desenvolvimento Experimental: Um Mini-VANT para Medições da Camada-Limite Convectiva

Este capítulo descreve a evolução do projeto *Aerolemma*, que consistiu na concepção e construção de um VANT para monitoramento da CLA.

A variabilidade espacial e temporal da CLA é maior do que a resolução e frequência de medição das radiossondagens operacionais, que, normalmente, são lançadas a cada 12 horas. O VANT surgiu da necessidade de melhorar e completar a frequência de amostragens, em relação às radiossondagens, com redução do custo, pois o VANT permite o perfilamento com recuperação dos sensores de medição (DIAS et al., 2009).

As demandas convergiram para a construção de um VANT de pequeno porte, capaz de transportar equipamentos de medição e realizar voos até alturas acima da camada de entranhamento. Embora a aplicação do VANT tenha sido para monitoramento de variáveis meteorológicas na camada-limite, o sistema é capaz de realizar monitoramentos diversos, bastando substituir os equipamentos de medição a bordo (GONÇALVES et al., 2006).

Uma estação de medição de fluxo superficial foi instalada no sítio experimental (que será descrito adiante), medindo calor sensível, radiação líquida, velocidade do vento, temperatura e umidade, com médias a cada 10 minutos. Os dados superficiais eram originalmente medidos para alimentar os modelos de cálculo da altura de mistura. Houve outros trabalhos de pesquisa que utilizaram os dados obtidos com o VANT, nos quais foram feitos cálculo da evolução da CLC (DIAS et al., 2010; FREIRE; DIAS, 2013).

Entretanto, este trabalho também utiliza o modelo integral de crescimento da CLC para o cálculo do fluxo de calor sensível. Para esta aplicação a estação superficial não mediu dados

suficientes, que permitissem o cálculo dos fluxos superficiais, o que levou à necessidade de uso de outros dados. A escolha foi utilizar dados do experimento FIFE (capítulo 7).

4.1 A concepção do Veículo Aéreo Não Tripulado

A primeira parte do desenvolvimento do VANT recebeu recursos do CNPq, do projeto VENTAAR: Veículo Aéreo Não Tripulado para Medição da Camada-Limite Atmosférica em Alta Resolução, cujo objetivo era montar e equipar uma aeronave para desenvolvimento e teste de um sistema não convencional capaz de determinar a evolução temporal dos perfis de $\theta(z)$ e $q(z)$ na CLC.

O sistema proposto consistiu em um VANT, equipado com sensores de temperatura, umidade e pressão, para realizar voo autônomo medindo toda a extensão vertical da CLA, caracterizada pela inversão no perfil de $\theta(z)$ na zona de entranhamento.

A partir dos requisitos iniciais, o primeiro avião foi desenhado com propulsão traseira, para que o fluxo da hélice e o calor não influenciassem as medições, além de ter sido projetado para capacidade de carga suficiente para transportar os sensores e autonomia de voo. Havia também necessidade de espaço dentro da fuselagem e próximo ao centro de massa, para que alterações de carga não prejudicassem o equilíbrio e a calibração das superfícies de controle (ailerons, leme e profundores) aeronave.

Serão expostas a seguir as características das três principais aeronaves desenvolvidas/utilizadas e as etapas de desenvolvimento.

4.1.1 As diferentes versões de aeronaves

Foram desenvolvidas três diferentes aeronaves: as duas primeiras foram construídas para carregar em torno de 10 kg de carga e a última para pouco mais de 1,1 kg. Portanto, as primeiras eram consideradas de porte médio e necessitavam de uma boa pista de pousos e decolagens. A terceira aeronave, foi concebida para carregar o mínimo de equipamentos

necessários para voo autônomo e sensores para monitoramento da CLA. Houve necessidade de se reduzir a carga a ser transportada (tamanho dos cabos dos sensores e datalogger, por exemplo). Pelo seu porte, esta última pode ser enquadrada como um mini-VANT, que teve como vantagem o seu uso em pistas mais irregulares, como as de grama.

As aeronaves foram assim denominadas:

1. *Aerolemma-1*: foi a primeira a ser construída, sob encomenda. Os voos foram realizados com sistema de transmissão de imagem para monitoramento por rádio-controle sem alcance visual através de vídeo (sem piloto automático). Permitiu obtenção de perfis até 800 m de altura;
2. *Aerolemma-2*: aeronave também construída sob encomenda, similar com à primeira mas um pouco menor. Esta serviu de reserva para casos de problemas e avarias no *Aerolemma-1*. Entretanto, a relação peso/sustentação desse avião não ficou adequada, fazendo com que houvesse necessidade de voos mais rápidos, exigindo longas pistas e com piso regular (asfalto);
3. *Aerolemma-3*: aeromodelo (*Hobbico, Modelo Hobbistar 60*) de pequeno porte, adaptado para a instalação simultânea de sistema de piloto automático e sensores, *datalogger* e baterias para o monitoramento da CLA. Foi o que apresentou melhor desempenho e que possibilitou campanhas com sucesso para obtenção dos perfis atmosféricos até 2000 m de altura. As decolagens eram feitas com lançamento da aeronave com as mãos ou com catapulta e pouso em grama (aeronave sem trem de pouso).

Além desses VANTs, houve uso de outros aeromodelos comuns (p.ex., *ThunderTiger* e *Jipe*) para testes de piloto automático, desenvolvimento de catapulta e treinamento de pilotagem.

4.1.2 Testes e calibração das aeronaves e piloto automático

Os VANTs, principalmente nos primeiros voos, devem passar por um processo de calibração, que consiste na realização de testes de voos rádio-controlados para corrigir tendências de desvio de trajetória horizontal e vertical e equilibrar eventuais deslocamentos dos centros de massa causados pela adaptação dos equipamentos de monitoramento na aeronave. Essas tendências de desvio são corrigidas com o processo conhecido como *trimagem*, que é a regulagem dos principais componentes aerodinâmicos móveis:

- *aileron*: com função de girar a aeronave em torno do seu eixo longitudinal (*roll*);
- leme: controla o movimento em torno do eixo vertical (*yaw*);
- elevadores/profundores: têm função de subir ou abaixar o nariz do avião (*pitch*);
- *flap*: componente auxiliar para pousos e decolagens, responsável por reduzir a velocidade do avião e aumentar a sustentação da asa;

Após se ter uma aeronave equilibrada e que responde bem aos comandos de manobra, é necessário programar o piloto automático e calibrar o seu sistema de navegação.

Nessa etapa, ajustam-se as taxas e faixas de variação de movimentação dos comandos da aeronave, que são feitos através dos deslocamentos dos *ailerons*, leme, elevadores e *flaps*, para que o resultado no voo seja a manobra desejada e comandada pelo controle remoto ou pelo piloto automático.

As programações do sistema de voo autônomo foram feitas para movimentos suaves, evitando esforços exagerados na estrutura do avião (asa, principalmente), que poderiam ser causados por manobras abruptas, diminuindo riscos de avarias e queda da aeronave.

Esse processo envolve alteração do posicionamento da carga (equipamentos) e, em alguns casos, uso de contra-pesos para correção do seu centro de massa e melhoria do desempenho de voo.

Pilotos automáticos são sistemas capazes de guiar um VANT completamente: decolagem, subida e descida, trajetória de cruzeiro e pouso. Em geral, existe necessidade de comunicação do sistema a bordo com uma estação de solo e comunicação GPS via satélite, para atualização da posição e envio de comandos para os servos, que fazem a movimentação dos componentes de guiagem do VANT.

O sistema selecionado é fabricado pela *MicroPilot*, que oferece uma série de sistemas, com preços variando de 2000 a 8000 USD. O modelo selecionado foi o *MP2028^g*: compacto (10 cm x 4 cm x 1,5 cm), leve (28 g) e com sistema de guiagem robusto suficiente para os objetivos da pesquisa. Esse modelo tem um receptor GPS integrado que reduz o tamanho do sistema.

O *MicroPilot* é equipado com acelerômetros, sensores de pressão estática e dinâmica e com sistema de telemetria com alcance de 3 km. Toda a operação é monitorada através da telemetria, que fornece todas as características do voo em uma tela gráfica, através do *software Horizon*. As informações transmitidas são: posição, velocidade horizontal, velocidade vertical, altura, cargas das baterias e tempo de voo. A figura 4.1 mostra a tela de recebimento das informações telemetrizadas.

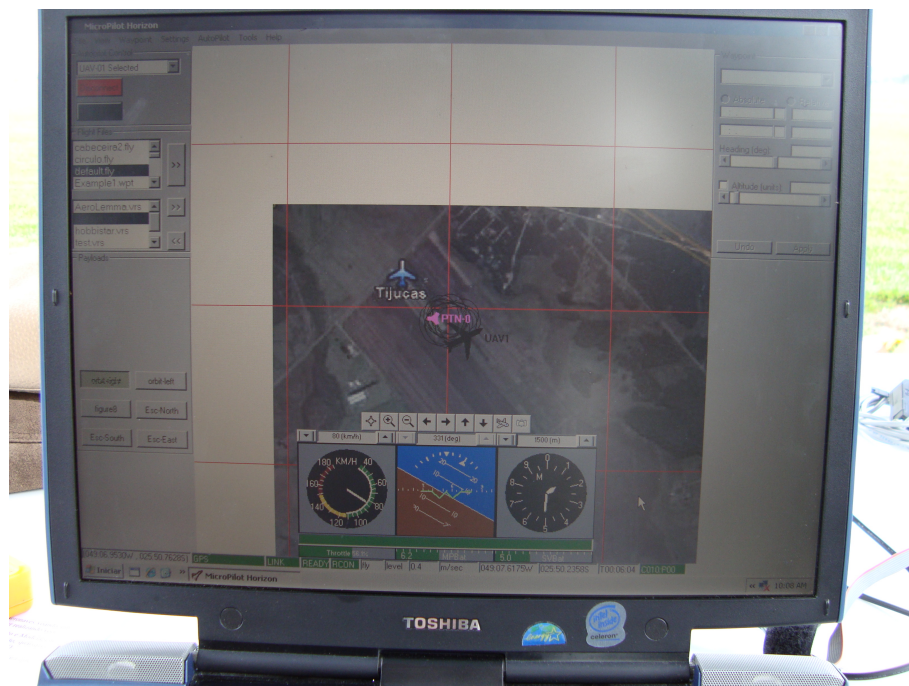


Figura 4.1: Tela do programa *Horizon*, que monitora o voo com o *MicroPilot*.

O piloto automático controla altitude, velocidade e pode realizar navegação por pontos pré-determinados. O equipamento permite diferentes tipos de decolagem e pouso (pista, lançamento com a mão, catapulta, etc.). O GPS atualiza o posicionamento com frequência de 1 Hz e a frequência de atualização do sistema de controle de voo é de 30 Hz; os servos podem ser comandados a 50 Hz.

Outras características principais do MP2028^g são:

- controle de altura e velocidade;
- suporta a programação de até 1000 pontos (*waypoints*) ou comandos;
- integração de todos os sensores necessários para a estabilização da aeronave;
- controla até 24 servos ou outros dispositivos eletrônicos a bordo (*flaps, ailerons, leme, elevadores/profundores*);
- armazena dados do voo para posterior análise e diagnóstico;
- possui alerta de voltagem de bateria;
- permite programação alternativa para: perda de sinal do GPS, perda de sinal do rádio-controle, falha no motor, perda da comunicação de dados e baixa voltagem na bateria, alterando o plano de voo para esses casos.

4.2 Sítios experimentais

Os primeiros voos foram feitos no Aeroclube de Planadores de Balsa Nova/PR, em pista de asfalto. Este local foi escolhido principalmente por ter uma pista longa e ser um local seguro para testes de voo com os primeiros VANTs, que eram de porte médio. As desvantagens desse local eram a topografia muito acidentada para estudos de micrometeorologia e a operação de planadores do aeroclube, que tinham prioridade no uso da pista, o que limitava a operação com o VANT. Posteriormente, os testes foram feitos em Tijucas do Sul/PR, uma grameira. A

configuração geográfica do entorno era mais favorável para os estudos. Neste local instalou-se também uma estação de fluxos superficiais. A mudança de local mostrou que os VANTs utilizados até então (*Aerolemma-1* e *Aerolemma-2*) eram muito grandes e precisavam de altas velocidades para decolagens e pousos, o que motivou o desenvolvimento de um VANT menor (*Aerolemma-3*).

A figura 4.2 mostra a localização dos sítios de Balsa Nova e Tijucas do Sul, indicando também a localização do Aeroporto Afonso Pena, em São José dos Pinhais, onde são feitas as radiossondagens operacionais mais próximas.

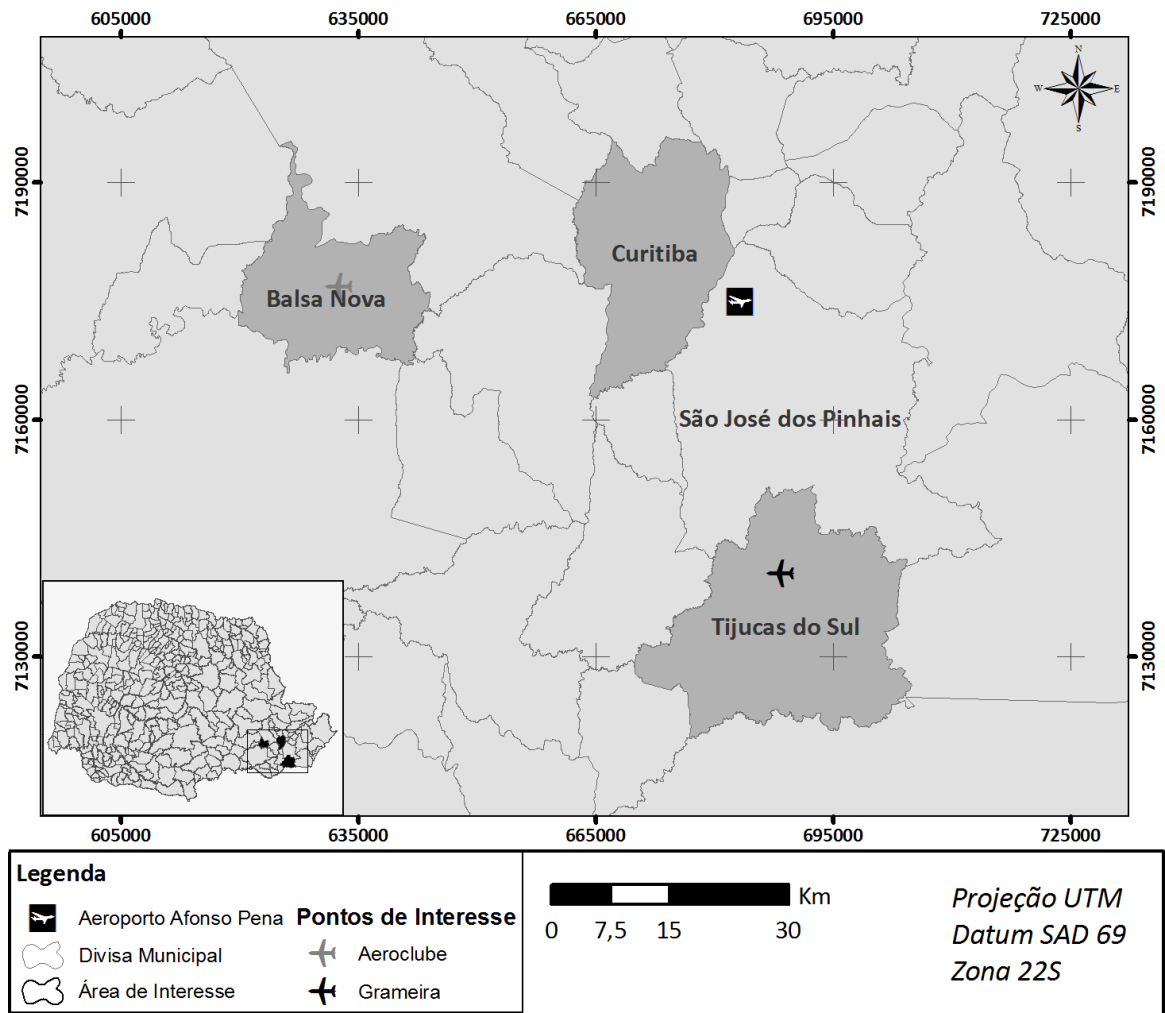


Figura 4.2: Localização geográfica dos sítios experimentais.

4.2.1 Balsa Nova

No Aeroclube de Planadores de Balsa Nova realizaram-se os primeiros voos e obtiveram-se perfis de temperatura e umidade até 800 m. A localização geográfica é 25°31,207'S e 49°40,918'O, com altitude de 910 m, a cerca de 60km a leste de Curitiba. A figura 4.3 mostra uma imagem do local.

Os principais fatores para a escolha do Aeroclube para testes e medições foram:

- pista asfaltada, com 1100 m de comprimento e 23 m de largura;
- baixo tráfego aéreo comercial, embora com tráfego intenso de planadores e seus aviões rebocadores, principalmente aos sábados, domingos e feriados;
- proximidade de Curitiba e facilidade de transporte de materiais de campo;
- proximidade de uma outra pista de aerodelismo (Aeródromo Fazenda Thalia);
- região rural e alta, melhorando o alcance dos voos visuais e facilitando a identificação do ruído do avião;
- disponibilidade de hangar para guardar o avião;
- energia elétrica no hangar para recarga de baterias.

A principal desvantagem do local foi a topografia muito acidentada em seu entorno, por estar próximo à Escarpa Devoniana de São Luiz do Purunã. Neste caso, a topografia pode alterar muito a estrutura e dinâmica da CLA, prejudicando a interpretação dos resultados das medições.

Neste sítio, o aeroclube possui NOTAM (*Notice to Airmen*) que libera os voos dos planadores e rebocadores, até 1100 m de altura. Como o VANT sempre foi utilizado a alturas menores, não havia interferência nas rotas de voos comerciais e nem riscos de colisão com esses aviões, o que constituía uma outra vantagem do local.



Figura 4.3: Sítio experimental de Balsa Nova/PR.

4.2.2 Tijucas do Sul

Um outro sítio experimental do estudo foi instalado no município de Tijucas do Sul, nas coordenadas 25°50,475'S e 49°7,280'O, com altitude de aproximadamente 900 m, distanciada a cerca de 50 km a sul de Curitiba. O local foi escolhido principalmente por se tratar de uma grameira, adequada para a operação de mini-VANTs.

Os principais fatores para a escolha da grameira como campo de testes foram:

- ampla área de gramado, com extensão de total de quase 1,4x0,8 km (embora o uso se restringisse a um polígono de aproximadamente 100x500 m);
- proximidade de Curitiba e facilidade de transporte de materiais de campo;
- região rural e plana, com pouca habitação no entorno;
- local adequado para instalação de estação de fluxos superficiais;
- uso exclusivo da pista e sem restrição de horário (pelo proprietário);
- liberação de uma área para os voos autorizados pelos órgãos responsáveis pelo controle de tráfego aéreo.

A figura 4.4 mostra o local. As comunidades mais próximas estão a cerca de 3 km de distância.

Além de ter segurança para voos (grande área da grameira e com poucas residências no entorno), este sítio está localizado em uma planície, cuja topografia é bastante suave, e com pista de vento (*fetch*) suficientemente longa, apropriada para estudos da CLA.

Foram feitas diversas comunicações com o Segundo Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo – CINDACTA II, e, em março de 2009, foi firmado um Acordo Operacional com a UFPR. O Controle de Tráfego Aéreo de Curitiba delimitou uma área restrita para os experimentos na área de estudo, com um raio de 1,0NM (milha náutica, que equivale a 1,852 km) e altitude de 10.000ft.

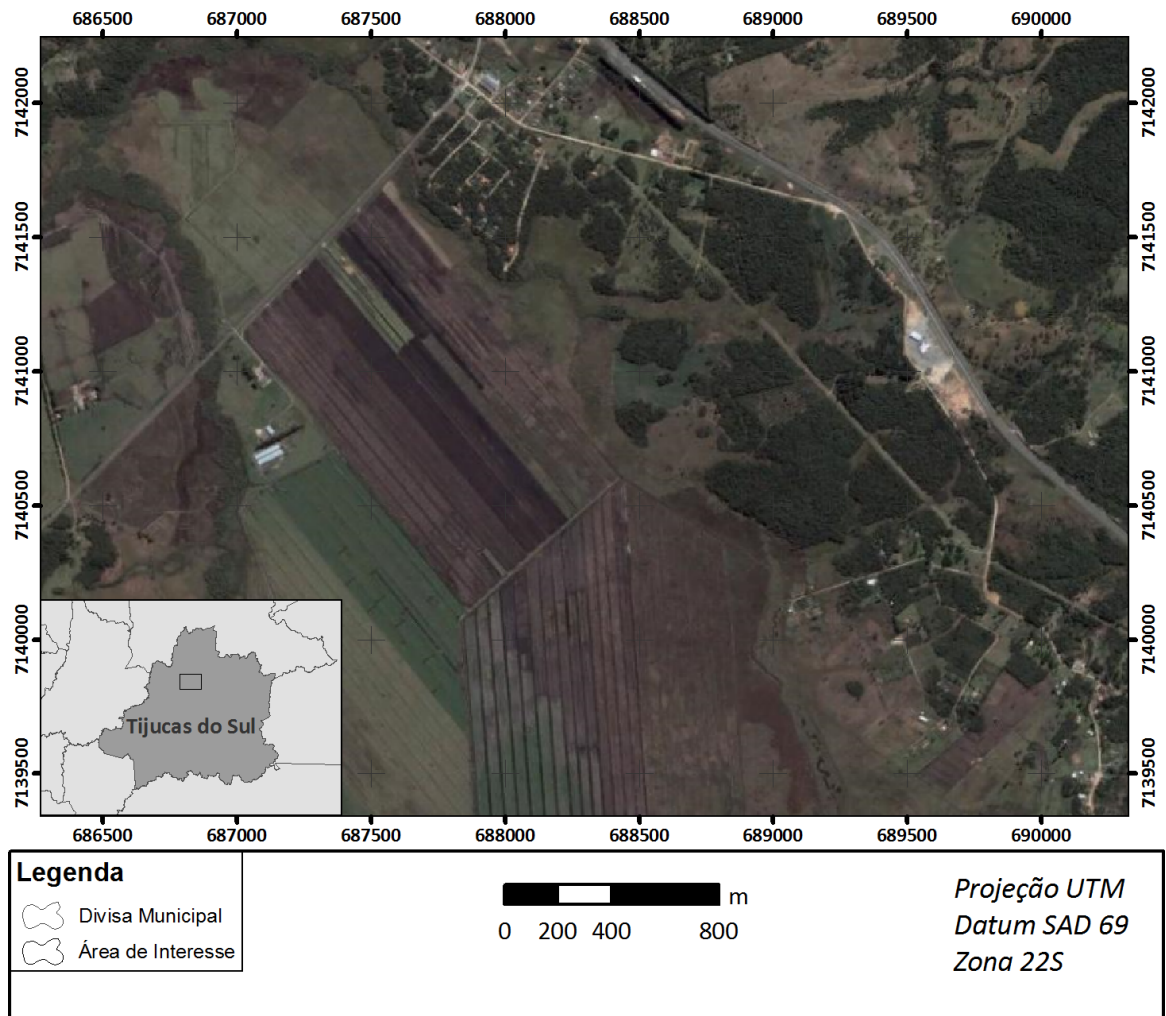


Figura 4.4: Sítio experimental de Tijucas do Sul/PR.

A permissão se deu para experimentos do nascer ao pôr-do-sol na área delimitada, condicionados a liberações de decolagens através de contatos com o Controle Aéreo de Curitiba a cada lançamento do VANT.

Em junho de 2008 foi instalada uma torre meteorológica para medições de dados superficiais necessários para evolução dos estudos e alimentação de modelos de cálculo da altura da CLA. Os dados desta estação começaram a ser obtidos a partir de março de 2009, quando foram liberados voos a alturas suficientes para a medição de toda a CLA e quando as campanhas de perfilamento da atmosfera intensificaram-se.

A figura 4.5 mostra a estação, que é mantida por um conjunto de bateria e painel solar. Os equipamentos utilizados na estação foram:

- sensor capacitivo, modelo CS500, da *Campbell Scientific Inc.* para medição de temperatura e umidade relativa média do ar, medidas a 5 m do solo;
- anemômetro sônico, modelo CSAT3, da *Campbell Scientific Inc.* para medição de velocidade e direção do vento tri-dimensional e temperatura sônica em alta-frequência (10 Hz), medidas a 8 m do solo;
- *datalogger* CR23X, da *Campbell Scientific Inc.* para processamento e armazenamento temporário de dados (em módulo de memória);
- sensor de radiação líquida *NR-Lite*, da *Kipp & Zonen*;
- painel solar e bateria para alimentação elétrica do sistema de monitoramento.

Foi monitorado fluxo de calor sensível, através do método das covariâncias turbulentas (BURBA; ANDERSON, 2010). Este parâmetro é fundamental para a estimativa de calor transferida da superfície para a atmosfera, utilizado em parte para aquecimento da CLA. Entretanto, não foram medidas as flutuações necessárias para cálculo do fluxo de calor latente.



Figura 4.5: Estação de monitoramento de superfície.



Figura 4.6: *Aerolemma-1* em fabricação e em seus primeiros testes.

4.3 *Aerolemma-1*

O primeiro avião foi projetado com tamanho médio e foi construído pela empresa *Ultimate Models*, de Presidente Prudente/SP. Os primeiros equipamentos utilizados para o perfilamento da atmosfera eram os mesmos utilizados tipicamente em torres meteorológicas, relativamente pesados, principalmente o *datalogger* (*Campbell Scientific Inc.*). O sensor termohigrômetro (CS500) tinha um longo cabo que não foi cortado por recomendação do fabricante, aumentando a exigência de carga.

A propulsão traseira foi requisito para que o fluxo de ar da hélice e o calor do escapamento e do motor à combustão não interferissem no sistema de medição. A fuselagem foi construída com madeira, alumínio, fibra de vidro e isopor. O espaço dentro da fuselagem e a capacidade de carga de aproximadamente 9 kg foram suficientes para transportar todos os equipamentos: *datalogger* e sensores de pressão, temperatura, umidade, sistema de transmissão de vídeo e outros.

As figuras 4.6-(a) e (b) mostram aeronave ainda em processo de fabricação e o seu primeiro teste de voo (em 09/05/2006), quando foram feitos testes em solo e no ar, com trimagem e regulagem do motor. Neste momento o *Aerolemma-1* não poderia ser considerado um VANT, pois não era capaz de realizar voos autônomos.

As principais características do *Aerolemma-1* estão descritas na tabela 4.1, e os dados

Tabela 4.1: Características do *Aerolemma-1*.

Fabricante	<i>Ultimate Models</i> (sob encomenda)
Material	Madeira, isopor, fibra de vidro e alumínio
Envergadura	3,0m
Comprimento	1,8m
Peso	12kg
Motor	DA50, com ignição eletrônica
Potência	5,0HP a 16000rpm
Hélice	propulsora traseira (22 polegadas, passo invertido)
Capacidade de Carga	9,0kg
Autonomia	25 minutos

Tabela 4.2: Características dos voos do *Aerolemma-1*.

Velocidade de Cruzeiro	80,0km/h
Velocidade na Subida	65,0km/h
Velocidade na Descida	85,0km/h
Razão de Subida	3,0m/s
Razão de Descida	5,0m/s
Pilotagem	rádio-controle, vídeo-transmissão e piloto automático

médios dos voos na tabela 4.2. Juntamente com a aeronave, o fabricante forneceu motor de 2 tempos e potência de 5HP de fabricação nacional, e um sistema de rádio-controle de 7 canais (*FUTABA-7-CAP*), com alcance de 1500 m.

Após ser transportado para Curitiba, o avião foi remontado e novos testes foram realizados em solo: regulagem do motor e no funcionamento de todos os sistemas de guiagem. Em 27/05/09 foram feitos os primeiros no sítio experimental de Balsa Nova/PR.

Para início das medições dos perfis de temperatura e umidade, foram instalados os equipamentos dentro da fuselagem do avião, juntamente com o sistema de aquisição de dados. Embora o equipamento utilizado permitisse a transmissão dos dados em tempo real, para evitar interferência entre os diferentes sistemas de transmissão (dados, rádio-controle e vídeo), optou-se por utilizar um módulo de memória conectado ao *datalogger*, para ao final do voo fazer transferência dos dados para um *notebook*.

Inicialmente foram instalados os seguintes sensores: termohigrômetro CS500, para medição de temperatura do ar e umidade relativa, e um barômetro digital CS100, ligados a um *datalogger* CR10X, todos da *Campbell Scientific Inc.*. O avião mostrou-se com mais espaço e

capacidade de carga do que o necessário para as primeiras medições. Este aspecto era positivo, pois permitiria que o avião fosse usado para fazer outras medições simultaneamente, como, por exemplo, concentração de poluentes.

Os primeiros testes mostraram a necessidade de se utilizar contra-pesos, para ajuste do centro de massa da aeronave e também aumentar o seu peso e melhorar a performance do voo, principalmente nos pousos e decolagens: nos voos com o *Aerolemma-1* com pouca carga, qualquer irregularidade na pista provocava a tendência de empinamento da parte frontal do avião que provocava contato da hélice traseira com o solo.

Mesmo antes do *Aerolemma-1* ter seu sistema de voo autônomo instalado, foram realizados diversos voos até o limite do alcance visual, que para as dimensões do avião era de aproximadamente 800 m acima do solo. Os primeiros testes de medição foram feitos com todos os equipamentos instalados dentro da fuselagem do avião, protegidos da radiação solar e de contato com os sensores durante o seu manuseio e transporte do solo.

Houve preocupação quanto à ventilação adequada na fuselagem, para que não houvesse estagnação do ar no seu interior. Mesmo assim, os dados de temperatura mostraram claramente efeito de histerese (um retardo no tempo de resposta das medições), conforme se observa na figura 4.7, em um voo realizado em 23/08/2006. O voo foi realizado em espiral e não houve correção dos dados coletados em função da velocidade do avião. Na figura 4.7, antes da sua subida, o avião ficou sobre a pista em preparação e, por isso, a temperatura é mais elevada (pois o asfalto estava aquecido). Ao descer a temperatura diminui significativamente, de quase 308 K para 298 K. Após poucos minutos parado sobre a pista novamente o sensor demonstra aumento da temperatura até aproximadamente 302 K.

Nos primeiros voos com o *Aerolemma-1*, já equipado com os sensores, mas antes de finalizar o processo de importação do piloto automático, foi instalado também um sistema de vídeo a bordo com transmissão para um *notebook* na estação de controle no solo. A ideia era realizar pilotagem rádio-controlada com base nas imagens recebidas por uma câmera instalada na parte frontal da *Aerolemma-1* acoplada a um sistema de transmissão via rádio com frequência

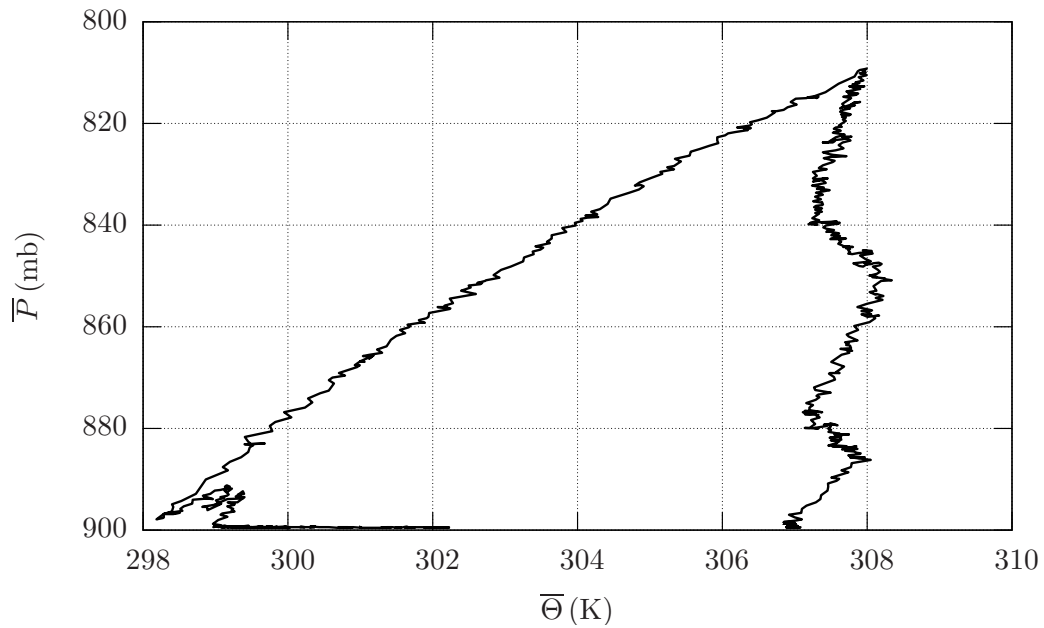


Figura 4.7: Histerese na temperatura medida com sensor dentro da fuselagem do *Aerolemma-1*.

de 2,4 GHz, conforme mostra a figura 4.8. O sistema não funcionou.

Em 26/08/2006 ocorreu a primeira queda do *Aerolemma-1*, em decorrência de fortes rajadas de vento com direções de aproximadamente 70° em relação à pista, durante o seu pouso. Nesta ocasião houve danos no trem de pouso e carenagem frontal e inferior do avião, cujos reparos levaram em torno de 2 meses para serem concluídos.

Paralelamente, foram feitas modificações para corrigir o problema de histerese, com a instalação de sensores adicionais do lado de fora da fuselagem (um termo-higrômetro e um termopar), com o objetivo de verificar a existência do efeito de estagnação do ar no interior do avião, que poderia ser a causa da histerese. Com os sensores externos instalados na parte inferior do avião, com uma capa cilíndrica para proteção contra radiação da pista (figura 4.9), as medições mostraram redução do efeito de histerese (figura 4.10). Entretanto, visualmente observa-se o efeito das altas temperaturas da pista de asfalto nas medições próximas ao solo.

O conjunto de equipamentos que acompanharam o *Aerolemma-1*, na maioria de seus voos está descrito na tabela 4.3.

Durante alguns meses, o sistema de vídeo foi melhorado e acreditava-se que seria possível chegar a alturas acima de 1,5 km, fora do alcance visual do piloto. Os principais problemas



Figura 4.8: Primeira câmera instalada na para transmissão de vídeo.

Tabela 4.3: Sensores a bordo do *Aerolemma-1*.

<i>Datalogger</i>	CR10X (Campbell Scientific)
Sensores de temperatura	Termopares (2)
Sensor de temperatura e umidade	CS500 (2) (Campbell Scientific)
Sensor de pressão	CS100 Setra (Campbell Scientific)

identificados foram a dificuldade de transmissão de longa distância causada pela vibração do motor a combustão e problemas no recebimento do sinal da estação em solo. Na tentativa de melhorar o sistema de imagem, foram instalados amortecedores de ruídos na fixação do sistema de imagem na aeronave e o sistema de transmissão da aeronave e recepção do solo foram adaptados com antenas mais potentes. As figuras 4.11-(a) e (b) mostram as melhorias no sistema de vídeo, tanto na câmera utilizada quanto na antena de transmissão. Nesta ocasião, foram utilizados dois GPS, para acompanhamento da rota do avião em tempo real, caso houvesse perda de comunicação com a Aeronave. O sistema continuou sem funcionar adequadamente.

Em 25/10/07 foram feitos os primeiros testes de voo com o piloto automático instalado no *Aerolemma-1*, o que o tornou um VANT propriamente dito, capaz de seguir rotas pré-programadas pelo usuário. Embora o *MicroPilot* fosse capaz de realizar voos completos, ele foi programado para os trechos de subida e descida, com decolagens e pousos comanda-



Figura 4.9: Detalhes dos sensores fora da aeronave.

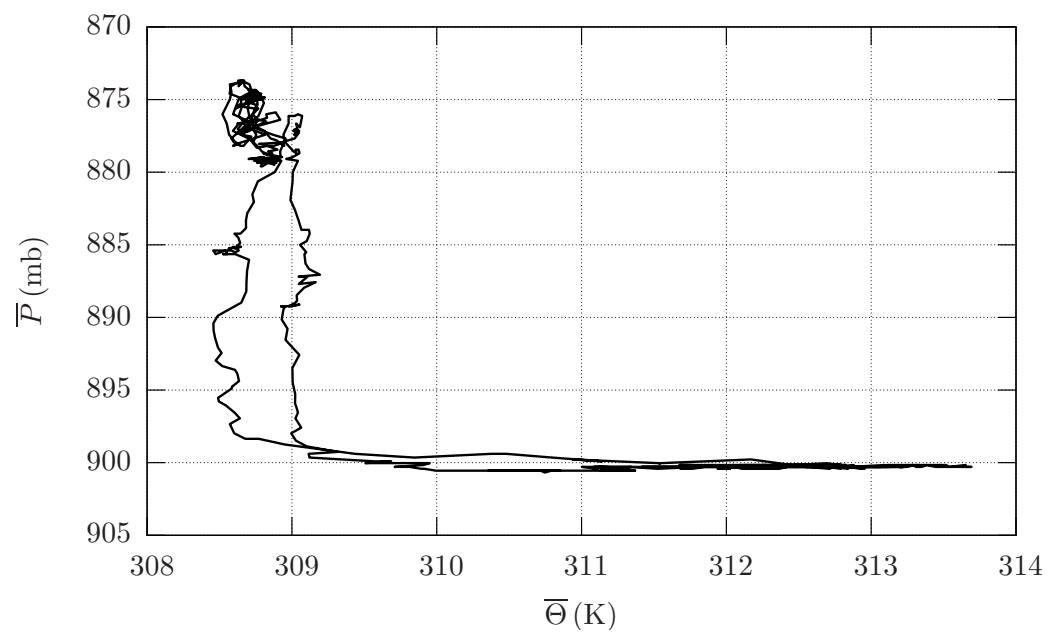


Figura 4.10: Medição de temperatura com efeito de histerese bastante reduzido, com sensor fora da fuselagem do *Aerolemma-1*.



Figura 4.11: Segunda câmera instalada e antena especial para transmissão de vídeo).

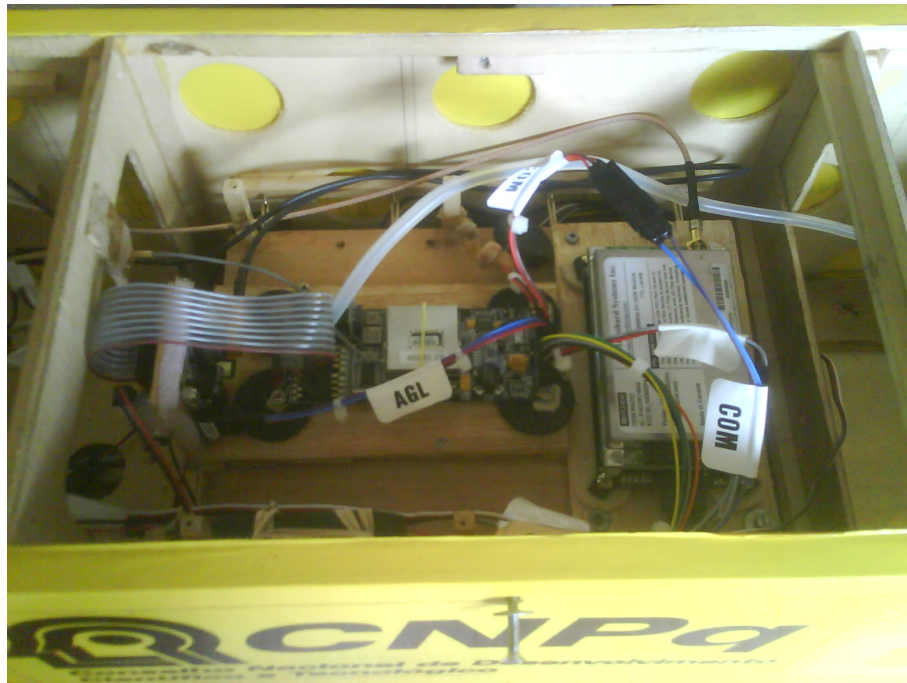


Figura 4.12: *MicroPilot* instalado no *Aerolemma-1* 25/10/2007.

dos pelo piloto em solo, através de rádio-controle. A foto da figura 4.12 mostra o *MicroPilot* instalado no *Aerolemma-1*.

Ao longo dos trabalhos de campo houve adequação da aeronave, regulagem e calibração de seus componentes de sustentação (centro de massa) e guiagem (leme, profundor e *aileron*) e do piloto automático, com testes de diferentes programações de voos.

Falhas humanas no uso do piloto automático causaram mais um acidente: a programação do sistema de voo autônomo entrou no estado de emergência, levando a aeronave em rota espiral até o solo, ao redor do ponto em que ocorreu a perda da programação e comunicação



Figura 4.13: *Aerolemma-1* após colisão do dia 20/11/2007.

com o sistema de recepção.

Neste episódio, ocorrido no dia 20/11/2007, o avião pousou a poucos quilômetros do sítio experimental. A aeronave foi encontrada 24 horas depois, nas proximidades do último ponto geográfico reportado pelo GPS, conforme mostra a figura 4.13.

Com os testes temporariamente paralisados em função dos danos ocorridos na queda, decidiu-se pela construção de uma nova aeronave (o *Aerolemma-2*), com as mesmas características.

4.4 *Aerolemma-2* e outros aeromodelos de testes

Após a queda do *Aerolemma-1*, alguns testes foram feitos em aeromodelos comerciais de pequeno porte. Como eram aeromodelos comuns, os testes eram realizados em outros aeroclubes, pois não havia necessidade de pista extensa para decolagens e pousos. Um dos locais de testes, uma grameira de Tijucas do Sul/PR, mostrou-se interessante para as medições da CLA, tornando-se o novo sítio experimental.



Figura 4.14: Outros aeromodelos utilizados para testes do piloto automático (a) e de catapulta (b).

Tabela 4.4: Características do *Aerolemma-2*.

Fabricante	<i>Ultimate Models</i> (sob encomenda)
Material	Madeira, isopor, fibra de vidro e alumínio
Envergadura	2,60m
Comprimento	1,60m
Peso	10,0kg
Motor	DA50, com ignição eletrônica
Potência	5,0HP a 16000rpm
Hélice	propulsora traseira
Capacidade de Carga	9,0kg
Autonomia	25 minutos

De março a agosto de 2008 foi testado o *MicroPilot* em um aeromodelo denominado *ThunderTiger*. Outros diversos testes, como o uso de catapultas, foram feitos também com um outro aeromodelo, denominado Jipe, conforme mostram as figuras 4.14-(a) e (b).

O *Aerolemma2* também foi construído pela *Ultimate Models* e com as características descritas nas tabelas 4.4 e 4.5. A figura 4.15 mostra a aeronave sendo montada para testes de voo em Tijucas do Sul.

Tabela 4.5: Características dos voos do *Aerolemma-2*.

Velocidade de Cruzeiro	80,0km/h
Velocidade na Subida	65,0km/h
Velocidade na Descida	85,0km/h
Razão de Subida	3,0m/s
Razão de Descida	5,0m/s
Pilotagem	rádio-controle

O desempenho de voo do *Aerolemma-2*, entretanto, foi inferior ao que se esperava,



Figura 4.15: *Aerolemma-2* sendo preparado para voo em pista de grama.

pois em função do seu peso havia necessidade de voos mais rápidos, o que dificultava pousos e decolagens, principalmente em pistas irregulares.

Com mais de dois anos de experiência, surgiu a demanda por um novo conceito de VANT, com o menor porte possível mas que fosse capaz de receber e carregar os sistemas de piloto automático e de medição do perfil atmosférico de temperatura e umidade. Isso exigiu o uso de sistemas de medições menores e mais leves.

4.5 *Aerolemma-3*

O *Aerolemma-3* foi concebido leve e pequeno, mas com porte suficiente para carregar os equipamentos necessários para obtenção de perfis de temperatura, pressão e umidade, além do piloto automático e seus componentes, como o GPS.

A melhor opção foi adaptar um aeromodelo comercial (*Hobbico, Hobbistar 60*) para ser capaz de carregar *datalogger*, sensor de pressão e cabos de conexão, baterias e todo o sistema de piloto automático (*MicroPilot*). Todos os equipamentos foram reduzidos a aproximadamente 800g de peso total. Um VANT menor melhorou muito a questão de segurança e reduziu os

Tabela 4.6: Características do *Aerolemma-3*.

Fabricante	<i>Hobicco</i> (com adaptações)
Material	Madeira e isopor
Envergadura	2,00m
Comprimento	1,50m
Peso	4,0kg
Motor	Glow OS Fx61
Potência	1,9HP
Hélice	propulsora dianteira
Capacidade de Carga	1,2kg
Autonomia	25 minutos

Tabela 4.7: Características dos voos do *Aerolemma-3*.

Velocidade de Cruzeiro	80,0km/h
Velocidade na Subida	75,0km/h
Velocidade na Descida	65,0km/h
Razão de Subida	2,0m/s
Razão de Descida	2,0m/s
Pilotagem	rádio-controle e piloto automático

riscos de danos por acidentes.

Em relação ao aeromodelo original, realizou-se alívio de peso da aeronave, através da troca dos servos para modelos menores (micro-servos) e retirada do trem de pouso (pois as decolagens seriam por catapulta e os pousos em grama).

Para permitir pousos mais lentos e seguros, adaptou-se um equipamento inexistente em aeromodelos comuns denominado *flap*, que é o dispositivo que muda a configuração do perfil da asa aumentando sua sustentação, o que permite a redução da velocidade em pousos e decolagens. Testes mostraram a capacidade de carga de 1 kg, suficiente para suportar o peso dos equipamentos. As características do *Aerolemma-3* estão descritas nas tabelas 4.6 e 4.7.

Este VANT foi capaz de atingir alturas de 1800 m. Como sua razão de subida é de aproximadamente 2,0m/s (tabela 4.7), o tempo necessário para cada quilômetro de ascensão é de 5 minutos (apenas subida), podendo variar em função das condições de tempo (vento, térmicas, etc). Logo, a autonomia de 25 minutos mostrou-se suficiente para voos desejados.

A figura 4.16 mostra o *Aerolemma-3* sendo equipado e logo após uma decolagem por catapulta, em 02/12/2008.

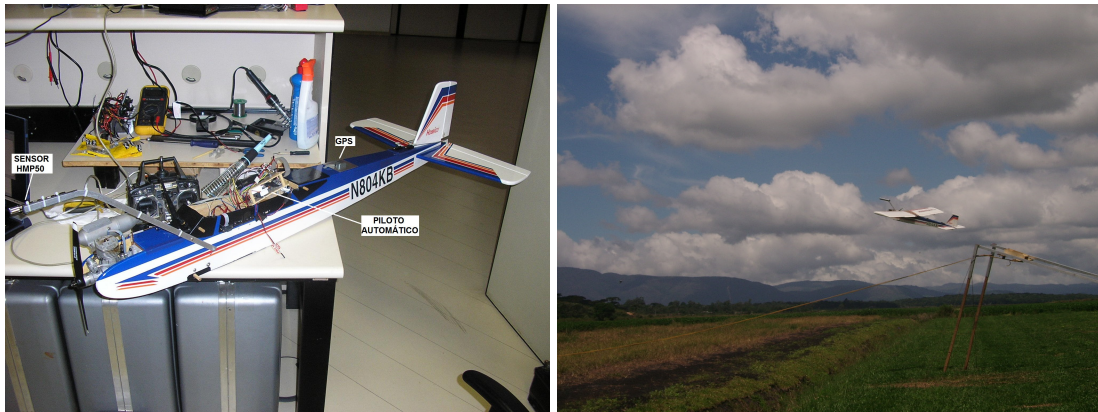


Figura 4.16: Aerolemma-3 sendo equipado em laboratório e em procedimento de decolagem por catapulta.

Tabela 4.8: Sensores a bordo do *Aerolemma-3*.

<i>Datalogger</i>	CR216 (Campbell Scientific)
Sensor de temperatura e umidade	HMP50 (Campbell Scientific)
Sensor de pressão	CS100 Setra (Campbell Scientific)

Este VANT permitiu campanhas bem sucedidas com perfilamento de toda a camada-limite. Os sensores instalados no *Aerolemma-3* estão indicados na tabela 4.8. O *datalogger* CR216 tem dimensões de $14,0 \times 17,6 \times 5,1$ cm e peso de 271 g, consideravelmente menor e mais leve do que o CR10X.

As primeiras decolagens do avião foram feitas com catapultas. Em seguida, elas foram substituídas para lançamento manual do VANT, que se mostrou tão eficaz quanto o primeiro, com a vantagem de não haver o trabalho de montagem e desmontagem da catapulta. O VANT foi capaz de realizar voos a cada 30 minutos.

Como os voos em toda a extensão vertical da camada-limite só foram possíveis com o *Aerolemma-3*, e como o horário de experimento era limitado pelo controle de tráfego aéreo da região para o período diurno, as campanhas de monitoramento da CLA se deram sob condições geralmente caracterizadas como camada-limite convectiva.

No capítulo seguinte serão mostrados alguns dos resultados obtidos nas campanhas de monitoramento. Foram 94 voos com sucesso em Tijucas do Sul em 17 dias. Em 7 dias o sistema de medição apresentou falhas, restando 8 dias de medições úteis da CLA.

4.6 Requisitos de segurança

Uso de VANTs está sujeito a diversos problemas e falhas humanas (tais como falhas na programação do piloto, erro na pilotagem manual, etc.). Demais problemas estão relacionados à realização de voos em condições meteorológicas adversas (ventos fortes, por exemplo), perda de potência do motor (em função da altitude), falha no sinal de GPS, entre outros.

Pelo risco apresentado e pelo aumento do uso de VANTs para diferentes fins no mundo inteiro, as agências responsáveis por controle de tráfego aéreo restringem o uso dessas aeronaves. Os voos do *Aerolemma-1*, conforme já abordado, foram feitos em área cujo tráfego aéreo já é liberado para o Aeroclube de Planadores de Balsa Nova, onde os testes foram feitos. Em Tijucas do Sul, entretanto, houve necessidade de se avaliar as restrições quanto ao uso do espaço aéreo, principalmente por se tratar de rotas aéreas comerciais.

A figura 4.17 mostra a NOTAM (*Notice to Airmen*) emitida pelo CINDACTA II, com validade entre 16/02/2009 até 09/08/2009, com dois intervalos autorizados para os voos (16/02/09 até 30/04/09 e 01/07/09 até 09/08/09). Posteriormente houve necessidade de se ampliar a autorização, e as novas NOTAMs eram válidas de 01/05/09 até 30/06/09 e de 01/10/09 até 28/02/10.

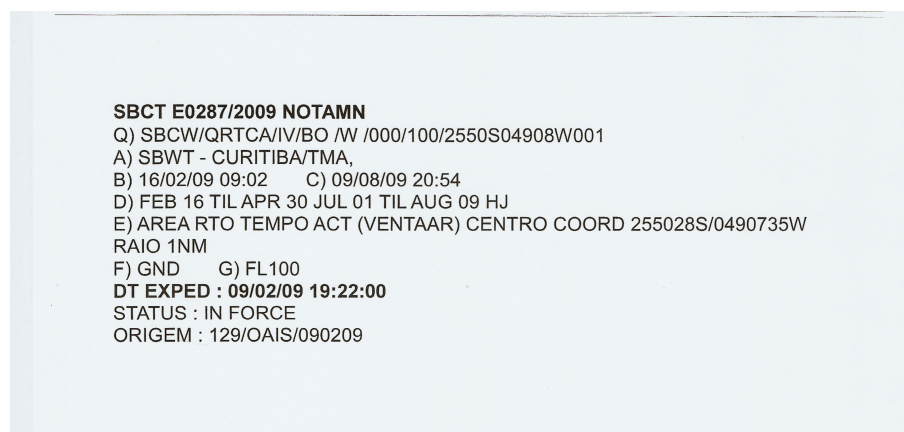


Figura 4.17: NOTAM emitida para os experimentos em Tijucas do Sul.

Conforme mencionado anteriormente, a NOTAM SBTC E0287/2009 delimitou uma área restrita para os experimentos na área de estudo, com um raio de 1,852 km, sobre a co-

ordenada 25°50'28"S e 49°7'35"W, e altitude de até 10000ft. Os voos ficaram condicionados ao cumprimento de orientações definidas em um Acordo Operacional firmado entre o LEMMA/UFPR e o CINDACTA II, que estabeleceu os “procedimentos de coordenação e as atribuições relativas ao desenvolvimento da fase aérea do Projeto VENTAAR”. Dentre as exigências operacionais mais importantes estão:

- o calendário de voos deveria respeitar os períodos de validade da NOTAM;
- os voos só poderiam ocorrer do nascer ao pôr-do-sol;
- cada decolagem deveria ser liberada pelo Controle Aéreo de Curitiba e o respectivo pouso informado (comunicação via telefone).

Segundo informações do CINDACTA, a NOTAM emitida no contexto desse projeto do LEMMA/UFPR foi a primeira para VANT no Brasil.

5 Medições da Camada-Limite Convectiva Obtidas com o VANT

O desenvolvimento do VANT levou mais de três anos para se consolidar para a realização de voos altos e com segurança, guiados pelo piloto automático.

Após o sistema de voo estar funcionando satisfatoriamente, com o *Aerolemma-3*, ainda que algumas vezes abaixo da inversão, foram feitos 18 dias de medições, com 94 voos com perfilamento total ou parcial da CLA. Entretanto, em 9 dias, somando 23 voos, as medições foram ruins. Os problemas apresentados eram devido principalmente ao efeito de histerese nas medições de temperatura.

A tabela 5.1 mostra as respectivas datas e horários dos voos. Observa-se que em alguns casos foram feitas apenas uma ou duas medições no dia, que representam situações adversas (geralmente problemas na aeronave), principalmente nos primeiros dias de campanha. As medições com bons perfis ocorreram a partir de 22/05/2009.

A frequência de amostragem nos voos experimentais mostra ser possível um voo a cada 30 minutos, mostrando a viabilidade do sistema para estudo da CLA em seu ciclo de variação diurna. Este é o intervalo mínimo possível, considerando o tempo de subida, descida, abastecimento do avião, *download* dos dados e comunicação de voo com o Controle de Tráfego Aéreo e liberação de cada decolagem.

As dificuldades para atingir maiores alturas geralmente se davam pelos seguintes motivos: regulagem de motor, que desligava-se em alturas mais elevadas e na presença de nuvens; autonomia, pois com o motor desregulado havia maior consumo de combustível; falhas na programação de voo; falhas na comunicação com o GPS, fazendo a aeronave voltar ao ponto de

Tabela 5.1: Perfilamentos realizadas com o *Aerolemma-3*.

Data	#	Horários aproximados dos voos (hora local – GMT–3 h)
10/02/2009	1	14h35
19/02/2009	2	13h45, 14h30
05/03/2009	3	12h50, 13h15, 15h00
25/03/2009	3	09h30, 10h00, 10h30
31/03/2009	3	10h15, 11h00, 11h50
07/04/2009	4	10h15, 11h05, 13h00, 14h00
29/04/2009	3	10h15, 11h00, 11h30
16/05/2009	2	15h00, 16h00
22/05/2009	4	09h30, 10h15, 11h00, 11h30
04/06/2009	9	09h30, 10h45, 11h30, 12h30, 13h30, 14h30, 15h30, 16h30, 17h30
19/06/2009	6	08h45, 09h15, 10h00, 10h30, 11h15, 12h30
13/07/2009	7	10h45, 11h45, 14h15, 15h15, 16h15, 16h45, 17h30
14/07/2009	10	09h15, 09h45, 10h30, 11h15, 12h00, 14h00, 14h45, 15h30, 16h00, 16h45
04/08/2009	4	09h30, 10h15, 11h30, 12h00
11/08/2009	14	08h30, 09h00, 09h30, 10h00, 10h30, 11h00, 11h30, 13h00, 13h15, 14h00, 15h15, 15h45, 16h45, 17h15
10/11/2009	7	09h45, 10h15, 11h00, 12h45, 13h15, 14h15, 15h00
20/01/2010	11	07h00, 07h30, 08h00, 08h45, 09h30, 10h15, 11h00, 11h45, 13h15, 13h45, 14h30
04/03/2010	1	14h30

decolagem; entre outros. A tabela 5.2 mostra a evolução da altura alcançada pelo VANT.

Além disso, houve o mesmo problema de tempo de resposta dos sensores apresentado com o sensor CS500 no *Aerolemma-1*. O problema na medição pode ser visto na figura 5.1, que mostra um dos primeiros voos com o sistema completo, de piloto automático e de sensoriamento de temperatura e umidade, no dia 05/03/2009. A figura mostra claramente que há um comportamento bastante diferente entre a subida e descida.

A figura 5.2 mostra a medição de temperatura e umidade ao longo do tempo. Uma inspeção conjunta dessas duas figuras permite concluir que na subida a temperatura em todo o perfil (a menos da superfície) é maior do que na descida. No perfil de umidade específica as diferenças são baixas e podem representar variações reais na CLA. Observa-se ainda que o voo foi até 800 m de altura e não atingiu a inversão térmica.

Nos voos realizados entre o período de 10/02/2009 até às 9h30 do dia 22/05/2009 os perfis de temperatura ainda demonstravam problema no tempo de resposta dos sensores e a

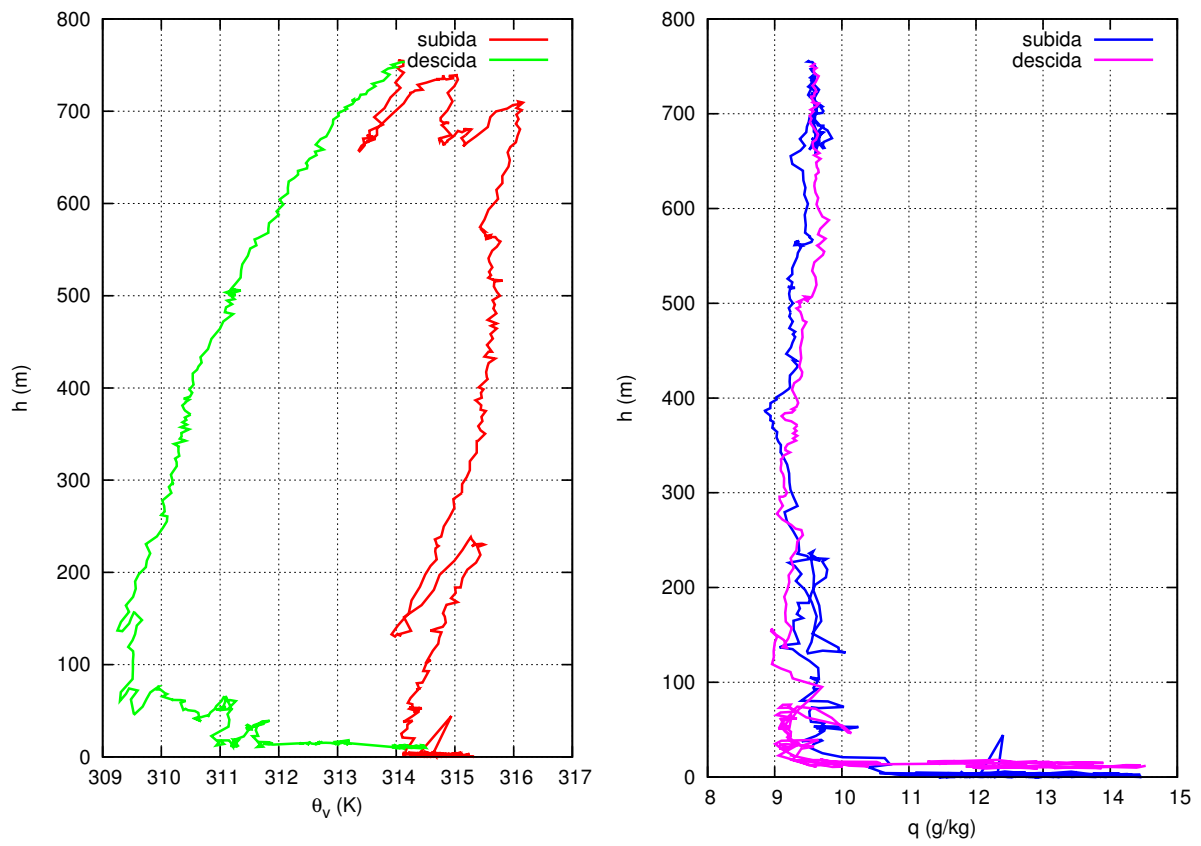


Figura 5.1: Perfis de temperatura potencial e umidade em 05/03/2009–13h15. Na figura da esquerda, o perfil mais quente representa a subida do VANT.

Tabela 5.2: Alturas máximas para cada voo (ver tabela 5.1).

Data	Alturas máximas de voo para cada voo
10/02/2009	512,0
19/02/2009	504,6, 514,2
05/03/2009	506,1, 756,2, 342,9
25/03/2009	244,6, 657,2, 1099,5
31/03/2009	1098,5, 1378,5, 1344,2
07/04/2009	1079,2, 1388,1, 1386,1, 1371,4
29/04/2009	1369,9, 1356,8, 1814,3
16/05/2009	1345,6, 1773,6
22/05/2009	1685,7, 1677,9, 1801,7, 1804,6
04/06/2009	1786,9, 1787,0, 1610,5, 1787,1, 1787,1, 1804,0, 1797,2, 1630,1, 1788,8
19/06/2009	1305,9, 463,6, 1684,1, 1241,8, 708,1, 1127,3
13/07/2009	1749,8, 1719,8, 1808,6, 1800,1, 1803,0, 719,9, 1629,4
14/07/2009	1774,6, 1772,6, 1771,2, 1770,1, 1782,0, 1788,2, 1783,9, 1773,3, 1781,6, 1782,6
04/08/2009	1783,2, 1785,1, 1786,5, 1791,0
11/08/2009	1743,5, 1667,9, 1769,4, 1586,3, 1757,4, 1761,4, 1766,0, 734,7, 1779,8, 1776,5, 1777,2, 1769,1, 1775,8, 1773,7
10/11/2009	1819,2, 1773,8, 1822,8, 1693,3, 1461,4, 1834,7, 1833,6
20/01/2010	644,0, 760,3, 1698,0, 1317,6, 1507,0, 1710,7, 1516,6, 1694,9, 1468,7, 1581,8, 1839,9
04/03/2010	1706,1

estrutura da CLA estava sendo avaliada principalmente com os perfis de umidade, que sofrem menos deste problema (ver figura 5.1).

Em 22/05/2009, o termo-higrômetro HMP50 foi parcialmente desmontado e teve uma capa de proteção interna removida, deixando o sensor mais exposto, com mais troca de ar no seu entorno, o que melhorou muito o aspecto do perfil de temperatura. A figura 5.3 mostra a diferença obtida entre os perfis, não demonstrado no perfil de umidade.

Esses dois voos foram feitos com intervalo de 45 minutos (mas entre a descida do primeiro voo e a subida do segundo o intervalo foi de apenas 10 minutos, aproximadamente). Nesse dia, as condições de tempo eram de céu claro, com nuvens esparsas e pouco densas, com vento norte de velocidade moderada.

Nos dois perfis da figura 5.3, é possível observar a existência de duas faixas de inversão térmica: a primeira localizada perto de 200 m de altura, que é a nova camada de mistura sendo gerada; e acima dela, existe uma outra inversão perto dos 800 m, que representa a camada-limite

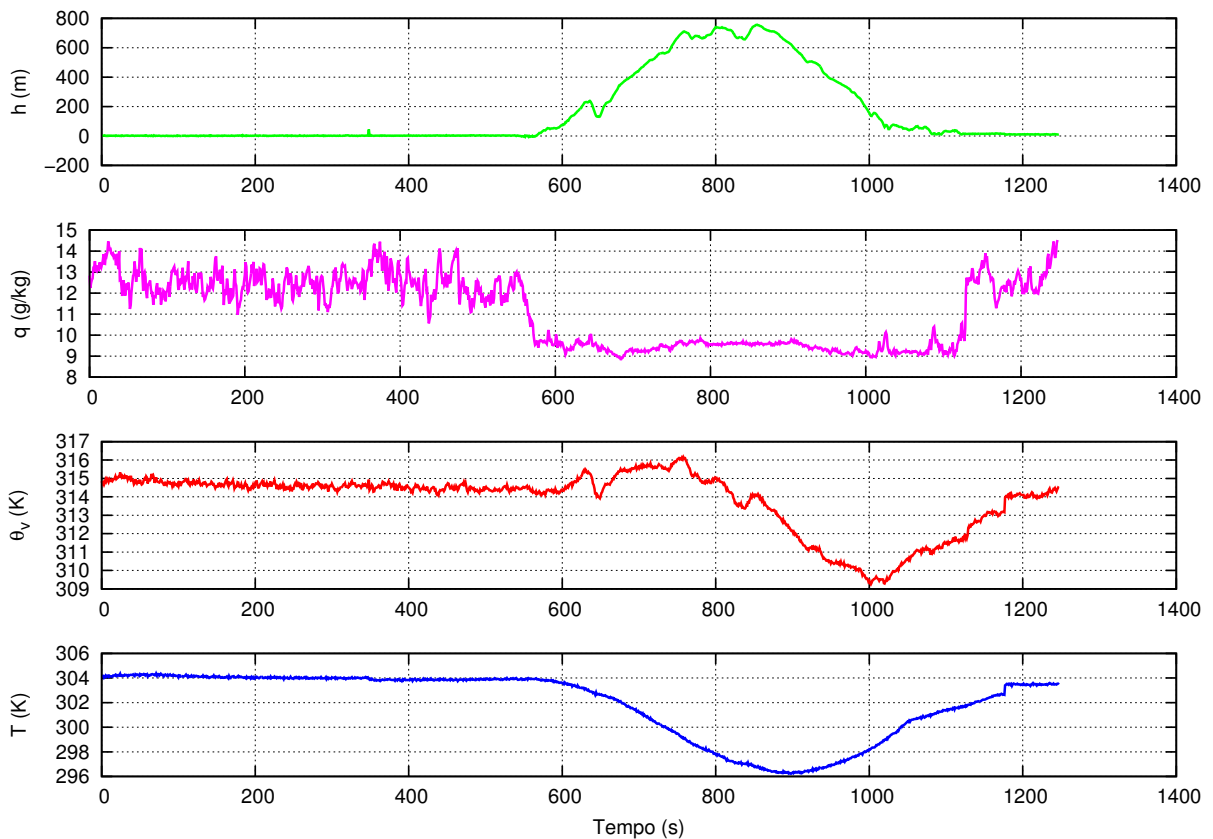


Figura 5.2: Variação no tempo da altura da VANT (h), umidade específica (q), temperatura potencial virtual (θ_v) e temperatura (T) para o mesmo voo da figura 5.1.

do dia anterior, ou seja, indica a camada residual.

As figuras 5.4 e 5.5 mostram os outros dois voos realizados no dia 22/05/2009, às 11h00 e 11h30. Na primeira, pode-se observar um perfil quase constante de temperatura potencial virtual na CLA com um valor perto de 300–301 K, o mesmo ocorrendo com a umidade específica, que é pouco variável em torno de 9 g/kg. Perto de 800m de altura encontra-se a base da inversão térmica, caracterizada por forte gradiente positivo de temperatura potencial, que varia mais de 4 K entre as alturas de 800 e 1000 m, e gradiente negativo de umidade, que se reduz de quase 8 para 1 g/kg, entre esses níveis.

Quando se compara com os perfis da figura 5.3, observa-se que houve o colapso da camada residual, resultando em um abrupto aumento da camada misturada. Para o segundo perfil, das 11h30, a superfície e o restante da camada de mistura estão cerca de 1 K mais quentes. A base da inversão, neste caso, está mais elevada, a cerca de 900 m acima do solo. A região onde

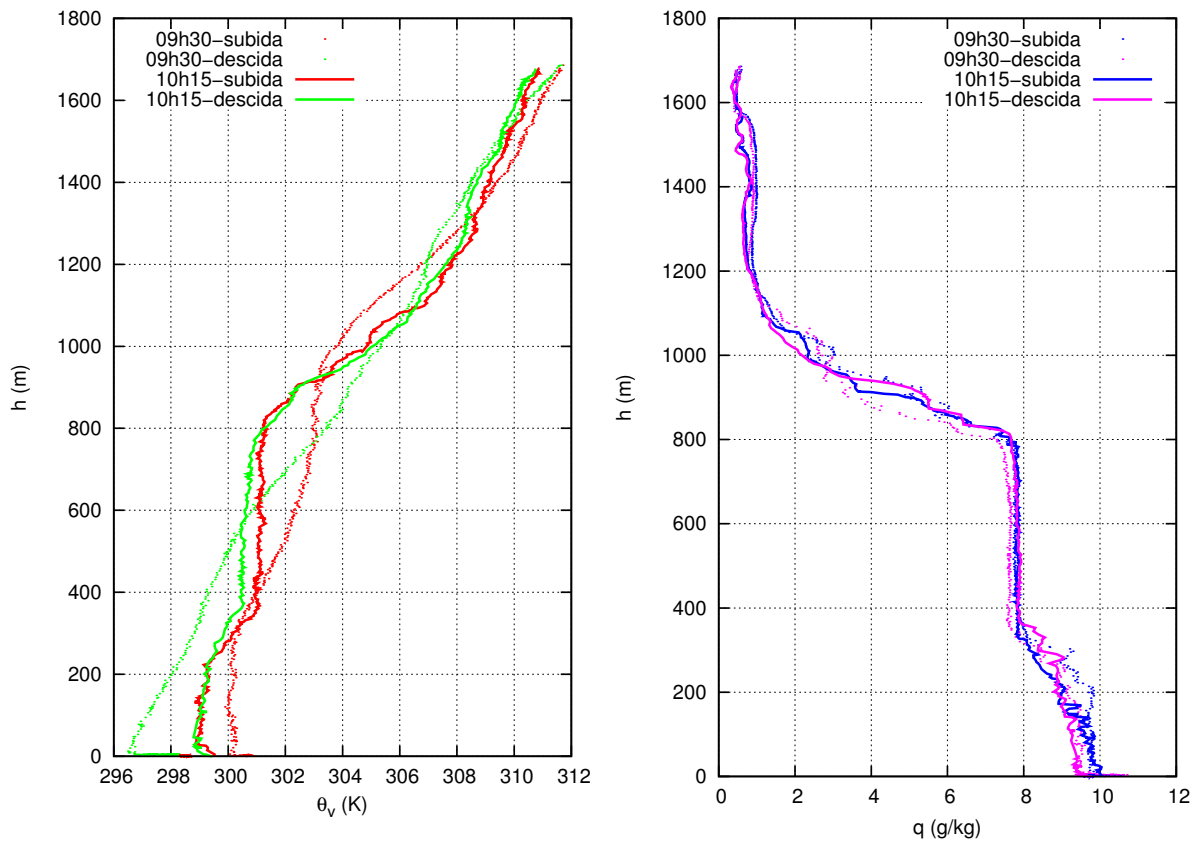


Figura 5.3: Perfis de temperatura e umidade para duas medições sequenciais: (a) em 22/05/2009: 9h30 – com histerese; (b) 10h15 – sem histerese (após retirada da capa protetora do sensor).

houve aumento de 100 m da base da inversão é caracterizada pelo misturamento da umidade nesta mesma porção da CLA, conforme também se observa no gráfico de $q(z)$.

No caso do dia 22/05/2009 não houve mudanças nas condições da atmosfera livre, o que permite concluir que a alteração dos perfis da CLA é forçada quase que exclusivamente pelos fluxos superficiais.

Com base na análise dos demais perfis para os 4 voos realizados nesse dia, a altura da base da inversão térmica variou conforme os dados que estão na tabela 5.3 (no horário das 9h30 a altura é definida pelo perfil de umidade, pois o de temperatura não evidencia a inversão). Verifica-se nos voos entre 10h15 e 11h00 que a altura da inversão teve um grande salto, devido ao colapso da camada residual noturna.

Observou-se pelos dados brutos do experimento que há maior variabilidade local nas

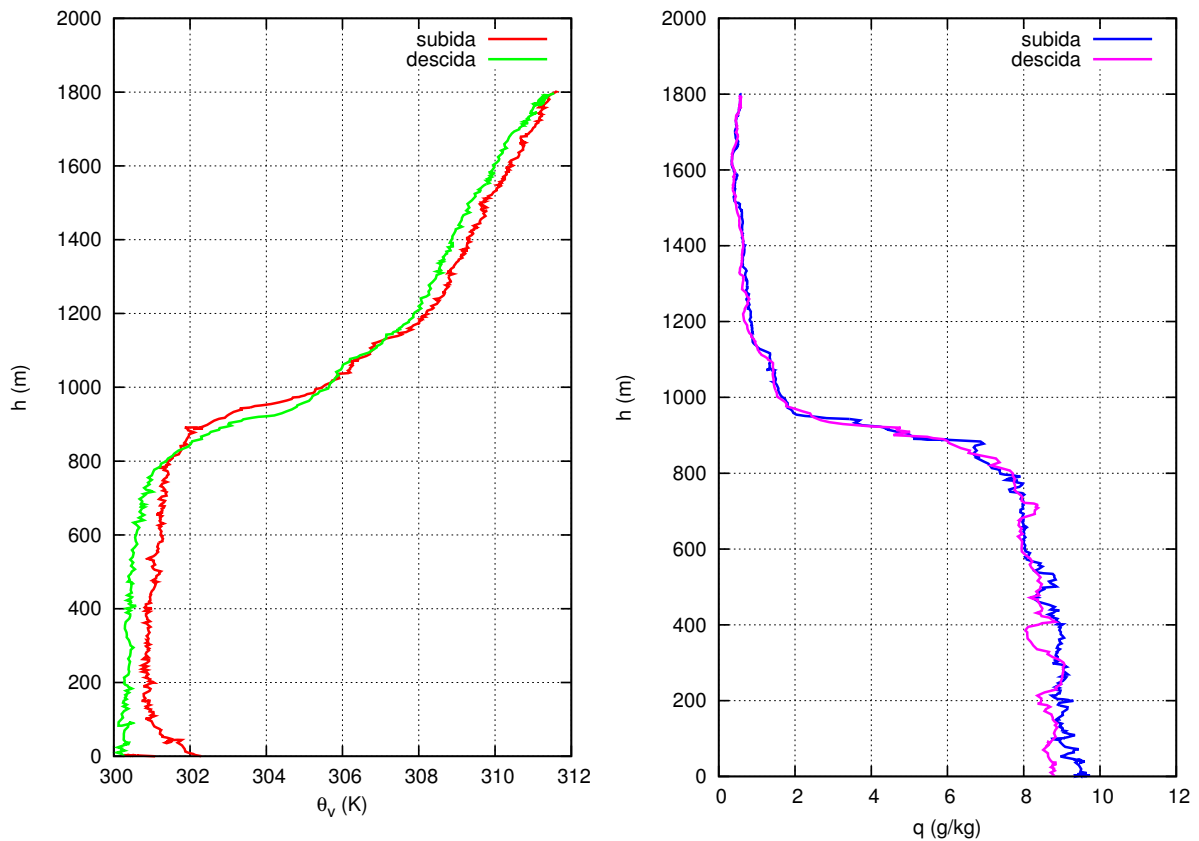


Figura 5.4: Perfil de temperatura potencial virtual e umidade da atmosfera em 22/05/2009: 11h00.

Tabela 5.3: Evolução da CLA durante a manhã de 22/05/2009.

Horário	Altura da base da inversão térmica
09h30	250 m
10h15	250 m
11h00	800 m
11h30	900 m

medições de θ_v e q nas proximidades da superfície, principalmente quando o VANT está em solo antes e depois do voo, existindo um comportamento diferente nas flutuações, quando comparadas com medidas feitas em alturas elevadas.

A figura 5.6 (dados de 11/08/2009: 11h00) mostra, por exemplo, que antes da aeronave começar a subir há uma queda na temperatura potencial virtual θ_v . Existem duas possíveis explicações para maiores flutuações e variações nos valores médios de temperatura e umidade: a proximidade com a superfície pode fazer o sensor sentir os fluxos superficiais, principalmente de calor sensível; ou o posicionamento do sensor dentro de um cilindro preparado para proteger

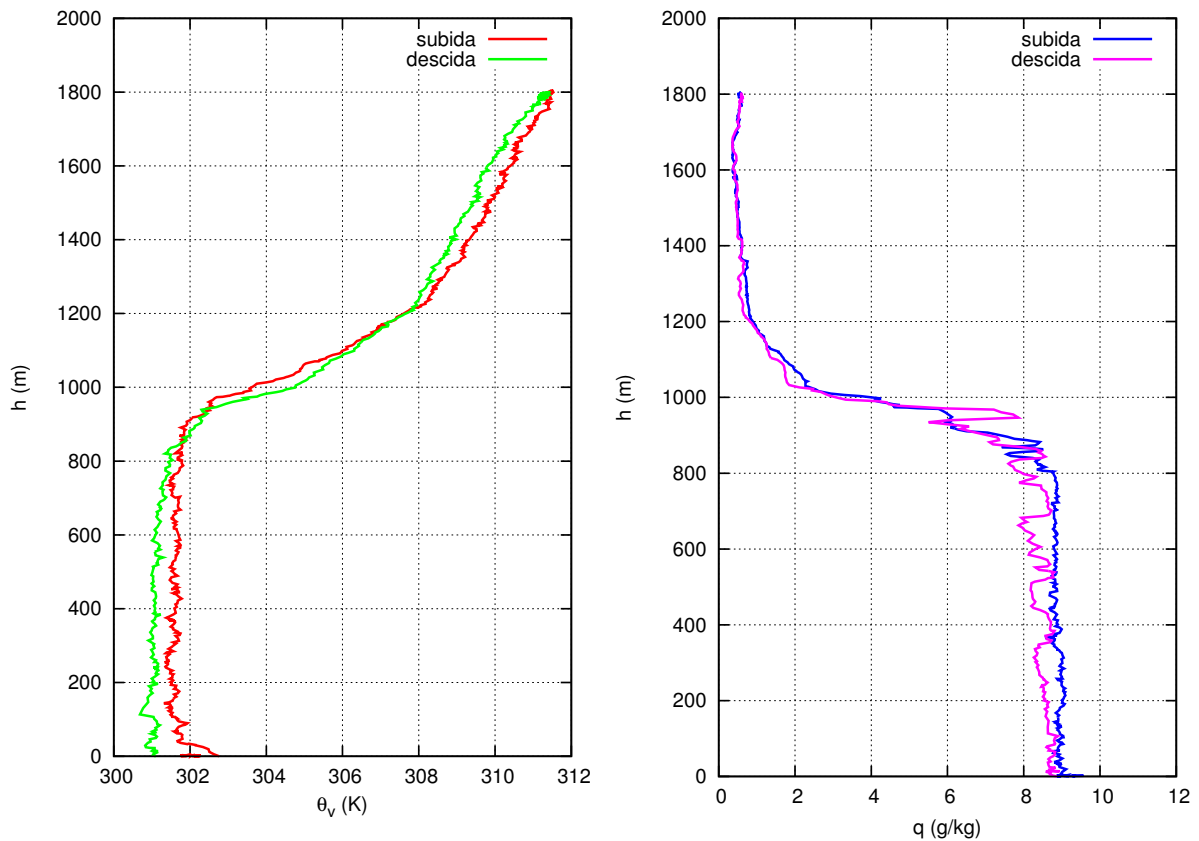


Figura 5.5: Perfil de temperatura potencial virtual e umidade da atmosfera em 22/05/2009: 11h30.

o HMP50 da radiação solar (conforme mostra a figura 5.7) pode ter interferido na circulação de ar. Essas situações devem ser evitadas.

De acordo com a figura 5.6 a temperatura termodinâmica não é muito alterada com o avião no solo e nem apresenta flutuações. Isso mostra que apenas a umidade do sensor apresenta esse comportamento anômalo na superfície, transferindo para as medições de q e consequentemente θ_v . Uma simples filtragem nos dados pode minimizar esse problema: desconsiderar o período em que o sistema de monitoramento está em funcionamento mas a aeronave ainda se encontra em solo.

No sítio experimental de Tijucas do Sul não foram feitas medição da estrutura da CLA com outros sistemas de medições do perfil atmosférico. Mas foram feitas algumas comparações entre dados medidos com o VANT no sítio experimental e na estação de radiossondagem do Aeroporto Internacional de Curitiba (CWB/SBCT/83840), localizado no município de São José

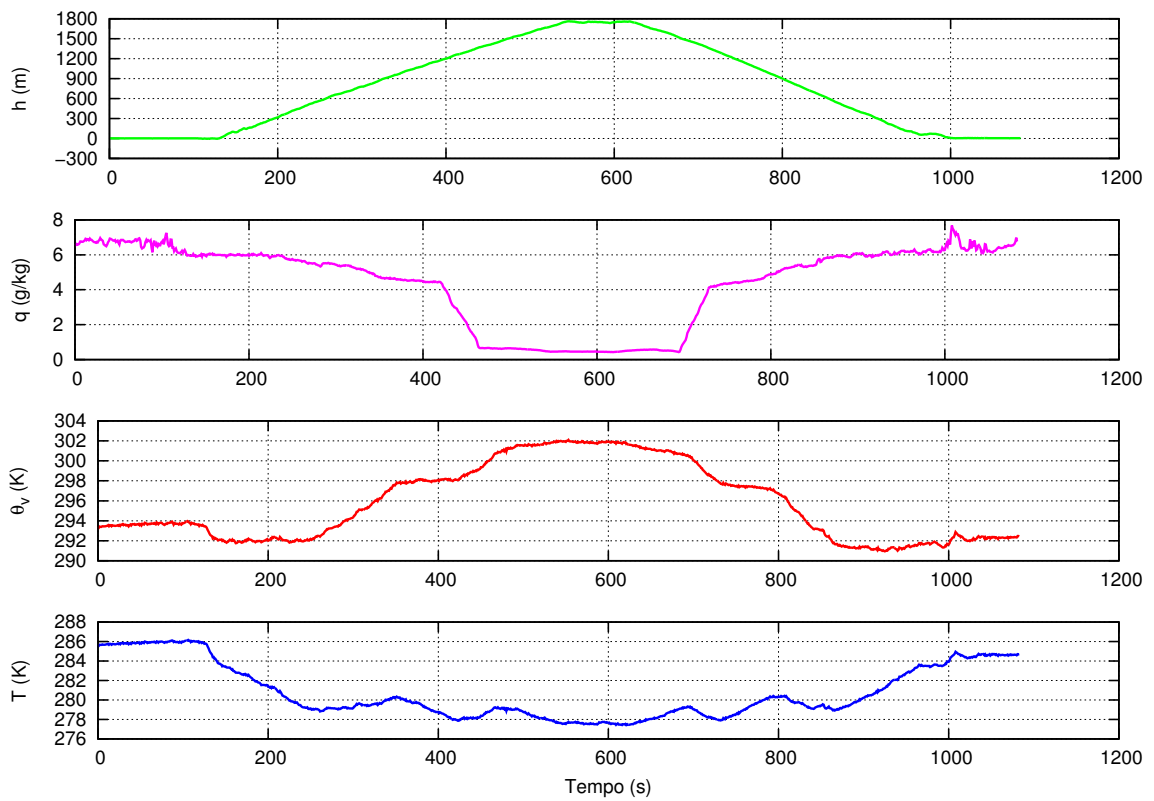


Figura 5.6: Série temporal da altura h , umidade específica q , temperatura potencial virtual θ_v e temperatura T em 11/08/2009: 11h00.

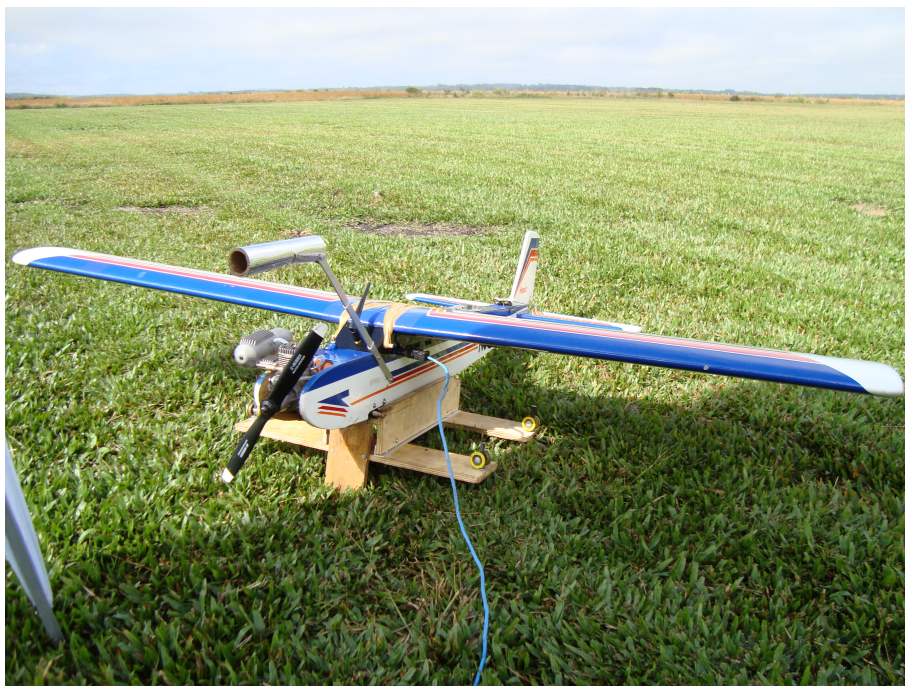


Figura 5.7: Sensor HMP50 instalado dentro de um cilindro de proteção.

Tabela 5.4: Padrão para agrupamento de dados das radiossondagens.

Informações de radiossondagens - código <i>TEMP</i>		
Parte	Identificação do Grupo	características
A	TTAA	níveis de pressão mandatários da superfície até 100 mb, e vento máximo
B	TTBB	níveis significativos da superfície até 100 mb, e a nebulosidade
C	TTCC	níveis de pressão mandatários acima de 100 mb
D	TTDD	níveis significativos acima de 100 mb

dos Pinhais/PR.

Essa estação de lançamento de radiossondas está localizada nas coordenadas 25°31'42.51"S e 049°10'32.79"W, com nível de 911 m acima do mar e a aproximadamente 40 km a norte da área experimental de Tijucas do Sul. Um resumo sobre os blocos de dados disponíveis das radiossondagens que operam nos aeroportos pode ser verificado na tabela 5.4.

Os dados das radiossondagens do aeroporto SBTC8340 foram obtidas no formato *FSL*, similar ao utilizado pelo Centro Nacional de Previsão de Tempestades Severas dos Estados Unidos (NSSF). Detalhes sobre o formato de armazenamento dos dados podem ser encontrados em Schwartz e Govett (1992). Nos arquivos estão disponibilizados dados de pressão, altura, temperatura, temperatura do ponto de orvalho, direção do vento e velocidade do vento.

Ainda que tenham sido avaliados todos os dias dos experimentos com o VANT, existem algumas falhas nas radiossondagens. A seguir, são mostrados alguns exemplos de comparação entre os voos e as radiossondagens, com discussão sobre aspectos importantes.

A figura 5.8 mostra o perfilamento atmosférico com o VANT e os pontos de medição da radiossondagem. Nesta situação ainda havia o efeito de histerese no sensor. Observa-se que, no perfilamento com o *Aerolemma-3*, não se pode identificar a inversão existente perto dos 400 m de altura, conforme mostram os pontos significativos da radiossondagem. Além disso, o voo foi inferior à segunda inversão existente em 1600 m, na camada residual. Esta figura permite observar que a média aritmética entre os valores na subida e descida do VANT não é suficiente para corrigir a histerese.

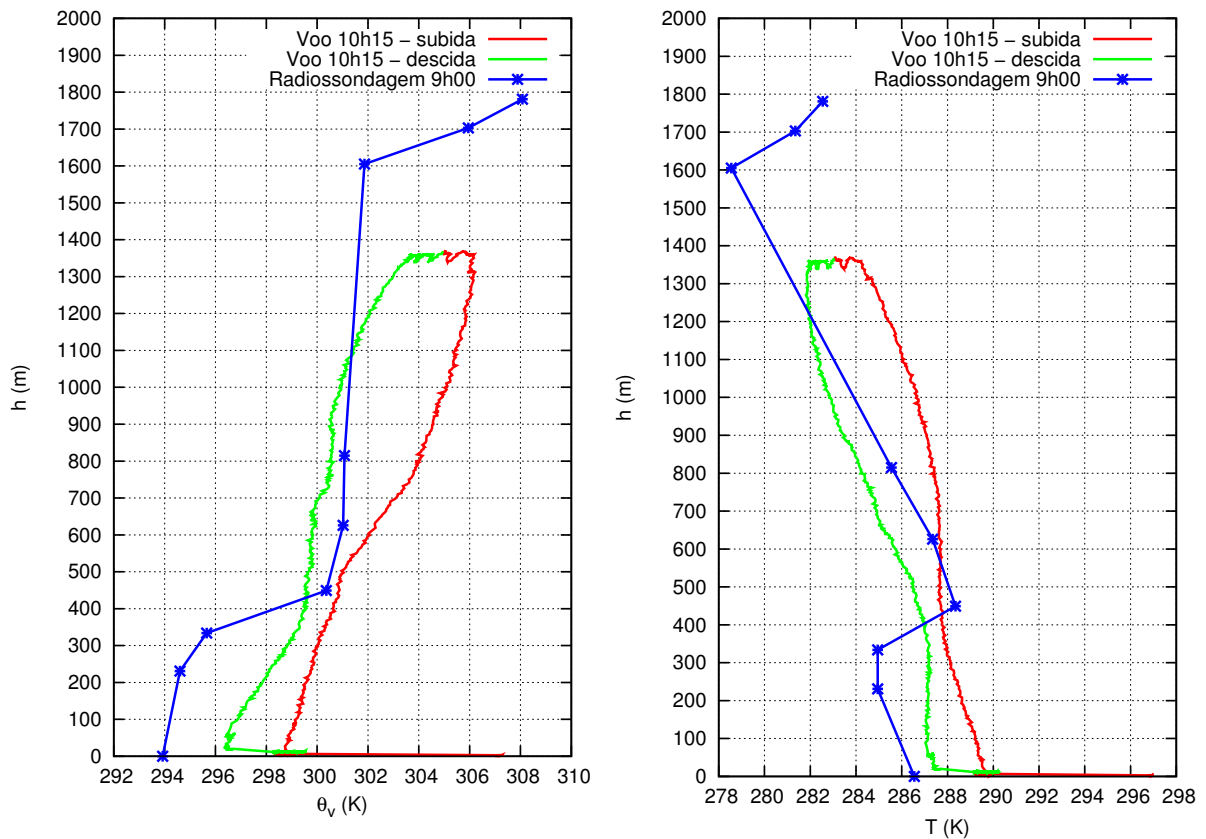


Figura 5.8: Comparação entre o perfil do voo (10h15) e da radiossondagem (9h00), para o dia 29/04/2009.

Com o sensor HMP50 funcionando adequadamente, no dia 29/06/2009 percebe-se uma melhor correlação entre os perfis, embora eles tenham sido feitos com uma hora de diferença (figura 5.9). Neste caso, visualiza-se uma camada instável até os 400 m. A radiossondagem mostra temperaturas menores perto da superfície, o que se deve ao fato de ter medido uma hora antes e também pela provável variabilidade das condições da superfície (albedo, cobertura vegetal, etc).

Avaliando os perfis nesse mesmo dia, mas em horário mais avançado, percebe-se a grande alteração da CLA em relação à radiossondagem da manhã. A figura 5.10 mostra o perfil do voo das 12h30, evidenciando o aquecimento de toda a CLA, cujo topo está a aproximadamente 900 m para este horário.

As duas grandes diferenças entre os perfis dos dados disponíveis das radiossondagens e os obtidos com o VANT são a resolução espacial dos dados e a resolução temporal. Por

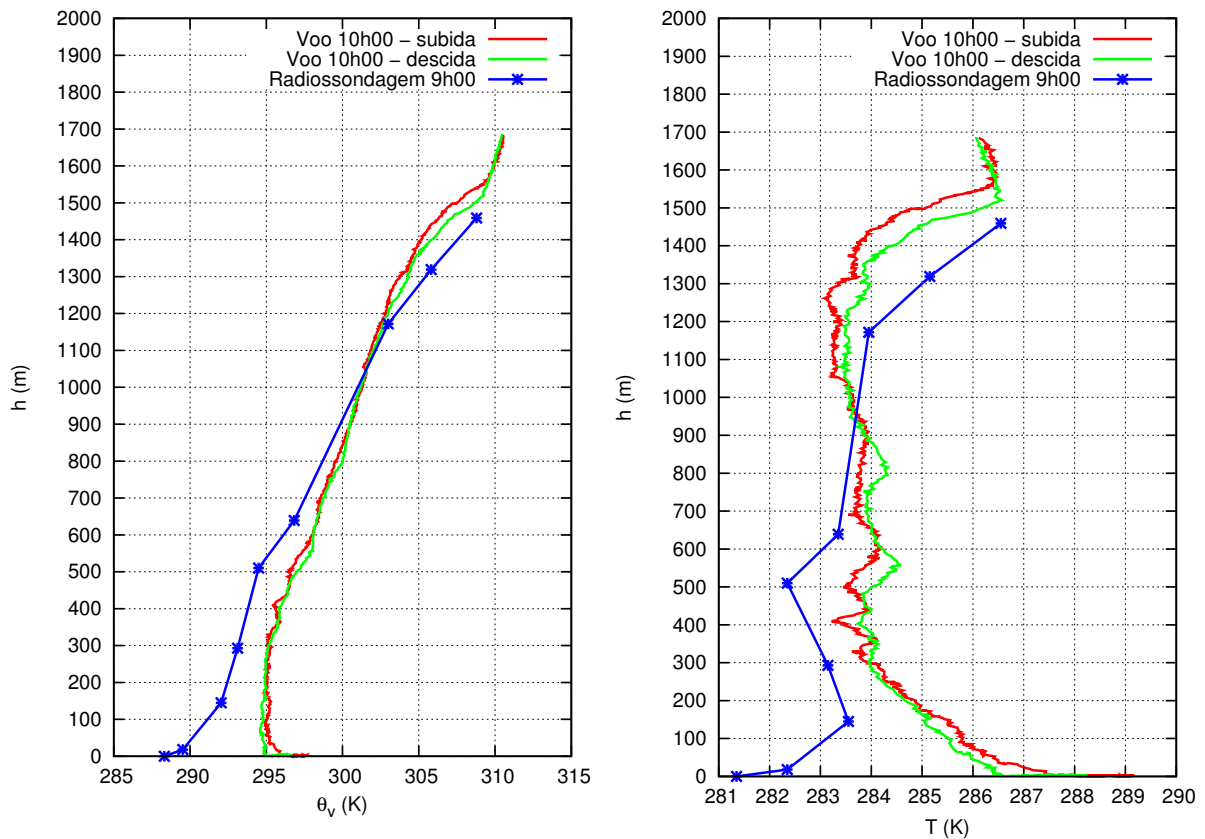


Figura 5.9: Comparação entre o perfil do voo (10h00) e da radiossondagem (9h00), para o dia 19/06/2009.

exemplo, no dia 11/08/2009 foram feitas 14 medições com o VANT, das 8h30 até 17h15. No caso das radiossondagens operacionais, os dados mostram uma única medição às 9h00.

Conforme já abordado na revisão sobre as técnicas de monitoramento da CLA (capítulo 3), não se pode dizer qual plataforma é melhor, uma vez que o VANT também possui suas limitações operacionais e de segurança. Mas os dados apresentados mostram que se trata de uma boa alternativa para a medição da CLA.

Destaca-se que os dados mostram a condição da CLA em alguns períodos de transição, que em geral são acompanhados de grandes alterações da estrutura da camada, causando em muitas situações descontinuidades no perfil de escalares. No início da manhã há o colapso da camada residual, que é invadido pela camada misturada; no final da tarde geralmente ocorre o inverso: a camada de mistura superficial deixa de existir, dando lugar à camada estável noturna e origina-se a nova camada residual acima dela.

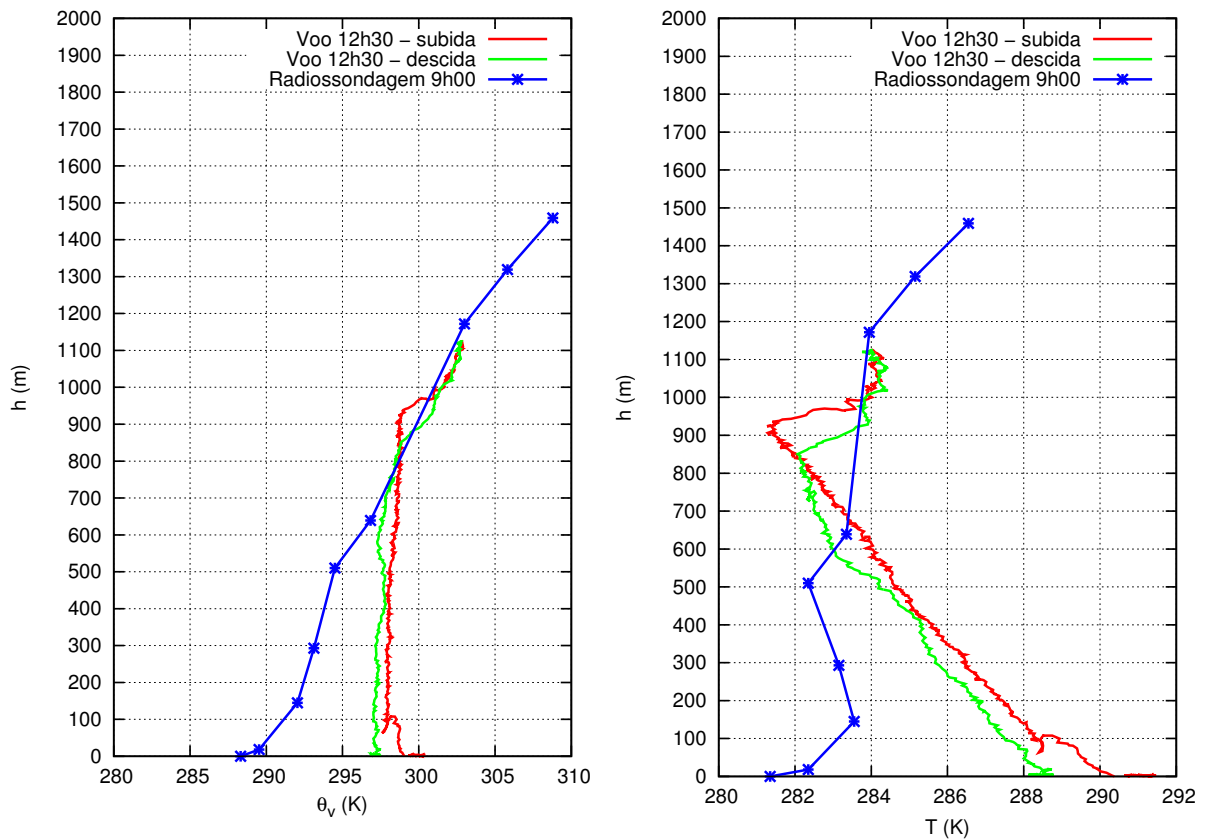


Figura 5.10: Comparação entre o perfil do voo (12h30) e da radiossondagem (9h00), para o dia 19/06/2009.

Períodos de transição dificultam a delimitação adequada da estrutura e altura da CLA (BEYRICH, 1997; GRIMSDELL; ANGEVINE, 2002; PIRINGER et al., 1998).

Em algumas situações existem duas ou mais inversões, que também podem trazer erros na determinação da altura da CLA, embora a literatura aponte para o problema da camada residual (STULL, 1988; OKE, 1987). Da mesma forma, dificuldades na interpretação de dados do perfil atmosférico dos dados do experimento FIFE estão detalhadamente discutidas no capítulo 7.

O histórico do desenvolvimento do VANT *Aerolemma-3* e os seus dados coletados foram tratados e utilizados para cálculo da altura da CLC, avaliação de fluxos de entranhamento. Os resultados podem ser encontrados em Gonçalves et al. (2006), Malheiros et al. (2009), Dias et al. (2010), Dias et al. (2012), Dias et al. (2009) e Freire e Dias (2013).

6 Modelo Integral de Crescimento da Camada-Limite Convectiva

Este capítulo traz uma revisão sobre o modelo integral, também conhecido como *slab model* ou *jump model*, desenvolvido para determinar a altura da CLC, com base em medições superficiais e dados do perfil atmosférico, com parametrizações relativamente simples. O fundamento do modelo baseia-se na integração das equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, cujo sistema de equações resultante permite avaliar a dinâmica da CLC.

Na maioria das aplicações o modelo integral é utilizado para calcular a altura da CLC. Neste trabalho, o modelo integral é utilizado na sua forma “invertida”, para o cálculo do fluxo de calor sensível a partir dos dados da altura da CLC. A ideia inicial partiu da avaliação de perfis consecutivos obtidos pelo *Aerolemma-3*, que permitiu observar a dinâmica da CLA em escalas apropriadas.

Diversos trabalhos mostram a utilização de modelos da CLA para calcular fluxos superficiais com base em medições consecutivas do perfil atmosférico feitas por radiossondagens (MAWDSLEY; BRUTSAERT, 1977; DIAK; WHIPPLE, 1994; GRYNING; BATCHVAROVA, 1999), aviões tripulados (BETTS, 1992; LAUBACH; FRITSCH, 2002) ou a partir de medições com LIDAR (EICHINGER et al., 2005).

Recentemente foi publicado um trabalho cujo estudo demonstra a obtenção de fluxos da superfície a partir de medições sucessivas do perfil atmosférico de temperatura e umidade com VANTs é ainda uma aplicação pouco testada. Bonin et al. (2013) trazem a informação de que desconhecem outros trabalhos similares.

Bonin et al. (2013) utilizam o VANT *Smartsonde*, que, conforme apresentado na seção 3.4, atinge alturas de aproximadamente 200 m, limitando o trabalho a avaliações apenas no período do final da tarde, quando o resfriamento da superfície cria uma camada estável próxima ao solo e o fluxo de calor sensível é negativo, ou seja, no sentido da atmosfera para a superfície. A aplicação foi feita, portanto, sem conhecer a estrutura da CLA acima de 200 m, não permitindo o estudo em condições convectivas.

Ao longo da presente pesquisa pensou-se em aplicar a ideia de utilizar os modelo integral invertido para calcular os os fluxos a partir dos dados da CLC medidos com o VANT *Aerolemma-3*. Entretanto, a estação superficial instalada no mesmo sítio experimental do VANT não monitorou radiação líquida ou fluxo de calor latente, o que limitou o fechamento do balanço de energia e a aplicação do modelo integral.

Por isso, decidiu-se aplicar o modelo em um bom conjunto de dados de radiossondagens e medições superficiais do experimento FIFE. A vantagem é utilizar dados suficientes para aplicação e validação da metodologia de um experimento que contou com mais de 100 pesquisadores que coletaram informações em campanhas intensivas, com amplo tratamento e validação dos dados. A desvantagem foi utilizar dados de radiossondagens com intervalos de lançamento de aproximadamente 2h30, enquanto os dados do VANT foram obtidos a cada 30 ou 45 minutos.

Os resultados dos modelos integrais para cálculo do calor sensível superficial não foram satisfatórios. Parte dos erros são as próprias simplificações do modelo, que serão mostradas a seguir. Embora os modelos possam considerar efeitos de advecção e movimentos verticais de grande escala na atmosfera, eles não foram considerados pelos motivos que serão expostos na discussão dos resultados, no capítulo 7. Outra fonte de erros é a leitura e interpretação dos dados do perfil atmosférico, assunto que também fará parte das discussões deste trabalho.

Uma vez que o conceito do modelo integral é válido para a distribuição de qualquer escalar na atmosfera, esses modelos vêm sendo utilizados para estimativas de fluxos de poluentes. Arellano et al. (2009), por exemplo, aplicaram o modelo integral para a estimativa do

fluxo de emissões superficiais de isopreno (composto orgânico cuja fórmula química é C_5H_8) a partir de medições de concentrações no perfil da CLC. Pino et al. (2012) estudaram balanço de CO_2 na CLC também com base em modelo integral. As equações utilizadas nesses trabalhos são similares às que serão apresentadas a seguir.

Foram testadas diferentes parametrizações do modelo integral, para avaliar as aplicabilidades e limitações da metodologia. Embora o modelo apresente bons resultados para a altura da CLC, ele deve ser utilizado com muita cautela para a estimativa de fluxos superficiais, conforme será discutido adiante.

6.1 Fundamentos do modelo integral

As equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia (equações 2.6–2.12), juntamente com a equação da energia cinética da turbulência (equação 2.14), são capazes de reproduzir os principais processos físicos na CLA. Entretanto, a solução completa do conjunto de equações diferenciais apresentado ainda é um desafio e geralmente as equações são resolvidas para condições específicas, que as tornam mais simples de resolver analítica ou numericamente (GARRATT, 1994).

Em situações convectivas, a CLA geralmente apresenta estruturas bem definidas, que levam ao esquema do modelo integral. As distribuições de temperatura, umidade e quantidade de movimento são consideradas independentes da altura em uma camada misturada, apresentando fortes gradientes das propriedades no seu topo (na camada de inversão). Por isso, em função do salto nas propriedades da camada de inversão, o modelo também é algumas vezes denominado *jump model*.

Ao supor que o nível de turbulência dentro da CLA é suficientemente intenso para manter verticalmente uniforme a distribuição de vento, temperatura, umidade e outros escalares, a consequência é a limitação do uso do modelo integral apenas para condições diurnas (TENNEKES; DRIEDONKS, 1981).

Confrontando as suposições do modelo integral com a estrutura da CLA apresentada no capítulo 2, observa-se que a camada de inversão no topo da CLC é a ZE. Geralmente os modelos integrais podem ser tratados de duas formas, com base nas considerações da espessura da ZE:

- modelo de ordem zero → considera que a ZE tem espessura infinitesimal;
- modelo de primeira ordem → considera que a ZE tem espessura finita.

O modelo mais utilizado é o de ordem zero e sua maior aplicação é o cálculo do crescimento da altura da base da inversão térmica h . Alguns autores estimam a taxa de crescimento de h inversamente proporcional ao salto de temperatura $\Delta\theta$, que é a diferença entre a temperatura da base e do topo da inversão térmica (LILLY, 1968). Outros consideram que a taxa de crescimento de h é inversamente proporcional ao gradiente de temperatura na atmosfera livre, γ (TENNEKES, 1973).

Betts (1974) observou que a ZE pode apresentar espessuras significativas, indicando a importância de se considerar uma espessura finita da camada de inversão, sugerindo um modelo de primeira ordem. Deardorff (1979) propôs melhorias no modelo e comparou os resultados com dados de laboratório. Embora o modelo seja mais realista por considerar espessura finita na inversão, o autor observou a necessidade de parametrizar melhor o fluxo de entranhamento no modelo.

Batchvarova e Gryning (1991) propuseram um modelo com base no esquema de ordem zero, com a inclusão de efeitos de turbulência de origem mecânica adicionada à de origem convectiva nos processos de entranhamento. Pino et al. (2006), com base em estudos de LES (*Large Eddy Simulation*), avaliaram ambos os esquemas de parametrização, de ordem zero e de primeira ordem, e concluíram que o modelo mais simples de ordem zero é capaz de gerar resultados similares ao modelo de primeira ordem na reprodução da evolução da CLA.

Destaca-se que no estudo de Batchvarova e Gryning (1991), o cálculo do crescimento da base da inversão é feito com base em um modelo de ordem zero, mas utiliza-se uma parame-

trização adicional de primeira ordem para encontrar a altura da CLA, que, segundo os autores, está aproximadamente na metade da ZE.

Ainda que haja esforços no desenvolvimento de modelos mais sofisticados (ZANTEN et al., 1999; NAGAR et al., 2001; PINO et al., 2006; KIM et al., 2006), por enquanto o modelo integral de ordem zero é o mais utilizado, em função da sua simplicidade e por apresentar resultados satisfatórios em aplicações para cálculo da altura da CLC (BATCHVAROVA; GRYNING, 1999; VILLANI et al., 2005). Este modelo será utilizado neste trabalho e suas equações são apresentadas a seguir.

6.2 Equações do modelo integral de crescimento da CLC

Os primeiros estudos de modelos integrais de ordem zero na CLA são atribuídos geralmente a Ball (1960) e Lilly (1968). Ball (1960) propôs pela primeira vez um modelo para a CLA que considera que as variáveis conservativas são plenamente misturadas, com um limite superior bem definido e marcado pela descontinuidade na taxa de variação dessas variáveis. Lilly (1968) apresenta uma solução para o modelo de ordem zero aplicado às camadas convectivas.

A equação da energia (equação 2.12), em regime não permanente, homogêneo na horizontal e sem considerar o efeito de advecção pode ser resumida a

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{d\overline{w'\theta'}}{dz}. \quad (6.1)$$

No modelo integral, θ é constante em z na camada misturada, o que implica em um fluxo de calor sensível variando linearmente (LILLY, 1968):

$$\overline{w'\theta'} = \left(1 - \frac{z}{h}\right)\overline{w'\theta'_s} - \frac{z}{h}\overline{w'\theta'_i}, \quad (6.2)$$

onde $\overline{w'\theta'_s}$ é o fluxo de calor sensível na superfície e $\overline{w'\theta'_i}$ é o fluxo de calor sensível de entransamento na inversão. Neste caso, a equação 6.1 pode ser escrita como

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\overline{w'\theta'_s} - \overline{w'\theta'_i}}{h}. \quad (6.3)$$

Com base na equação de conservação do calor aplicada na ZE e considerando espessura infinitesimal, Lilly (1968) encontrou que a taxa de entranhamento é inversamente proporcional à diferença de temperatura entre a camada misturada e a atmosfera livre:

$$\left(\frac{dh}{dt} - w_l \right) = \frac{F_r - \overline{w'\theta'_i}}{\theta_i - \theta}, \quad (6.4)$$

onde h é a altura da base da inversão, w_l representa movimento vertical de grande escala (geralmente subsidência) e F_r é o fluxo de calor radiativo, que tende a resfriar a camada de inversão térmica. A diferença $\theta_i - \theta$ é o salto de temperatura $\Delta\theta$ na inversão. Entretanto, Lilly (1968) não descreve a variação temporal de $\Delta\theta$.

Segundo Tennekes (1973), o fluxo radiativo F_r é desprezível quando o processo de convecção na zona de entranhamento é suficiente forte, ou seja, quando $\overline{w'\theta'_i}$ é dominante, o que ocorre a partir de poucas horas após o nascer do sol. Considerando condições predominantemente convectivas e ausência de movimentos verticais de grande escala, a equação 6.4 pode ser reescrita simplificadamente na forma

$$-\overline{w'\theta'_i} = \Delta\theta \frac{dh}{dt}. \quad (6.5)$$

Pode-se observar que se $\Delta\theta \rightarrow 0$, então $\overline{w'\theta'_i} \rightarrow 0$, a menos que $dh/dt \rightarrow \infty$, o que mostra a importância de $\Delta\theta$ na formulação do modelo. Um dos problemas do modelo proposto por Lilly (1968) é ele não representar a variação temporal de $\Delta\theta$ (TENNEKES, 1973). Idealmente, a representação matemática da dinâmica da CLC, mesmo em um modelo simplificado, como é o caso do modelo integral, deve considerar tanto dh/dt quanto $d\Delta\theta/dt$.

Tennekes (1973) avalia o comportamento cinemático de $\Delta\theta$: por um lado, $\Delta\theta$ tende a decrescer conforme a temperatura média da CLC $\bar{\theta}$ aumenta; por outro lado, $\Delta\theta$ diminui à

medida que a base de inversão cresce, em função da variação do gradiente de temperatura na atmosfera livre γ . Por unidade de tempo, a equação para a variação líquida de $\Delta\theta$ pode ser escrita como

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = \gamma \frac{dh}{dt} - \frac{d\bar{\theta}}{dt}. \quad (6.6)$$

Conforme observa Tennekes (1973), esta equação remove o problema citado acima: quando $\Delta\theta$ tende a se reduzir, h tende a aumentar (e dh/dt é positivo), o que faz $\Delta\theta$ tender a aumentar novamente.

Substituindo a equação 6.3 na 6.6, tem-se

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = \gamma \frac{dh}{dt} - \frac{\overline{w'\theta'_s}}{h} + \frac{\overline{w'\theta'_i}}{h}. \quad (6.7)$$

Observa-se que o modelo deve ser utilizado para resolver as seguintes incógnitas: $\overline{w'\theta'_s}$, $\overline{w'\theta'_i}$, h , dh/dt , $\bar{\theta}$, $\Delta\theta$, e γ . Geralmente $\overline{w'\theta'_s}$ e γ são condições de contorno, a primeira obtida a partir de medições superficiais e a segunda obtida normalmente da primeira radiossondagem do dia. Nestes casos, o modelo é utilizado para resolver dh/dt e h .

Os dados do perfil atmosférico obtidos por VANTs ou por radiossondagens permitem extrair diretamente diversas informações: h , $\bar{\theta}$, $\Delta\theta$ e γ . A inversão do modelo e o uso dessas condições permitem, portanto, calcular $\overline{w'\theta'_s}$.

6.2.1 A solução de quadratura

Como as equações 6.5 e 6.6 permitem simples integração, pode-se eliminar o fluxo de entranhamento substituindo a equação 6.5 em 6.6, resultando em

$$\frac{d\Delta\theta}{dt} = \gamma \frac{dh}{dt} - \frac{\overline{w'\theta'_s}}{h} - \frac{\Delta\theta}{h} \frac{dh}{dt}. \quad (6.8)$$

A equação acima pode ser escrita na forma

$$h \frac{d\Delta\theta}{dt} + \Delta\theta \frac{dh}{dt} = \gamma h \frac{dh}{dt} - \overline{w'\theta'_s}, \quad (6.9)$$

ou ainda

$$\frac{d(h\Delta\theta)}{dt} = \gamma h \frac{dh}{dt} - \overline{w'\theta'_s}. \quad (6.10)$$

Integrando esta equação no tempo (de 0 a t) obtém-se

$$h\Delta\theta - h_0\Delta\theta_0 = \frac{1}{2}\gamma(h^2 - h_0^2) - \int_0^t \overline{w'\theta'_s} dt. \quad (6.11)$$

Se a integral no último termo for aproximada à média temporal $\overline{w'\theta'_s}t$, a equação 6.11 permite uma solução direta para o fluxo de calor sensível superficial, com base apenas em dados discretos de h e $\Delta\theta$, que podem ser obtidos a partir de dois perfis consecutivos de temperatura na CLA. Esta equação é aplicada neste trabalho, conforme será visto adiante (capítulo 7). Pode-se observar que a equação é independente de $\overline{w'\theta'_i}$ devido ao uso da equação 6.5.

Conforme ressaltado por Tennekes (1973), essa equação é válida apenas algumas horas após o nascer do sol, quando não há muita variação temporal do fluxo superficial de calor sensível.

6.2.2 Parametrização da equação de ECT: fechamento do sistema de equações do modelo integral

Os modelos de ordem zero, conforme visto, podem ser reduzidos às equações 6.1 e 6.7, que apresentam um problema de fechamento (TENNEKES; DRIEDONKS, 1981). Considerando que geralmente $\overline{w'\theta'_s}$ e γ são medidos, a evolução no tempo de h e $\Delta\theta$ depende da determinação de $\overline{w'\theta'_i}$.

Conforme exposto, deve haver movimento do ar quente, que está acima da inversão, para dentro da camada-limite convectiva. Em função da energia necessária para fazer uma

hipotética parcela de ar ir para uma região mais fria (abaixo da inversão) é sugestivo aplicar a equação do balanço de energia cinética da turbulência nessa região de interesse. Esta forma de fechamento dos sistema de equações para solução do modelo integral é a mais utilizada (LILLY, 1968; TENNEKES, 1973; TENNEKES; DRIEDONKS, 1981; BATCHVAROVA; GRYNING, 1994; VILLANI et al., 2005).

Os trabalhos de Driedonks (1982) e Villani et al. (2005) mostram as principais parametrizações para a energia cinética da turbulência (ECT), a fim de completar o conjunto de equações do modelo integral para a evolução da CLC.

Na seção 2.3.2 deste trabalho foram apresentados os fundamentos da ECT e a respectiva equação está repetida abaixo, por conveniência:

$$\frac{d\bar{e}}{dt} = \frac{g}{\theta} (\overline{w'\theta'}) - \overline{w'u'} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{w'e'} + \frac{\overline{w'p'}}{\rho} \right) - \varepsilon, \quad (6.12)$$

Os termos representam, respectivamente, a variação local da ECT, produção de turbulência térmica, produção de energia mecânica, transporte e redistribuição de turbulência (convergência de fluxo) e a dissipação da energia.

A parametrização inicialmente proposta e ainda a mais utilizada para o fluxo de entranhamento é obtida com o balanço apenas dos termos de produção térmica e transporte e redistribuição. O termo de redistribuição é proporcional a σ_w^3/h , onde σ_w é o desvio padrão da velocidade vertical do vento, que geralmente é utilizada a partir da equação de interpolação

$$\sigma_w^3 = w_*^3 + \eta u_*^3, \quad (6.13)$$

onde η é uma constante empírica. Conforme Tennekes (1973)

$$-\overline{w'\theta'}_i = \frac{T_s}{g} \frac{\sigma_w^3}{h} \quad (6.14)$$

$$\sigma_w^3 = 0,2 \overline{w' \theta'_s} \frac{gh}{T_s}. \quad (6.15)$$

Substituindo 6.15 em 6.14, obtém-se:

$$-\overline{w' \theta'_i} = 0,2 \overline{w' \theta'_s}, \quad (6.16)$$

relacionando linearmente o fluxo de calor no topo da CLC com o fluxo de calor superficial, com constante de proporcionalidade, que neste caso resultou em $A = 0,2$.

Outras parametrizações permitem a aplicação da ECT em condições em que os demais termos podem ter importância e não devem ser desprezados. Villani et al. (2005) faz uma revisão das principais parametrizações, que serão discutidas abaixo, com base na equação 6.12.

Produção de ECT por convecção térmica

Os modelos integrais são aplicados para a evolução da CLC. Portanto, o termo mais importante da equação da ECT é o de produção térmica. A temperatura superficial θ_s pode ser utilizada e o fluxo de calor sensível na inversão pode ser expresso como $\overline{w' \theta'_i} = \Delta \theta dh/dt$ (LILLY, 1968; TENNEKES, 1973; TENNEKES; DRIEDONKS, 1981), caso seja interesse parametrizar a evolução de dh/dt .

Transporte e redistribuição de ECT

A partir do balanço entre a convergência do fluxo de energia cinética e o fluxo de calor na inversão, em uma condição idealizada de regime permanente, Tennekes (1973) apresenta uma parametrização para o termo de transporte e distribuição de \bar{e} , proporcional a σ_w^3/h . Geralmente σ_w^3 é calculado pela interpolação pela equação 6.13: $\sigma_w^3 = w_*^3 + \eta^3 u_*^3$, onde η é uma constante empírica igual a 2 (VILLANI et al., 2005). O termo é aproximado por:

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{w' e'} + \frac{\overline{w' p'}}{\rho} \right) = \frac{c_F}{h} \sigma_w^3. \quad (6.17)$$

Dissipação de ECT

Localmente, na aplicação da equação de ECT na inversão, a dissipação da energia ocorre contra a camada estável estratificada acima da CLC e pode ser parametrizada proporcionalmente a $\sigma_w^2 N$, onde $N = (g\gamma/\theta)^{1/2}$ é a frequência de Brunt-Väisälä (ZEMAN; TENNEKES, 1977). Neste caso, utiliza-se interpolação $\sigma_w^2 = w_*^2 + \eta^2 u_*^2$. O termo é aproximado por:

$$\varepsilon = c_D \sigma_w^2 N. \quad (6.18)$$

Termo de armazenamento de ECT

Segundo Zilitinkevich (1975), nem sempre o termo de armazenamento de ECT $d\bar{\varepsilon}/dt$ pode ser ignorado. O autor sugere o uso de $(\sigma_w^3/h)(dh/dt)$. Este termo tem maior importância quando o ar acima da inversão tem fraca estratificação (ZEMAN; TENNEKES, 1977). O termo é aproximado por:

$$\frac{d\bar{\varepsilon}}{dt} = c_T \frac{\sigma_w^2}{h} \frac{dh}{dt}. \quad (6.19)$$

Produção de ECT pelo cisalhamento

Tennekes e Driedonks (1981), Driedonks (1982) sugerem aproximar o gradiente da velocidade do vento como: $\partial u/\partial z \sim \Delta u/h$ e expressar o fluxo turbulento como: $\overline{w'u'} = \Delta u(dh/dt)$. Portanto,

$$-\overline{w'u'} \frac{\partial u}{\partial z} = c_M \frac{|\Delta u|^2}{h} \frac{dh}{dt}, \quad (6.20)$$

sendo Δu a diferença de velocidade do vento na camada-limite convectiva e na atmosfera livre.

A equação da ECT parametrizada

Com base no exposto acima, equação da ECT pode ser escrita em função das parametrizações sugeridas pelos diferentes autores, considerando que c_T , c_M , c_F e c_D são coeficientes ajustados para as diferentes parametrizações (DRIEDONKS, 1982; VILLANI et al., 2005):

$$c_T \frac{\sigma_w^2}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{g}{\theta_s} \overline{w'\theta'_i} + c_M \frac{|\Delta u|^2}{h} \frac{dh}{dt} + \frac{c_F}{h} \sigma_w^3 - c_D \sigma_w^2 N \quad (6.21)$$

A tabela 6.1 mostra os valores mais comuns para as constantes empíricas utilizadas na parametrização da equação da energia cinética da turbulência, referenciando os principais trabalhos que propuseram a parametrização.

Tabela 6.1: Valores das constantes empíricas c_T , c_M , c_F e c_D utilizadas na parametrização da equação da energia cinética da turbulência (Adaptado de Villani et al. (2005)).

Modelo – Autor	c_T	c_M	c_F	c_D
TE73 – Tennekes (1973)	–	–	0,2	–
ZI75 – Zilitinkevich (1975)	1,5	–	0,2	–
ZT77 – Zeman e Tennekes (1977)	4,3	–	0,6	0,03
TD81 – Tennekes e Driedonks (1981)	4,3	0,7	0,6	0,03

Villani et al. (2005) testaram o modelo integral com as parametrizações resumidas na tabela 6.1 para a estimativa da altura da CLC. Os autores concluíram que o pior modelo foi o ZI75, não tendo bons resultados quando se considera o termo de variação local da ECT com o valor de c_T proposto por Zilitinkevich (1975). A parametrização mais simples TE73, que só leva em conta o termo de distribuição de ECT deu resultados satisfatórios, da mesma forma que o modelo ZT77, ainda que com constantes empíricas diferentes para os termos de transporte e distribuição. Os autores recomendam ainda que se deve evitar o uso da parametrização proposta em TD81, de Tennekes e Driedonks (1981), a menos que ela seja melhorada para melhor representar o termo de produção de ECT por cisalhamento.

Freire e Dias (2013) aplicaram as mesmas parametrizações para cálculo da altura da CLC com dados do FIFE, incluindo uma metodologia para cálculo da evolução da CLC em situações em que os perfis apresentavam camada residual. Neste caso, os autores encontraram erros nas mesmas ordens de grandeza entre as diferentes parametrizações, para as condições em que não havia influência da camada residual.

Da mesma forma que os autores acima, as diferentes parametrizações serão testadas neste trabalho, mas neste caso com modelo integral invertido para estimativa do fluxo de calor sensível da superfície $\overline{w'\theta'_s}$ (capítulo 7).

7 Avaliação do Modelo Integral para Estimativa do Fluxo Superficial de Calor Sensível com Dados do FIFE

Neste capítulo são apresentadas as atividades desenvolvidas para as estimativas de fluxo de calor sensível virtual na superfície com os dados do experimento FIFE: obtenção e tratamento dos dados, formulação do modelo integral, parametrizações da energia cinética da turbulência para cálculo de fluxo de calor sensível superficial e os seus respectivos resultados e discussões.

Embora o capítulo 6 contenha uma abordagem sobre esses modelos e parametrizações, na sequência algumas equações são reapresentadas ao longo da exposição, a fim de evidenciar as equações que foram utilizadas neste trabalho.

Os fluxos de calor sensível foram calculados para cinco diferentes parametrizações que serão detalhadas adiante. Três delas contam com a forma tradicional do uso dos modelos integrais, mas com parametrizações diferentes para a equação da ECT. Outra parametrização foi a solução simples de quadratura aplicada para as estimativas dos fluxos. A quinta tentativa contou com simplificações no modelo integral, a fim de reduzir a quantidade de parametrizações do modelo integral e o seu número de variáveis.

Antes da apresentação dos resultados e discussões, serão descritos os dados utilizados do experimento FIFE, sua seleção e pré-processamento para uso nos modelos.

7.1 Dados utilizados do experimento FIFE

FIFE é a denominação do *First International Satellite Land Surface Climatology Project Field Experiment*. Trata-se de um grande projeto que contou com monitoramentos contínuos por meio de satélites, radares e estações de superfície. Diversas equipes de pesquisadores foram responsáveis pela realização de campanhas de campo intensivas, durante os anos de 1987 e 1989, na Pradaria Konza, uma Reserva Ecológica perto de Manhattan, no estado do Kansas, região central dos Estados Unidos da América. A área do experimento tem dimensões de 15 x 15 km². Trata-se de uma região com predominância de pradaria, caracterizada por vegetação de pequeno porte (gramíneas), com pouca presença de arbustos, e topografia pouco acidentada. As coordenadas geográficas do local são 39°06'55" N; 096°33'48" S, com altitude média de 342 m (BETTS, 1992).

O grande objetivo do FIFE foi o de auxiliar na compreensão dos processos de interação da biosfera com a atmosfera e balanços de fluxos de radiação, energia, umidade e CO₂. Havia também o interesse em testes e desenvolvimento de metodologias de sensoriamento remoto.

Os experimentos combinados duraram 57 dias em 1987 e 20 dias em 1989 (tabela 7.1) e envolveram consideráveis recursos financeiros e intelectuais, com mais de 100 pesquisadores de diferentes grupos trabalhando simultaneamente.

Dentre os dados disponíveis do experimento FIFE, este trabalho utiliza informações de radiossondagens e de cinco estações superficiais micrometeorológicas de monitoramento de fluxos de covariâncias. Os dados foram coletados do banco de dados do experimento disponibilizado pelo *Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center* no endereço: <ftp://www.daac.ornl.gov/data/fife/data/>.

7.1.1 Dados de radiossondagens

Os dados de radiossondagens utilizados neste estudo contêm medições de temperatura, umidade e velocidade do vento em toda extensão da camada-limite atmosférica. Os dados foram

obtidos com o objetivo de estudar os fluxos superficiais com base na teoria de similaridade de Monin-Obukhov (BRUTSAERT, 1994).

As medições da CLA foram feitas normalmente entre 9h00 e 18h00 (em horário local de verão) na primavera e verão de 1987 e final do verão de 1989. Foram obtidas 445 sondagens, no total.

Os lançamentos foram feitos no período diurno, mas houve situações em que as condições da atmosfera eram estáveis, no início do dia ou final da tarde. A tabela 7.1 traz um resumo dos 4 períodos de experimentos do FIFE que contaram com essas radiossondagens (onde IFC é a sigla utilizada para *intensive field campaigns*).

Tabela 7.1: Período de dados de radiossondagens disponíveis do experimento FIFE.

IFC#	Datas	
IFC-1	26/05/1987	06/06/1987
IFC-2	25/06/1987	11/07/1987
IFC-3	06/08/1987	21/08/1987
IFC-4	05/10/1987	16/10/1987
IFC-5	24/07/1989	12/08/1989

7.1.2 Dados das estações de fluxos de covariâncias

As estações de medições superficiais de fluxos de covariâncias eram equipadas com sensores e sistemas de coleta e armazenamento de dados de alta frequência, para cálculo dos fluxos pelo método das covariâncias turbulentas. Foram utilizados anemômetros de copo e sônicos, termômetros e termopares, sensores de umidade, CO₂ e outros.

Os dados médios foram disponibilizados a cada 30 minutos. Destaca-se que as diferentes estações foram operadas por equipes distintas, que não necessariamente utilizavam os mesmos tipos de sensores ou mediam os mesmos parâmetros. Entretanto, todos os dados do experimento FIFE foram muito bem tratados, corrigidos e validados antes da sua publicação.

A tabela 7.2 mostra as cinco estações cujos dados foram utilizados neste estudo.

Tabela 7.2: Estações de fluxos de covariâncias do experimento FIFE utilizadas neste trabalho.

Estação	Código	Coordenadas geográficas
04	2731-ECA	39°05'01" N; 096°33'94" O
26	8739-ECB	38°58'31" N; 096°32'35" O
16	4439-ECV	39°03'07" N; 096°32'28" O
28	6943-ECW	39°00'22" N; 096°32'04" O
22	4609-ECW	39°03'02" N; 096°36'41" O

7.1.3 Pré-processamento dos dados

Obtenção das variáveis da CLC

Das 445 sondagens disponíveis do experimento FIFE, foram selecionados inicialmente 41 dias que tivessem pelo menos três radiossondagens e durante os quais houvesse dados simultâneos em qualquer uma das cinco estações de fluxo cujos dados foram utilizados.

Para esses 41 dias havia um total de 237 sondagens. Entretanto, durante a análise dos dados, algumas sondagens apresentaram condições estáveis (avaliados pelo perfil de θ ou pelo fluxo de calor sensível na superfície medido pelas estações) ou foram feitas em horários em que houve falha nas medições de fluxo.

Restaram então 37 dias com um total de 193 radiossondagens úteis para a aplicação deste trabalho, que utiliza pares de radiossondagens sucessivas de um mesmo dia para a estimativa de fluxos superficiais.

As radiossondagens efetivamente utilizadas estão listadas na tabela 7.3, organizadas aos pares, da forma como foram aplicadas para cálculo do fluxo de calor sensível superficial.

Utilizaram-se dados de altitude, pressão atmosférica, temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, razão de mistura, temperatura potencial e umidade relativa. As informações foram processadas a fim de eliminar eventuais erros e falhas nos dados. Calculou-se também a temperatura potencial virtual θ_v , com base nos dados do perfil de temperatura e umidade das radiossondagens.

As variáveis obtidas do perfil medido pelas radiossondagens foram: h , $\overline{\theta_v}$, $\Delta\theta_v$ e γ . A análise de perfis consecutivos também permitiu a obtenção de $d\Delta\theta_v/dt$ e dh/dt .

Tabela 7.3: Pares de radiossondagens do experimento FIFE utilizadas neste trabalho.

Data e intervalo das radiossondagens: Horário Inicial–Horário Final (Horário Local).		
1987		
1987-05-29 10:40–13:26	1987-07-02 12:09–13:38	1987-08-18 12:04–13:33
1987-05-30 09:06–10:54	1987-07-03 10:30–12:02	1987-08-20 09:08–10:21
1987-05-30 10:54–11:52	1987-07-03 12:02–13:24	1987-08-20 10:21–12:01
1987-05-30 11:52–13:32	1987-07-03 16:31–17:48	1987-08-20 12:01–13:33
1987-05-30 13:32–15:04	1987-07-05 14:12–15:36	1987-08-21 10:46–12:46
1987-05-31 09:11–10:48	1987-07-06 08:59–10:20	1987-08-21 12:46–14:07
1987-05-31 10:48–12:07	1987-07-06 10:20–11:57	1987-08-21 14:07–15:22
1987-05-31 12:07–13:41	1987-07-06 11:57–13:34	1987-10-05 10:44–13:32
1987-05-31 13:41–14:57	1987-07-06 13:34–14:56	1987-10-05 13:32–14:47
1987-06-01 10:29–12:17	1987-07-06 14:56–16:36	1987-10-05 14:47–16:00
1987-06-01 13:26–14:53	1987-07-07 13:54–15:44	1987-10-05 16:00–17:24
1987-06-03 10:35–12:05	1987-07-08 10:37–12:04	1987-10-06 09:49–11:38
1987-06-03 12:05–13:35	1987-07-08 12:04–13:34	1987-10-06 11:38–13:04
1987-06-03 13:35–15:01	1987-07-08 15:02–16:30	1987-10-06 13:04–14:30
1987-06-03 15:01–16:43	1987-07-08 16:30–17:57	1987-10-06 14:30–16:06
1987-06-04 10:34–11:58	1987-07-09 09:17–10:35	1987-10-07 10:05–11:13
1987-06-04 11:58–13:33	1987-07-09 10:35–12:17	1987-10-07 12:48–14:27
1987-06-04 13:33–15:06	1987-07-09 12:17–13:41	1987-10-07 16:08–17:10
1987-06-05 10:40–11:57	1987-07-10 09:24–10:42	1987-10-08 09:57–11:19
1987-06-05 11:57–13:29	1987-07-10 10:42–12:16	1987-10-08 11:19–13:26
1987-06-05 13:29–16:33	1987-08-09 10:32–12:08	1987-10-08 13:26–14:40
1987-06-06 09:55–13:11	1987-08-09 12:08–13:35	1987-10-08 14:40–16:03
1987-06-06 13:11–16:00	1987-08-09 13:35–14:57	1987-10-08 16:03–17:08
1987-06-26 09:01–10:39	1987-08-10 10:42–11:55	1987-10-12 10:02–11:02
1987-06-26 10:39–12:07	1987-08-10 11:55–13:31	1987-10-12 11:02–12:02
1987-06-26 12:07–13:38	1987-08-10 13:31–15:01	1987-10-12 12:02–13:33
1987-06-27 09:17–10:35	1987-08-10 15:01–16:36	1987-10-12 13:33–14:32
1987-06-27 10:35–13:32	1987-08-15 10:27–12:06	1987-10-12 15:32–16:36
1987-06-27 13:32–14:56	1987-08-15 13:34–15:05	1987-10-13 09:38–10:36
1987-07-01 09:11–10:30	1987-08-15 15:05–16:30	1987-10-13 10:36–11:31
1987-07-01 10:30–12:35	1987-08-16 09:02–10:41	1987-10-13 11:31–12:27
1987-07-01 12:35–13:39	1987-08-16 10:41–11:57	1987-10-13 12:27–14:23
1987-07-01 15:02–16:41	1987-08-16 13:31–15:03	1987-10-13 14:23–15:38
1987-07-02 10:40–12:09	1987-08-16 15:03–16:34	
1989		
1989-08-01 09:31–10:55	1989-08-06 12:26–14:24	1989-08-10 12:26–14:27
1989-08-01 12:28–14:28	1989-08-07 12:25–14:27	1989-08-11 09:26–11:01
1989-08-01 14:28–16:28	1989-08-07 14:27–16:26	1989-08-11 11:01–12:36
1989-08-06 09:29–10:57	1989-08-10 09:31–10:59	1989-08-11 12:36–14:27
1989-08-06 10:57–12:26	1989-08-10 10:59–12:26	1989-08-11 14:27–16:25

Os parâmetros foram determinados da seguinte maneira: para cada perfil identificaram-se, visualmente, com o apoio do *software* g3data (www.frantz.fi/software/g3data.php), 4 pontos notáveis: a base da inversão, o topo da inversão e 2 pontos na atmosfera livre, representativos para o gradiente de θ_v . A partir desses pontos, a altura h foi determinada como a base da inversão, a temperatura $\overline{\theta}_v$ foi calculada como média aritmética de todas as medições do nível do solo até h , γ foi simplesmente a razão entre a diferença de temperatura e diferença de altura dos 2 pontos notáveis na AL e $\Delta\theta_v$ foi obtida como a diferença de temperatura entre o final e início da inversão.

No capítulo 3, mostrou-se que a determinação de h depende da definição utilizada. O modelo integral, aplicado neste trabalho, tem como hipótese o crescimento da base da inversão térmica. Entretanto, o modelo também considera que a espessura da zona de entranhamento é zero.

Este estudo avaliou duas alternativas para a definição da altura da CLC: a primeira da forma mencionada acima, com a base da inversão; e a outra considerando um balanço de energia na ZE, para equilibrar o *deficit* de entalpia. No segundo caso, a metodologia proposta por Driedonks (1982) consiste em calcular a equação integral que representa a mesma área do perfil idealizado:

$$\int_0^{h_2} [(\theta(0) + \gamma(z)) - \theta_v] dz = h\Delta\theta_v - \frac{1}{2}\gamma h^2 \quad (7.1)$$

onde h_2 é a altura no topo da ZE, $\theta(0)$ é a projeção da linha do gradiente de temperatura na AL projetada até a superfície e $\theta_v(z)$ é a temperatura observada da radiossondagem em cada nível.

Cálculo das medianas das variáveis superficiais

Foram selecionados dados para os intervalos das radiossondagens utilizadas (tabela 7.3). Quando não havia dados superficiais válidos em nenhuma estação para determinada meia hora, os cálculos não eram realizados.

Observou-se que, embora os dados do FIFE sejam muito bem organizados, havia alguns problemas em unidades e códigos de erro, que foram devidamente corrigidos.

Análises iniciais mostraram que as médias aritméticas dos fluxos superficiais medidos nas diferentes estações resultaram valores ruins, muitas vezes incompatíveis com a provável condição predominante de estabilidade. O parâmetro crítico era o comprimento de estabilidade de Obukhov L , que em algumas situações foi calculado com valores positivos em condições em que L deveria ser negativo (condição instável, definida pelo sentido do fluxo de calor sensível médio).

A distância entre as estações das extremidades da área monitorada foi da ordem de 12 km, o que explica parcialmente a variabilidade dos dados entre as estações. A solução para obtenção de um valor representativo das medições espacializadas das cinco estações, foi calcular as medianas ao invés das médias aritméticas. Os valores deixaram de apresentar variações bruscas e inconsistentes na análise temporal de L e $\overline{w'\theta'_v}$.

7.2 Cálculo do fluxo de calor sensível virtual com base no modelo integral

A seguir, são apresentadas as duas formas utilizadas do modelo integral de ordem zero. A primeira abordagem é mais completa e a mais utilizada desde que foi proposta por Tennekes (1973), e será tratada adiante neste capítulo como “modelo com dinâmica de $\Delta\theta_v$ ”.

Essa formulação envolve a equação fundamental de conservação de energia, integrada para um perfil linear do fluxo de calor sensível, e uma equação adicional para a dinâmica de $\Delta\theta_v$, com base nas condições da atmosfera livre, na taxa de crescimento de h e da variação de $\overline{\theta}_v$ na CLC.

A segunda abordagem utiliza a formulação “sem dinâmica de $\Delta\theta_v$ ”, e sem a parametrização $\overline{w'\theta'_v}_i = -\Delta\theta(dh/dt)$ proposta por Lilly (1968). Desta forma, o modelo fica independente do salto de temperatura na inversão. Destaca-se que o trabalho foi desenvolvido em termos da temperatura potencial virtual e do fluxo de calor sensível virtual (fluxo de fluatibilidade), o que

justifica o uso do índice “ v ” nas equações.

Mesmo verificando que os perfis sucessivos de temperatura, obtidos pelas radiossondagens, mostram grandes variações na CLC e na atmosfera livre, os cálculos realizados neste trabalho não consideram os efeitos de advecção e de movimentos verticais de grande escala, como a subsidência.

Alguns autores estimam de maneira simples o efeito de subsidência, como por exemplo em Batchvarova e Gryning (1994). Driedonks (1982) avalia que na maioria das condições da atmosfera a sua contribuição pode ser pequena e, para evitar erros na sua estimativa, é melhor não considerar esta variável nos cálculos.

7.2.1 Modelo integral com dinâmica de $\Delta\theta_v$

A equação tipicamente utilizada para a evolução da altura da CLC é (TENNEKES; DRIEDONKS, 1981; DRIEDONKS, 1982).

$$\frac{d\Delta\theta_v}{dt} = \gamma \frac{dh}{dt} - \frac{\overline{w'\theta'_{vs}}}{h} - \frac{\Delta\theta_v}{h} \frac{dh}{dt}. \quad (7.2)$$

Esta equação considera a evolução temporal de $\Delta\theta_v$ proposta por Tennekes (1973), a fim de melhorar algumas limitações do modelo integral proposto por Ball (1960) e Lilly (1968). A partir de Tennekes (1973), a equação acima tornou-se a mais utilizada (MCNAUGHTON; SPRIGGS, 1986; CULF, 1992; VILLANI et al., 2005).

A solução da equação 7.2 para a evolução h geralmente é feita com base em medições de $\overline{w'\theta'_{vs}}$ e a taxa de crescimento dh/dt é obtida a partir da equação da ECT. Dessa forma, o sistema pode ser resolvido numericamente, com pouca sensibilidade às condições iniciais (VILLANI et al., 2005; FREIRE; DIAS, 2013).

Para a inversão do modelo com o objetivo de calcular o fluxo de calor sensível na superfície, é conveniente expressar $d\Delta\theta_v/dt$ sem a aproximação $\overline{w'\theta'_{vi}} = -\Delta\theta_v(dh/dt)$. A equação do modelo fica

$$\frac{d\Delta\theta_v}{dt} = \gamma \frac{dh}{dt} - \frac{\overline{w'\theta'_{v,s}}}{h} + \frac{\overline{w'\theta'_{v,i}}}{h}. \quad (7.3)$$

Nesse caso, a solução da equação da ECT da turbulência é expressa em função de $\overline{w'\theta'_{v,i}}$. As demais variáveis são condições de contorno que podem ser obtidas a partir da análise de dois perfis sucessivos de temperatura, que fornecem informações de h e dh/dt . O sistema de equações pode ser expresso com a equação do modelo de ordem zero,

$$\overline{w'\theta'_{v,s}} = \gamma h \frac{dh}{dt} - h \frac{d\Delta\theta_v}{dt} + \overline{w'\theta'_{v,i}}, \quad (7.4)$$

e com a equação da ECT, parametrizada conforme mostrado na seção 6.2.2, para $\overline{w'\theta'_{v,i}}$

$$\overline{w'\theta'_{v,i}} = c_T \frac{\sigma_w^2}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\overline{\theta_v}}{g} - c_M \frac{|\Delta u|^2}{h} \frac{dh}{dt} \frac{\overline{\theta_v}}{g} - c_F \sigma_w^3 \frac{\overline{\theta_v}}{gh} + c_D \sigma_w^2 N \frac{\overline{\theta_v}}{g}. \quad (7.5)$$

Nessa equação $\overline{\theta_v}$ é a temperatura referencial média na CLC.

O modelo foi aplicado a partir de todas as parametrizações constantes na tabela 6.1, com exceção do modelo denominado TD81 – Tennekes e Driedonks (1981), em função da dificuldade de obtenção de bons resultados de Δu , que é a diferença entre a velocidade na base e no topo da inversão. Villani et al. (2005) testou esta e outras parametrizações e concluiu que esta parametrização não gera bons resultados.

Resultados das parametrizações TE73, ZI75 e ZT77

Considerando a dinâmica de $\Delta\theta_v$ no modelo integral e as parametrizações TE73, ZI75 e ZT77, foram calculados os fluxos superficiais de calor sensível para cada par de radiossondagens consecutivas, conforme lista apresentada na tabela 7.3.

Os resultados são comparados com as medianas obtidas com as medições das 5 estações de fluxos de covariâncias.

A figura 7.1 mostra os resultados obtidos com a parametrização TE73, que leva em

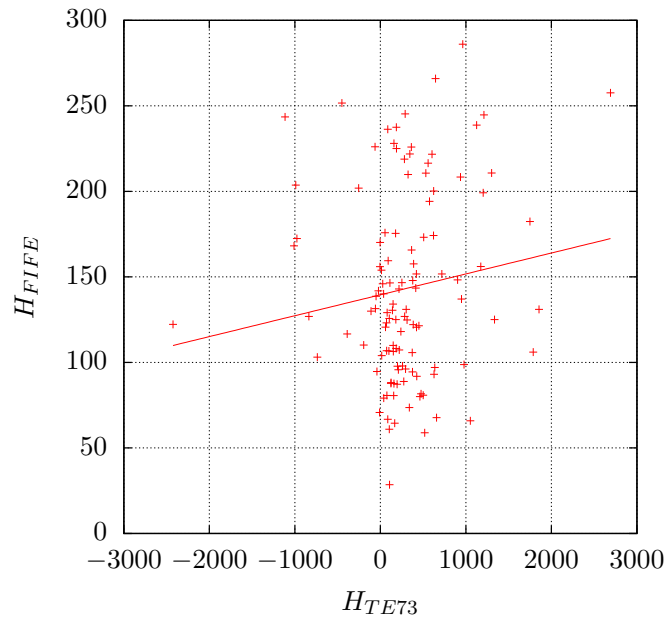


Figura 7.1: Comparação dos valores estimados de H com a parametrização TE73 (H_{TE73}) e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em W m^{-2} .

conta apenas os termos de produção térmica e de redistribuição de energia cinética da turbulência. Nesse modelo, o coeficiente utilizado é $c_F = 0,2$. Pode-se observar que os resultados estão muito dispersos e com valores excessivamente altos.

Os dados das estações mostram que os valores de H variam mais ou menos de 30 a 300 W m^{-2} , enquanto os resultados estimados com a parametrização TE73 variam de -2000 a $+2000 \text{ W m}^{-2}$. Os resultados, portanto, estão uma ordem de grandeza acima dos valores esperados. Os fluxos negativos estão incompatíveis com a teoria do modelo, que considera um perfil de temperatura plenamente desenvolvido na CLC.

Os resultados para as parametrizações ZI75 e ZT77 (figuras 7.2 e 7.3, respectivamente) mostram fluxos calculados irrealis, da mesma forma que os resultados da parametrização TE73 (figura 7.1).

Conforme mencionado no capítulo 6, diversos estudos mostram tentativas de ajustar os parâmetros do modelo integral acoplado com a equação da ECT. Vários trabalhos relatam bons resultados com os parâmetros acima, contudo, a maior parte das aplicações são para cálculo da altura da CLC e não de fluxos.

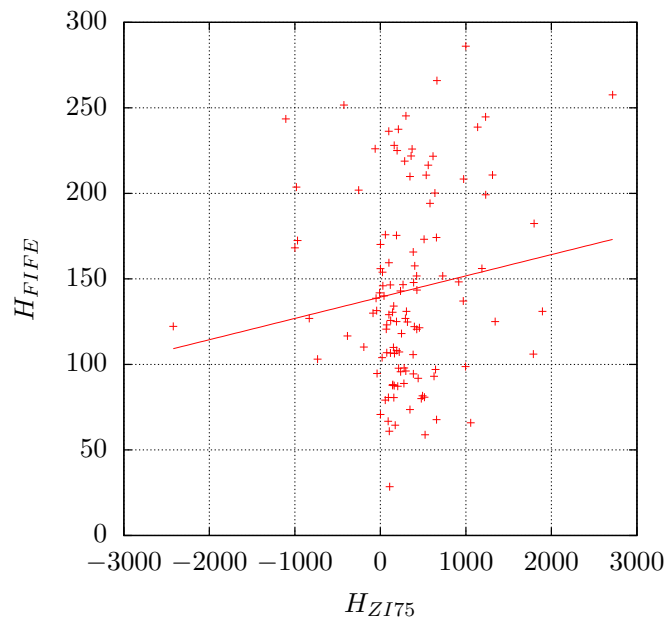


Figura 7.2: Comparação dos valores estimados de H com a parametrização ZI75 (H_{ZI75}) e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em W m^{-2} .

A comparação dos resultados deste trabalho mostra que os erros são similares para as diferentes parametrizações. Os erros devem-se às simplificações do modelo integral e problemas nos dados de entrada.

No modelo integral invertido para cálculo do fluxo, são necessários mais dados do perfil atmosférico e da estrutura da CLC do que quando se utiliza o modelo para a evolução da altura da CLC. Conforme será visto adiante, este trabalho identificou várias fontes de erros na definição dos dados de entrada obtidos através dos perfis.

As figuras 7.1–7.3 apresentam resultados incompatíveis com a física de crescimento da CLA. A quantidade de resultados negativos evidencia que o modelo falha e qualquer tentativa de ajuste de parametrização da equação da ECT não vai resolver esse problema.

Solução de quadratura

Conforme mostrado na seção 6.2, as equações do modelo integral podem ser manipuladas algebricamente e resultar na equação integral

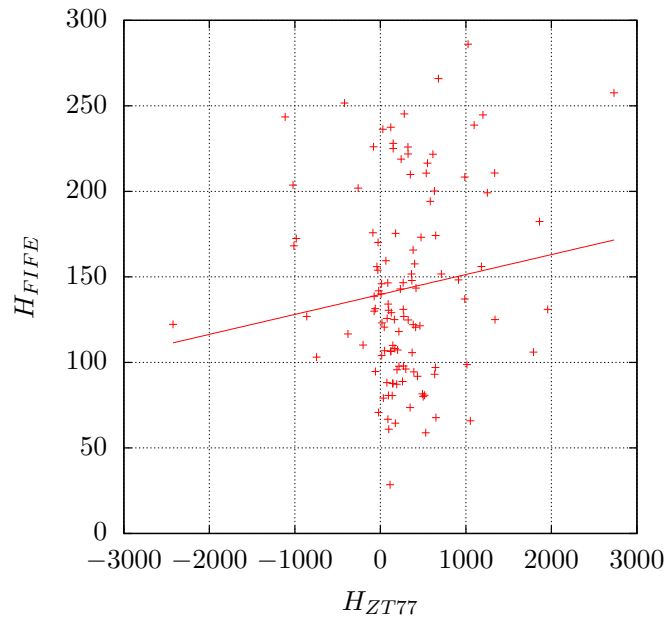


Figura 7.3: Comparação dos valores estimados de H com a parametrização ZT77 (H_{ZT77}) e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em W m^{-2} .

$$h\Delta\theta_v - h_0\Delta\theta_{v0} = \frac{1}{2}\gamma(h^2 - h_0^2) - \int_0^t \overline{w'\theta'_v} dt. \quad (7.6)$$

Essa equação não depende do uso da equação da ECT, apenas dos dados de h , γ e $\Delta\theta$, obtidos diretamente de duas radiossondagens consecutivas. Entretanto, a figura 7.4 mostra que os resultados também não são bons para a solução simplificada de quadratura.

7.2.2 Modelo integral sem dinâmica de $\Delta\theta_v$

Em função dos maus resultados obtidos com a aplicação das equações do modelo integral, com as parametrizações da equação da ECT e na solução de quadratura, houve a tentativa de utilizar conceitos mínimos do modelo integral, reduzindo o número de parametrizações.

Conforme proposto por Lilly (1968), a equação do balanço de energia aplicada na CLC no modelo integral se reduz a

$$\frac{d\theta_v}{dt} = -\frac{\overline{dw'\theta'_v}}{dz}, \quad (7.7)$$

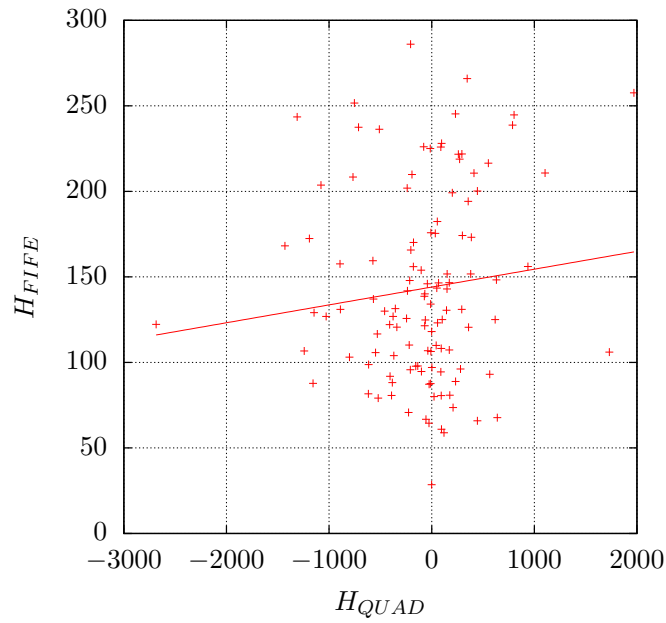


Figura 7.4: Comparação dos valores estimados de H com a solução em quadratura (H_{QUAD}) e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em W m^{-2} .

que, para a hipótese do modelo integral de θ_v pode ser escrita como

$$\frac{d\theta_v}{dt} = \frac{\overline{w'\theta'_{vs}} - \overline{w'\theta'_{vi}}}{h}, \quad (7.8)$$

onde $\overline{\theta_v}$ é a temperatura constante em z .

Com base em dados discretos de $\overline{\theta_v}$, obtidos por radiossondagens sucessivas, e com a parametrização da equação da ECT, pode-se relacionar os fluxos na altura de inversão e no solo, $\overline{w'\theta'_{vi}}$ e $\overline{w'\theta'_{vs}}$.

Essa equação, em conjunto com a equação do balanço de ECT aplicada localmente na inversão possibilita calcular o fluxo de calor sensível na superfície, conforme será mostrado adiante.

A solução da equação 7.8 será feita com a parametrização de Tennekes (1973), com base no uso dos termos de produção de energia cinética da turbulência por flutuabilidade e de transporte e redistribuição, que pode ser escrita como

$$\overline{w'\theta'_{vi}} = c_F \sigma_w^3 \frac{\overline{\theta_v}}{gh}. \quad (7.9)$$

O parâmetro $\sigma_w^3 = w_*^3 + \eta^3 u_*^3$ pode ser expandido, resultando na equação

$$\overline{w'\theta'_{vi}} = c_F w_*^3 \frac{\overline{\theta_v}}{gh} + A u_*^3 \frac{\overline{\theta_v}}{gh}, \quad (7.10)$$

onde foi usada a relação $\eta^3 = A/c_F$. Expressando a escala de velocidade convectiva como

$$w_* = \left[\frac{gh \overline{w'\theta'_{vs}}}{\overline{\theta_v}} \right]^3 \quad (7.11)$$

e substituindo na equação 7.10, encontra-se

$$\overline{w'\theta'_{vi}} = c_F \overline{w'\theta'_{vs}} + A u_*^3 \frac{\overline{\theta_v}}{gh}. \quad (7.12)$$

Essa é uma expressão de fechamento para o cálculo do fluxo de calor. A equação 7.12 é utilizada por diversos autores em casos práticos, demonstrando resultados satisfatórios na análise dos fluxos de calor sensível na altura da inversão (KUSTAS; BRUTSAERT, 1987; CULF, 1992). Segundo Kustas e Brutsaert (1987), esse modelo simples de estimativa de fluxo de calor na inversão é tão bom quanto outros modelos mais complicados, que consideram outros termos da equação da energia cinética da turbulência.

Substituindo a equação 7.12 em 6.7, obtém-se

$$\overline{w'\theta'_{vs}} = \frac{h}{(1-c_F)} \frac{d\overline{\theta_v}}{dt} + \frac{A}{(1-c_F)} \frac{u_*^3 \overline{\theta_v}}{gh}. \quad (7.13)$$

Com esta equação é possível calcular o fluxo superficial de calor virtual, com base apenas em medidas sequenciais de h , $\overline{\theta_v}$ e com medições da velocidade de atrito u_* .

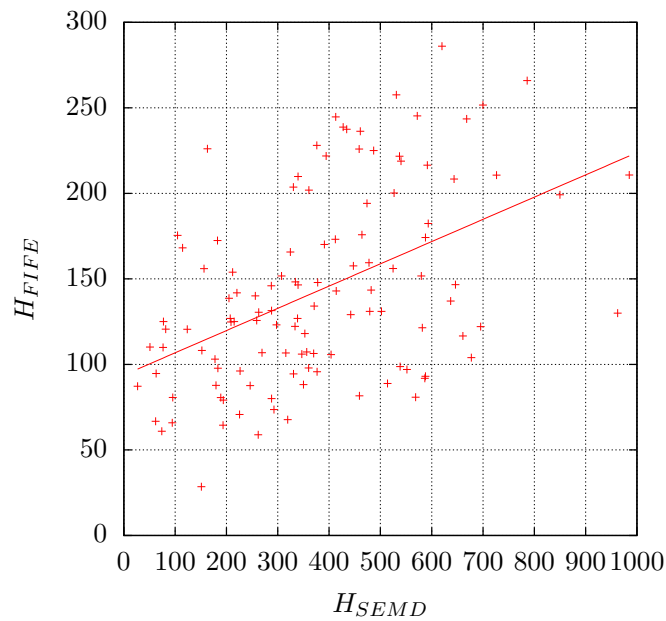


Figura 7.5: Comparação dos valores estimados de H com o modelo integral sem considerar a dinâmica de $\Delta\theta$ (H_{SEMD}), usando $c_F = 0,2$ e $A = 2,5$, e com dados medidos do experimento FIFE(H_{FIFE}). Valores em W m^{-2} .

Resultados do modelo simplificado

A figura 7.5 mostra a comparação da solução desse sistema com os dados medidos. Observa-se que os resultados estão muito melhores do que os apresentados anteriormente.

Não há casos com $dh/dt < 0$ nos dados de entrada, conseqüentemente os resultados sempre mostram $\overline{w'\theta'_s} > 0$, que é condição esperada para as condições convectivas avaliadas.

Observa-se que as equações não explicitam γ e $\Delta\theta$ tornando o modelo menos sensível aos erros cometidos quando se determinam essas variáveis objetivamente a partir do perfil de temperatura na CLC.

Foram testados outros coeficientes, na tentativa de melhorar os resultados. Como os resultados do modelo foram maiores do que os medidos, reduziu-se o coeficiente do termo convectivo, fazendo $c_F = 0,1$. A figura 7.6 apresenta uma pequena alteração nos valores, reduzindo um pouco os valores máximos.

Uma alternativa para tentar encontrar melhores resultados foi utilizar outra maneira para calcular h , a partir da equação 7.1, que significa encontrar um h acima da base da inver-

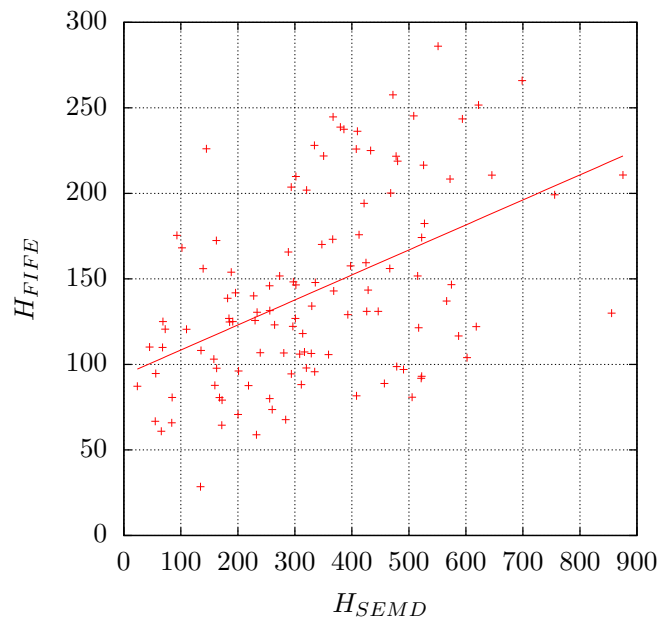


Figura 7.6: Comparação dos valores estimados de H com o modelo integral sem considerar a dinâmica de $\Delta\theta$ (H_{SEMD}), usando $c_F = 0,1$ e $A = 2,5$, e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em W m^{-2} .

são, na ZE. Os resultados mostram aumento nos valores extremos dos fluxos de calor sensível calculados, com valores H atingindo quase 2000 W m^{-2} .

Anulando-se os coeficientes, pode-se desconsiderar o fluxo de calor no entranhamento, o que equivale a dizer que o único forçante para variação da temperatura média na CLC é originada na superfície. A figura 7.8 mostra esta situação. Neste caso, os valores de H continuam altos, mesmo sem a contribuição do fluxo de entranhamento.

Em função dos resultados parciais verificados nas figuras 7.1–7.8 não terem sido bons, a seguir, avaliam-se os perfis de temperatura que fornecem as condições de contorno do problema.

7.3 Discussão dos resultados e análise detalhada dos perfis de $\overline{\theta}_v$

Os resultados mostram limitações do modelo e dificuldades no cálculo de variáveis do perfil de temperatura da CLC. Essas mesmas conclusões são relatadas também por (DRIE-DONKS, 1982), que atribuiu os maiores erros observados em seus estudos à sensibilidade do

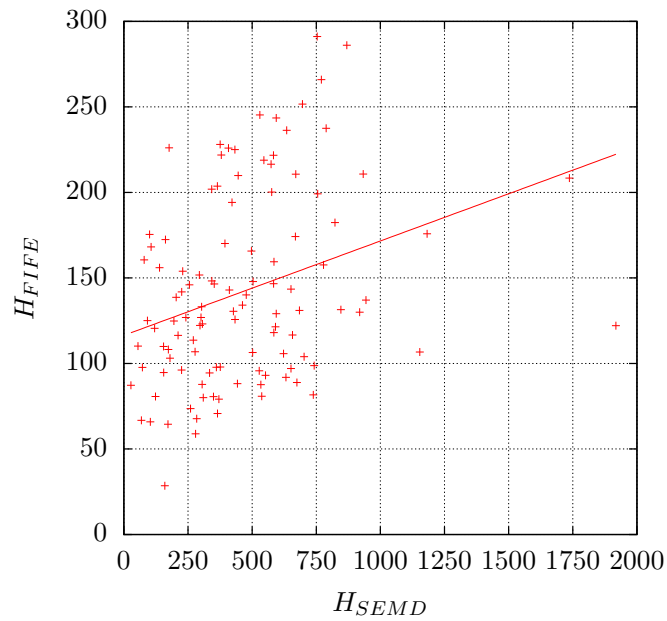


Figura 7.7: Comparação dos valores estimados de H com o modelo integral sem considerar a dinâmica de $\Delta\theta$ (H_{SEMD}), usando $c_F = 0,1$ e $A = 2,5$, e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Neste caso o modelo integral foi evoluído com h calculado com base no balanço de energia na ZE ao invés da base da inversão. Valores em W m^{-2} .

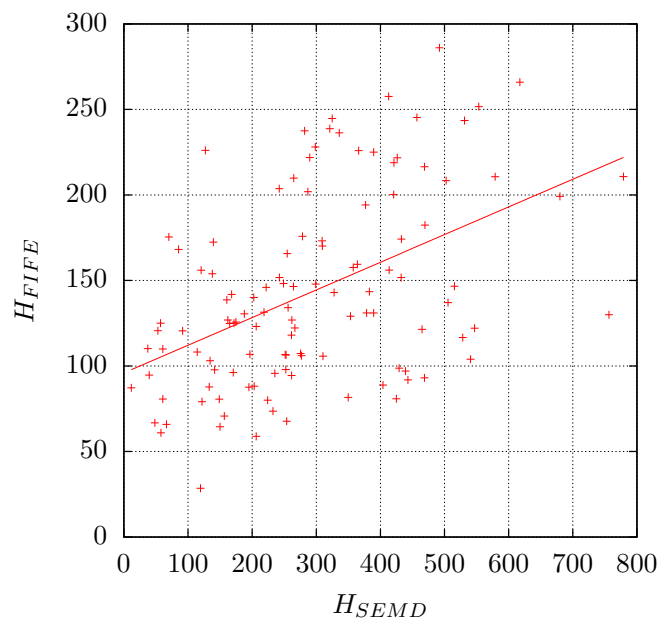


Figura 7.8: Comparação dos valores estimados de H com o modelo integral sem considerar a dinâmica de $\Delta\theta$ (H_{SEMD}), usando $c_F = 0,0$ e $A = 0,0$, e com dados medidos do experimento FIFE (H_{FIFE}). Valores em W m^{-2} .

modelo e às condições de contorno obtidas a partir da leitura das radiossondagens, as quais podem apresentar incertezas em seus valores.

Brutsaert e Mawdsley (1976) propuseram um modelo baseado na existência de duas camadas na CLA, a subcamada interna superficial e a camada externa, para as quais os autores formularam equações para cálculo de fluxos superficiais usando argumentos de similaridade e em termos de variáveis adimensionais. O modelo proposto tinha como principal objetivo calcular evaporação regional em escala diária e a mesma metodologia permitia o cálculo do fluxo superficial de calor sensível. As equações eram resolvidas com base em dados superficiais, da altura da CLA e da velocidade do vento no seu topo, que foram obtidos por meio de radiossondagens.

O trabalho de Brutsaert e Mawdsley (1976) não apresentou bons resultados e os autores atribuem parte do erro para o modelo que eles utilizaram, em que uma das limitações era não considerar efeitos de advecção. Outra dificuldade relatada foi relacionada às radiossondagens, que tinham problemas de tempo de resposta e de efeito da radiação solar nos sensores utilizados. Os mesmos autores apresentam problemas no uso de dados de radiossondagens em outro trabalho (MAWDSLEY; BRUTSAERT, 1977)

Driedonks (1982) também utilizou modelos similares para a estimativa da altura da CLC, e verificou erros em função das variáveis h e $\overline{w'\theta'_{vs}}$.

Kustas e Brutsaert (1987) calcularam fluxos no topo da CLA a partir de modelos baseados na equação da energia cinética da turbulência, a partir de dados de um experimento intensivo com duração de sete dias, nos quais foram obtidos aproximadamente 300 sondagens. O objetivo dos autores era estimar o fluxo de entranhamento, com base em medições superficiais e na aplicação do mesmo modelo do presente estudo (equação 7.12). A aplicação levou os autores a encontrarem valores de $\overline{w'\theta'_i} > 0$, que também viola as hipóteses do modelo que eles utilizaram.

Considerando que: os resultados de cálculo do calor sensível virtual na superfície não foram satisfatórios; pode haver erros por não se considerar processos de advecção e subsidên-

cia; e que há dificuldades nas determinações das condições de contorno a partir de dados de radiossondagens, a seguir, são mostrados alguns casos que confirmam que os perfis da CLA do experimento FIFE raramente são compatíveis com a aproximação do modelo integral de ordem zero.

7.3.1 Dificuldades nas aproximações dos perfis reais para perfis teóricos do modelo integral

Conforme visto na seção 3.5, nem sempre os dados são facilmente extraídos das medições do perfil, em função das limitações dos métodos de medição ou das próprias definições sobre a estrutura e altura da CLA.

No caso do uso de radiossondagens o problema é maior, por se tratarem de medições unidimensionais em condições não estacionárias. A altura da CLA, por exemplo, representa uma situação “instantânea” do percurso da radiossonda, que não necessariamente representa a condição média da CLC (DRIEDONKS, 1982).

O trabalho de leitura dos perfis foi importante para evidenciar diversos aspectos sobre a estrutura e dinâmica da CLA. As análises auxiliaram também na verificação das limitações da aplicação de modelos teóricos simplificados para situações reais da atmosfera.

As figuras a seguir mantêm os mesmos limites, com altura variando no intervalo 0–3000 m e temperatura em 294–314 K, a fim de facilitar a comparação entre elas e evidenciar casos em que há maiores variações ao longo da evolução diurna da CLA. A maioria das figuras apresentam apenas duas sondagens do dia, para deixar o gráfico mais fácil de interpretar por terem menos linhas sobrepostas. Os perfis são acompanhados sempre com o ajuste feito neste trabalho para a aplicação dos modelos. Os pontos notáveis estão aproximadamente na base da inversão, no topo da ZE e dois pontos na atmosfera livre, que nem sempre aparecem na figura por estar acima de 3000 m, fora da escala usada nos gráficos.

A figura 7.9 mostra um caso em que cada perfil de temperatura da radiossondagem é facilmente ajustado ao perfil teórico. Principalmente na segunda sondagem, por volta do meio

dia, a CLC mantém uma temperatura potencial virtual quase constante em 298,2 K e a inversão está bem definida, com um valor de $\Delta\theta_v = 0,65$ K. Nessa situação, a altura da CLC é de 924 m. Os valores de γ são bem ajustados e o gradiente é praticamente o mesmo entre essas duas radiossondagens. Entretanto, observa-se uma variação de aproximadamente 1 K na atmosfera livre.

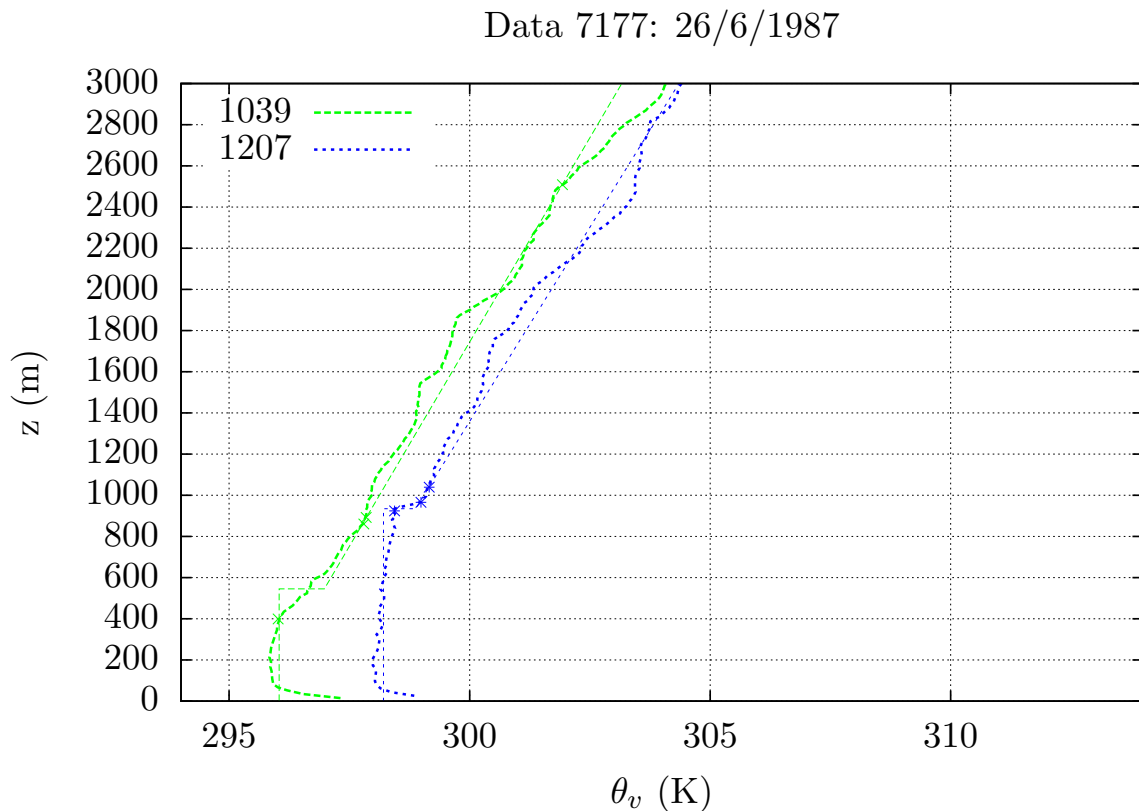


Figura 7.9: Perfis de radiossondagens medidas e ajustadas para o dia 26/06/1987.

Infelizmente, casos como o mostrado na figura 7.9 são poucos nos quase 200 perfis analisados. A seguir, são apresentados alguns perfis que apresentam variações que não permitem fácil ajuste ao perfil teórico, e que podem originar erros nos cálculos que utilizam seus dados.

Os perfis apresentados na figura 7.10 mostram-se com pouca alteração ao longo do dia. Observa-se que $\overline{\theta}_v$ evolui com variação positiva para todos os intervalos. Nessa figura, a sondagem das 10h30 tem a base da inversão em 732 m e a camada de equilíbrio termodinâmico na ZE, em 985 m.

Pode-se observar ainda, que para o perfil das 10h30, o topo da ZE encontra-se na altura estimada em 1215 m. Para aplicação do modelo integral, esta camada que possui 483 m, equivalente a 66% da altura da CLC, deve ser considerada com espessura infinitesimal, conforme perfil esquemático apresentado na figura 7.10. Quanto ao valor de $\Delta\theta_v$, alguns autores utilizam a diferença de temperatura efetiva na inversão (que seria a diferença da temperatura entre o topo e a base da inversão). Outra forma é projetando o gradiente da AL até a altura de equilíbrio termodinâmico da CLC, que foi o método utilizado deste trabalho. No primeiro caso, o resultado seria um $\Delta\theta_v = 3,1$ K e no segundo caso $\Delta\theta_v = 2,4$ K, uma diferença de 0,9 K, equivalente a 22%.

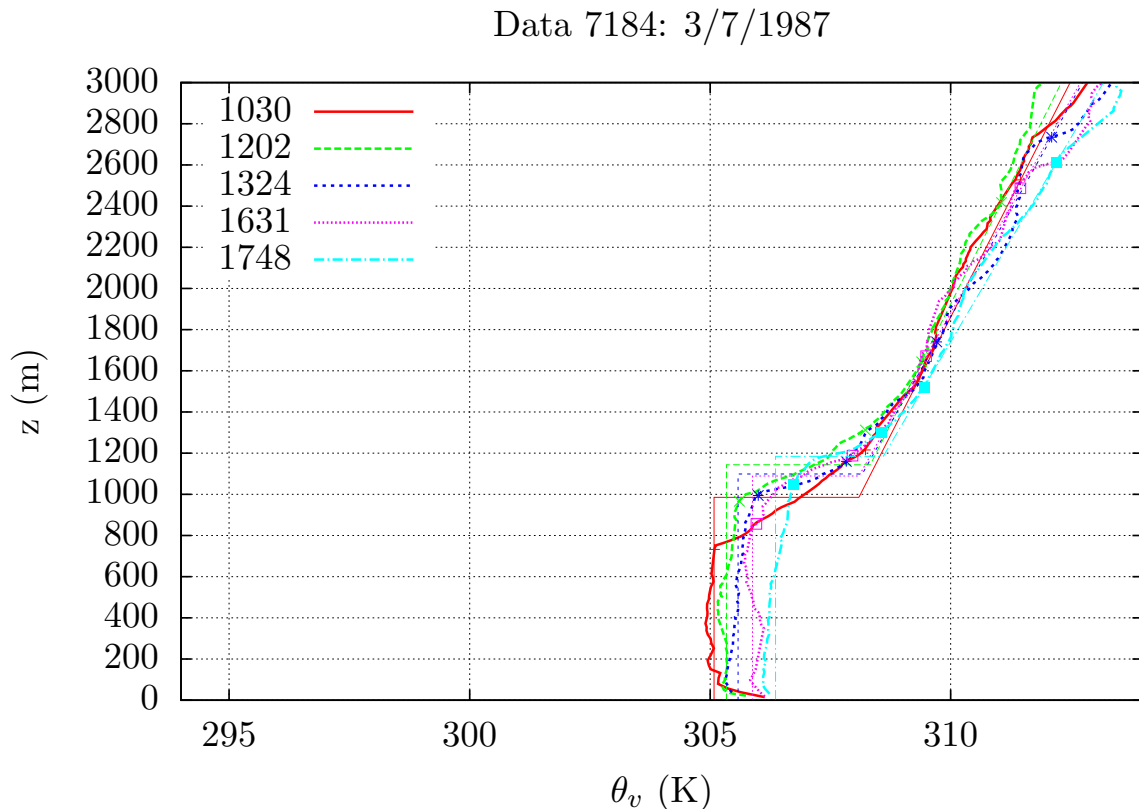


Figura 7.10: Perfis de radiossondagens medidas e ajustadas para o dia 03/06/1987.

A figura 7.11 apresenta uma situação interessante. Houve, no intervalo de 1h20, redução na temperatura de todo o perfil, e redução da altura da CLC. A análise desse tipo de situação depende da verificação dos efeitos de maior escala na atmosfera.

Os perfis mostrados na figura 7.12 representam radiossondagens não consecutivas, uma

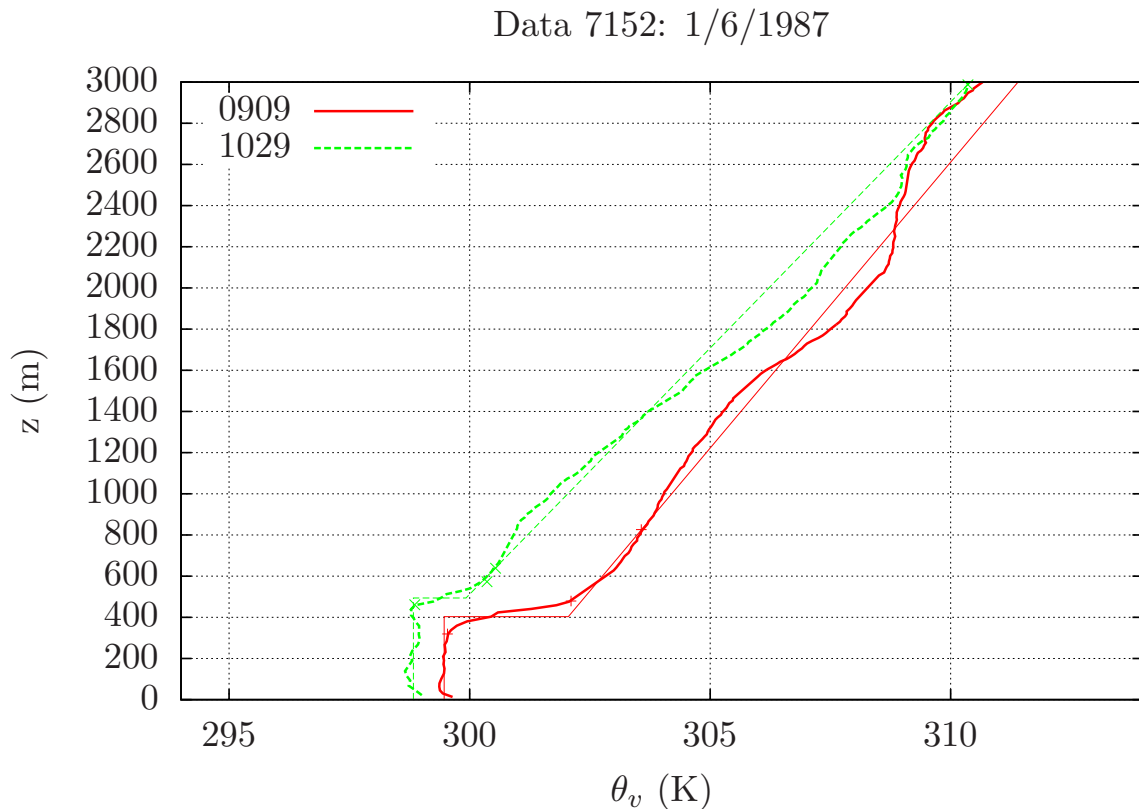


Figura 7.11: Perfis de radiossondagens medidas e ajustadas para o dia 01/06/1987.

no início da manhã (9h10) e outra no final da tarde (16h33). Observa-se grande variação da temperatura na CLC ao longo do dia, com a altura da inversão aumentando de aproximadamente 200m para 1400m no final do dia, quando a CLC estava com uma característica típica.

Conforme observado por Freire e Dias (2013), trata-se de uma situação com presença de camada residual, o que dificulta a análise da evolução da CLA, principalmente com o uso de modelos. O cálculo da altura da CLC com base no balanço de entalpia na ZE resulta em um valor muito diferente (e errado) em relação à base da inversão. Fica também evidente a dificuldade na determinação de $\Delta\theta_v$, nesse caso.

A figura 7.13 mostra uma situação em que é necessário definir até que altura na atmosfera livre deve-se considerar como representativa para a determinação de γ . A figura está limitada a 3000 m, mas esta sondagem foi realizada até 5600 m. A determinação do gradiente de temperatura foi definida com base na avaliação de um trecho por volta de 4000 m, onde o perfil tem comportamento quase linear. Neste caso, também se aplicou o método do balanço

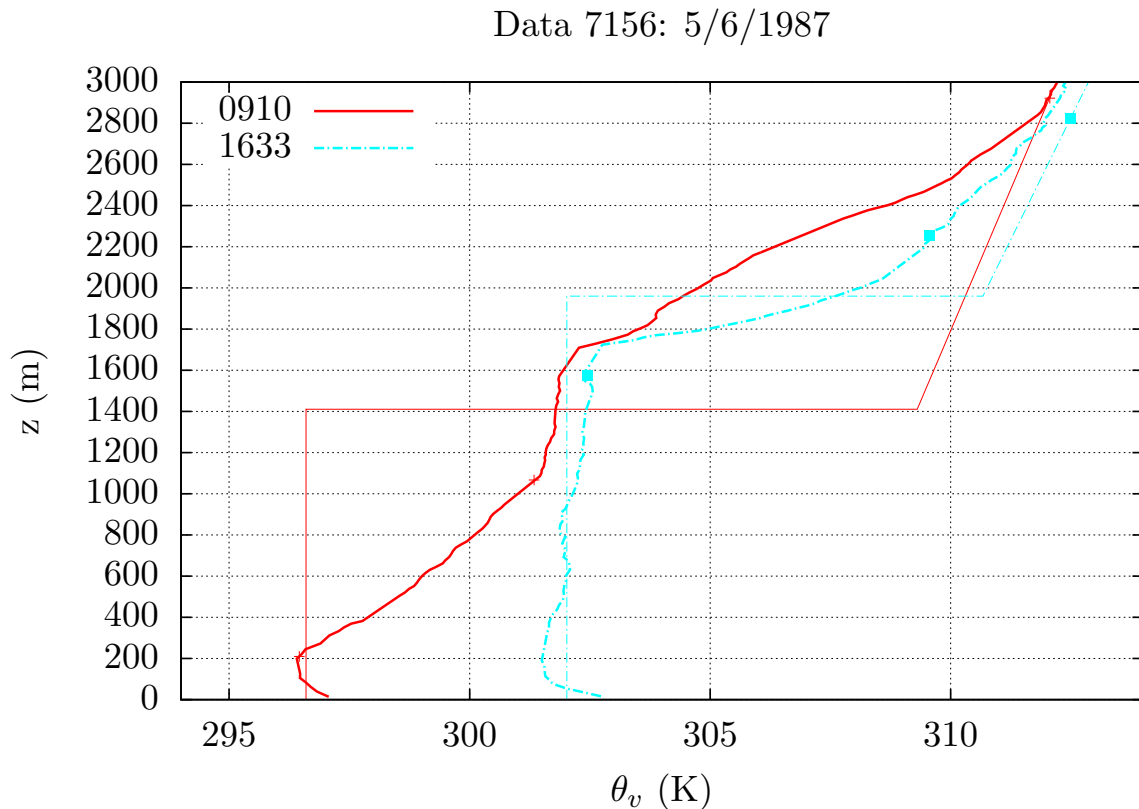


Figura 7.12: Perfis de radiossondagens medidos e ajustadas para o dia 05/06/1987.

de entalpia. Para o horário de 10h32 a altura da CLC está superestimada, perto de 1200 m. A altura perto dos 700 m parece ser mais adequada.

7.4 Conclusões e recomendações para uso do modelo integral invertido

O modelo integral não gerou bons resultados para os dados do FIFE no cálculo do fluxo superficial de calor sensível. Os resultados mostram que, se houver redução do número de variáveis do modelo, as estimativas melhoram e deixam de apresentar valores negativos. Testes com diferentes coeficientes nas equações não melhoram significativamente o resultado.

Não foram considerados os efeitos de advecção e subsidência. Essas simplificações geralmente são feitas nos modelos de cálculo da altura da CLC com o modelo integral, sem prejudicar muito os resultados (DRIEDONKS, 1982; VILLANI et al., 2005; FREIRE; DIAS, 2013). Entretanto, com base nos resultados insatisfatórios e na análise detalhada dos perfis,

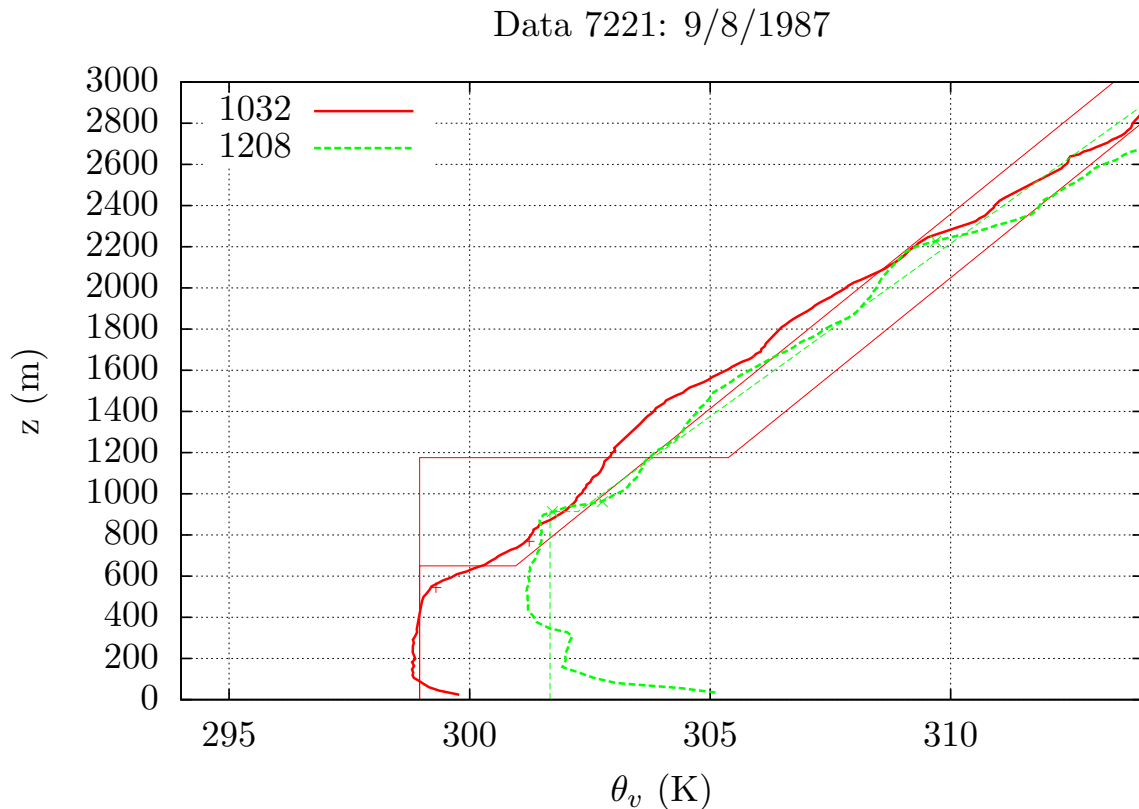


Figura 7.13: Perfis de radiossondagens medidas e ajustadas para o dia 09/08/1987.

esses efeitos devem ser melhor estudados, principalmente para uso do modelo para cálculo de fluxos superficiais.

Os modelos integrais podem ser aplicados para distribuição de outros escalares na camada-limite atmosférica. Arellano et al. (2009), por exemplo, aplicaram o modelo integral para a estimativa do fluxo de emissões superficiais de isopreno a partir de medições de concentrações no perfil da CLC.

Pino et al. (2012) estudaram o balanço de CO_2 na CLC também com base em modelo integral. Os estudos desenvolvidos utilizam parametrização similar à equação 7.2, com a diferença da inclusão de um termo para representar as transformações químicas (ARELLANO et al., 2009).

Os resultados insatisfatórios para o fluxo de calor sensível, indicam que a aplicação do modelo para fluxos de outros escalares também pode trazer resultados incorretos para os respectivos fluxos.

8 Conclusões e Recomendações

Este trabalho apresentou as experiências no desenvolvimento de um VANT para monitoramento da CLA, com resoluções temporal e espacial adequadas. Medições até o topo da CLA só foram possíveis depois de mais de três anos de testes e alterações do sistema.

O VANT mostrou-se como alternativa para obtenção de perfis atmosféricos de temperatura e umidade. O sistema é atrativo para estudos de micrometeorologia, como mais uma plataforma de medição.

O desenvolvimento experimental mostrou que VANTs de menor porte são melhores e mais versáteis, podendo ser lançados manualmente ou com catapulta e fazer aterrissagem em pequenas áreas, com pista relativamente irregular.

A realização dos experimentos mostrou que mesmo os VANTs de pequeno porte podem atingir rotas de aeronaves comerciais. Por questão de segurança, esses experimentos devem ser feitos apenas com autorização do órgão responsável pelo tráfego aéreo.

Os perfis obtidos com o VANT mostram a evolução da CLC em escala menor do que uma hora, sugerindo o uso dos dados no modelo integral invertido, a fim de calcular o fluxo superficial de calor sensível. Contudo, os cálculos exigiram dados superficiais que não foram medidos na estação instalada no sítio experimental de Tijucas do Sul.

A metodologia do modelo integral invertido foi aplicada para dados do experimento FIFE, que tem um amplo banco de dados de perfil e da superfície. O modelo integral de ordem zero foi resolvido com parametrizações da equação da energia cinética da turbulência para o fechamento do sistema.

Os resultados mostram que os modelos integrais de ordem zero, da maneira que foram utilizados, não têm bom desempenho no cálculo do fluxo superficial de calor sensível.

Reduzindo-se o número de variáveis do modelo, os resultados foram melhores e consistentes com a condição convectiva da CLC.

Além das simplificações do modelo integral, há dificuldades na representação do perfil teórico do modelo integral a partir de perfis reais da CLC.

Os cálculos não consideraram efeitos de advecção e subsidência. Diversos autores mostram bons resultados do modelo integral no cálculo da altura CLC, mesmo sem considerar esses efeitos, mas eles se mostraram importantes na análise inversa do modelo para a maioria dos dias analisados.

O desenvolvimento e as conclusões deste trabalho levam às seguintes demandas e sugestões para atividades futuras:

- realizar campanhas de monitoramento com VANT e medições simultâneas com outras plataformas, permitindo outras aplicações para os perfis;
- desenvolver um VANT capaz de realizar medições de fluxos de turbulência na CLA;
- incluir na modelagem inversa os efeitos de subsidência e advecção no modelo integral;
- implementar modelos mais sofisticados para cálculo de fluxos superficiais, como por exemplo de primeira ordem, que podem se mostrar mais realistas quanto à representação dos perfis da CLA.

Referências Bibliográficas

- ARELLANO, J. Vilà-Guerau de; DRIES, K. van den; PINO, D. On inferring isoprene emission surface flux from atmospheric boundary layer concentration measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 9, n. 11, p. 3629–3640, 2009.
- ARYA, S. P. *Introduction to Micrometeorology*. 2. ed. [S.l.]: Academic Press, 2001.
- BALL, F. K. Control of inversion height by surface heating. *Quartely Journal of The Royal Meteorology Society*, v. 86, p. 483–494, 1960.
- BALSLEY, M. L. J. B. B.; FREHLICH, R. G. The use of state-of-the-art kites for profiling the lower atmosphere. *Boundary Layer Meteorology*, v. 87, p. 1–25, 1998.
- BATCHVAROVA, E.; GRYNING, S.-E. Applied model for the growth of the daytime mixed layer. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 56, p. 261–274, 1991.
- BATCHVAROVA, E.; GRYNING, S.-E. An applied model for the height of the daytime mixed layer and the entrainment zone. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 71, p. 311–323, 1994.
- BATCHVAROVA, E.; GRYNING, S.-E. Modelling internal boundary-layer development in a region with a complex coastline. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 90, p. 1–20, 1999.
- BERMAN, S.; KU, J.-Y. Uncertainties in estimating the mixing depth - comparing three mixing depth models with profiler measurements. *Atmospheric Environment*, v. 31, p. 3023–3039, 1997.
- BETTS, A. K. Reply to comments on “non-precipitating cumulus convection and its parameterization”. *Quartely Journal of The Royal Meteorology Society*, v. 100, p. 469–471, 1974.
- BETTS, A. K. Five atmospheric boundary layer budget methods. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 18523–18531, 1992.
- BEYRICH, F. Discussion - sodar estimates of surface heat flux and mixed layer depth compared with direct measurements. *Atmospheric Environment*, v. 26, p. 2459–2461, 1992.
- BEYRICH, F. Mixing height estimation from sodar data - a critical discution. *Atmospheric Environment*, v. 31, p. 3941–3953, 1997.
- BONIN, T.; CHILSON, P.; ZIELKE, B.; FEDOROVICH, E. Observations of the early evening boundary-layer transition using a small unmanned aerial system. *Boundary Layer Meteorology*, v. 146, p. 119–132, 2013.
- BRUTSAERT, W. *Evaporation into the atmosphere*. Dordrecht: D. Reidel, 1982.

- BRUTSAERT, W. Atmospheric profiles: Brutsaert (fife). data set. In: *Available on-line [http://www.daac.ornl.gov] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A.* [S.l.: s.n.], 1994.
- BRUTSAERT, W.; MAWDSLEY, J. A. The applicability of planetary boundary-layer theory to calculate regional evapotranspiration. *Water Resources Research*, v. 12, n. 5, p. 852–858, October 1976.
- BURBA, G.; ANDERSON, D. *A Brief Practical Guide to Eddy Covariance Flux Measurements: Principles and Workflow Examples for Scientific and Industrial Applications*. 1.0.1. ed. [S.l.]: LI-COR Biosciences, 2010.
- BUSINGER, J. *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling: Equations and concepts*. Dordrecht: In: F.T.M. Nieuwstadt and H.V. Dop, Editors. Reidel, 1982.
- CHAO, H.; CAO, Y.; CHEN, Y. Autopilots for small unmanned aerial vehicles: A survey. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, v. 8, p. 36–44, 2010.
- CHEN, W.; KUZE, H.; UCHIYAMA, A.; SUZUKI, Y.; TAKEUCHI, N. One-year observation of urban mixed layer characteristics at tsukuba, japan using a micro pulse lidar. *Atmospheric Environment*, v. 35, p. 4273–4280, 2001.
- CHILSON, P. B.; GLEASON, A. M.; ZIELKE, B.; FENG, N.; YEARY, M.; KLEIN, P. M.; SHALAMUNEC, W. Smartsonde: A small uas platform to support radar research. In: *AMS - American Meteorology Society: 34th Conference on Radar Meteorology*. [S.l.: s.n.], 2009.
- CORRIGAN, C. E.; ROBERTS, G. C.; RAMANA, M. V.; KIM, D.; RAMANATHAN, V. Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the indian ocean using autonomous unmanned aerial vehicles. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, v. 7, p. 11429–11463, 2007.
- CORRIGAN, C. E.; ROBERTS, G. C.; RAMANA, M. V.; KIM, D.; RAMANATHAN, V. Capturing vertical profiles of aerosols and black carbon over the indian ocean using autonomous unmanned aerial vehicles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 8, p. 737–747, 2008.
- COUTER, R. L. A comparison of the three methods for measuring mixing-layer height. *Journal of Applied Meteorology*, v. 18, p. 1495–1499, 1979.
- COX, T. H.; SOMERS, I.; FRATELLO, D. J. *Earth Observations and the Role of UAVs: A Capabilities Assessment*. [S.l.], 2006.
- CULF, A. D. An application of simple models to sahelian convective boundary-layer growth. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 58, p. 1–18, 1992.
- DANDOU, A.; TOMBROU, M.; SCHÄFER, K.; EMEIS, S.; PROTONOTAIU, A. P.; BOSSIOLI, E.; SOULAKELLIS, N.; SUPPAN, P. A comparison between modelled and measured mixing-layer height over munich. *Boundary Layer Meteorology*, v. 131, p. 425–440, 2009.
- DEARDORFF, J. W. Prediction of convective mixed-layer entrainment for realistic capping inversion structure. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 36, p. 424–436, 1979.

- DIAK, G. R.; WHIPPLE, M. S. A note on the use of radiosonde data to estimate the daytime fluxes of sensible and latent heat: a comparison with surface flux measurements from the fife. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 68, p. 63–75, 1994.
- DIAS, N.; GONÇALVES, J.; FREIRE, L.; HASEGAWA, T.; MALHEIROS, A. Obtaining potential virtual temperature profiles, entrainment fluxes, and spectra from mini unmanned aerial vehicle data. *Boundary Layer Meteorology*, v. 145, p. 93–111, 2012.
- DIAS, N.; GONÇALVES, J.; HASEGAWA, T.; FREIRE, L.; MALHEIROS, A. High resolution atmospheric profiles with a mini-uav. In: *John C. Wyngaard Symposium on Atmospheric Turbulence and Boundary Layers*. Peen State: [s.n.], 2010.
- DIAS, N.; GONÇALVES, J.; MALHEIROS, A.; HASEGAWA, T. Probing the atmospheric boundary-layer with a cost-effective mini-uav. *AsiaFlux Newsletter*, v. 30, p. 16–22, 2009.
- DRIEDONKS, A. G. M. Models and observation of the growth of the atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 23, p. 283–306, 1982.
- EICHINGER, E. W.; HOLDER, H. E.; KNIGHT, R.; NICHOLS, J.; COOPER, D. I.; HIPPS, L. E.; KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J. H. Lidar measurement of boundary layer evolution to determine sensible heat fluxes. *Journal of Hydrometeorology*, v. 6, p. 840–853, 2005.
- EMEIS, S.; SCHÄFER, K. Remote sensing methods to investigate boundary-layer structures relevant to air pollution cities. *Boundary Layer Meteorology*, v. 121, p. 377–385, 2006.
- ENGELBART, D. A. M.; STEINHAGEN, H. Ground-based remote sensing of atmospheric parameters using integrated profiling stations. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 26, p. 219–223, 2001.
- ERESMAA, N.; HÄRKÖNEN, J.; JOFFRE, S. M. A three-step method for estimating the mixing height using ceilometer data from the helsinki testbed. *Journal of*, v. 51, p. 2172–2187, 2012.
- FREIRE, L. S.; DIAS, N. L. Residual layer effects on the modeling of convective boundary layer growth rates with a slab model using fife data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 118, p. 12,869–12,878, 2013.
- FRISCH, U. *Turbulence*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1995.
- GARRATT, J. R. Review: the atmospheric boundary layer. *Earth-Science Reviews*, v. 37, p. 89–134, 1994.
- GASSMANN, M. I.; MAZZEO, N. A. Nocturnal stable boundary layer height model and its application. *Atmospheric Research*, v. 57, p. 247–259, 2001.
- GONÇALVES, J. E.; MALHEIROS, A. L.; NASCIMENTO, E. L.; MAGGIOTTO, S. R.; DIAS, N. L. Determinação prática da altura da camada-limite atmosférica para aplicação em modelos de dispersão de poluentes. In: *XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.
- GRIMSDELL, A. W.; ANGEVINE, W. M. Modelling of the urban heat island and of its interaction with pollutant dispersal. *Journal of Applied Meteorology*, v. 41, p. 3–11, 2002.

- GRYNING, S.-E.; BATCHVAROVA, E. Regional heat flux over the nopex area estimated from the evolution of the mixed-layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 98–99, p. 159–167, 1999.
- HAEFFELIN, M.; ANGELINI, F.; MORILLE, Y.; MARTUCCI, G.; FREY, S.; GOBBI, G. P.; LOLLI, S.; O'DOWD, C. D.; SAUVAGE, L.; XUEREF-RÈMY, I.; WASTINE, B.; FEIST, D. G. Evaluation of mixing-height retrievals from automatic profiling lidars and ceilometers in view of future integrated networks in europe. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 143, p. 49–75, 2012.
- HÄGELI, P.; STEYN, D. G.; STRAWBRIDGE, K. B. Spatial and temporal variability of mixed-layer depth and entrainment zone thickness. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 97, p. 47–71, 2000.
- HENNEMUTH, B.; LAMMERT, A. Determination of the atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter. *Boundary Layer Meteorology*, v. 120, p. 181–200, 2006.
- HOLLAND, G. J.; MCGEER, T.; YOUNGREN, H. Autonomous aersondes for economical atmospheric sounding anywhere on the globe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 73, p. 1987–1998, 1992.
- HOLLAND, G. J.; WEBSTER, P. J.; CURRY, J. A.; TYRELL, G.; GAUNTLETT, D.; BRETT, G.; BECKER, J.; HOAG, R.; VAGLIENTI, W. The aerosonde robotic aircraft: A new paradigm for environmental observations. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 82, p. 889–901, 2001.
- JOHANSSON, C.; BERGSTRÖM, H. An auxiliary tool to determine the height of the boundary layer. *Boundary Layer Meteorology*, v. 115, p. 423–432, 2005.
- KAIMAL, J. C.; ABSHIRE, N. L.; CHADWICK, R. B.; DECKER, M. T.; HOOKE, W. H.; KROPFLI, R. A.; NEFF, W. D.; PASQUALUCCI, F.; HILDEBRAND, P. H. Estimating the depth of the daytime convective boundary layer. *American Meteorological Society*, v. 21, p. 1123–1129, 1982.
- KIM, S. K.; PARK, S.; PINO, D.; ARELLANO, J. Vilà-Guerau de. Parameterization of entrainment in a sheared convective boundary layer using a first-order jump model. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 120, p. 455–475, 2006.
- KROONENBERG, A. V. D.; BEYRICH, S. M. an F.; BANGE, J. Spatially-averaged temperature structure parameter over a heterogeneous surface measured by an unmanned aerial vehicle. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 142, p. 55–77, 2012.
- KROONENBERG, A. V. D.; MARTIN, T.; BUSCHMANN, M.; BANGE, J.; VÖRSMANN, P. Measuring the wind vector using the autonomous mini aerial vehicle m2av. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 25(11), 2008.
- KUSTAS, W. P.; BRUTSAERT, W. Virtual heat entrainment in the mixed layer over very rough terrain. *Boundary Layer Meteorology*, v. 38, p. 141–157, 1987.
- LAUBACH, J.; FRITSCH, H. Convective boundary layer budgets derived from aircraft data. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 111, p. 237–263, 2002.

- LENA, F.; DESIATO, F. Intercomparison of nocturnal mixing height estimate methods for urban air pollution modelling. *Atmospheric Environment*, v. 33, p. 2385–2393, 1999.
- LILLY, D. K. Models of cloud-topped mixed layers under a strong inversion. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 94, p. 292–309, 1968.
- MA, S.; CHEN, H.; WANG, G.; PAN, Y.; LI, Q. A miniature robotic plane meteorological sounding system. *ADVANCES IN ATMOSPHERIC SCIENCES*, v. 21–6, p. 890–896, 2004.
- MAHRT, L.; VICKERS, D. Contrasting vertical structures of nocturnal boundary layers. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 105, p. 351–363, 2002.
- MALHEIROS, A.; DIAS, N.; J.E.GONÇALVES; T.; WOLF, S. V. ande R. Experiências no uso de veículos aéreos não-tripulados para medições de perfis na camada-limite atmosférica. In: *CD-ROM, XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. [S.l.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009.
- MALHEIROS, A. L.; DIAS, N. L. Determinação prática da altura da camada-limite atmosférica para aplicação em modelos de dispersão de poluentes. In: *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004.
- MARTIN, S.; BANGE, J.; BEYRICH, F. Meteorological profiling of the lower troposphere using the research uav “m2av carolo”. *Atmos. Meas. Techniques*, v. 4, p. 705–716, 2011.
- MARTIN, S.; BEYRICH, F.; BANGE, J. Observing entrainment processes using a small unmanned aerial vehicle: A feasibility study. *Boundary Layer Meteorology*, v. 150, p. 449–467, 2014.
- MAWDSLEY, J. A.; BRUTSAERT, W. Determination of regional evapotranspiration from upper air meteorological data. *Water Resources Research*, v. 13, p. 539–548, 1977.
- MCNAUGHTON, K. G.; SPRIGGS, T. W. A mixed-layer model for regional evaporation. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 34, p. 243–262, 1986.
- MYRICK, R. H.; SAKIYAMA, S. K.; ANGLE, R. P.; SANDHU, H. S. Seasonal mixing heights and inversions at edmonton, alberta. *Atmospheric Environment*, v. 28, p. 723–729, 1994.
- NAGAR, S. G.; TYAGI, A.; SEETAMARAYYA, P.; SINGH, S. S. Growth of the summer daytime convective boundary layer at anand. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 98, p. 297–314, 2001.
- NIEUWSTADT, F. T. M.; DUYNKERKE, P. G. Turbulence in the atmospheric boundary layer. *Atmospheric Research*, v. 40, p. 111–142, 1996.
- NONAMI, K.; KENDOUL, F.; SUZUKI, S.; WANG, W.; NAKAZAWA, D. *Autonomous Flying Robots: Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles*. [S.l.]: Springer, 2010.
- OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. London: Methuen, 1987.
- ORLANSKI, I. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 56, 1975.

- PARLANGE, M. B.; BRUTSAERT, W. Are radiosonde time scales appropriate to characterize boundary layer wind profiles? *Journal of applied meteorology*, v. 29, p. 249–255, 1990.
- PIESS, T.; BANGE, J.; USCHMANN, M.; VORSMANN, P. P. First application of the meteorological mini-uav. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 16, p. 159–169, 2007.
- PINO, D.; ARELLANO, J. V.-G. de; KIM, S.-W. Representing sheared convective boundary layer by zeroth- and first-order-jump mixed-layer models: Large-eddy simulation verification. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY*, v. 45, p. 1224–1243, 2006.
- PINO, D.; ARELLANO, J. Vilà-Guerau de; PETERS, W.; SCHRÖTER, J.; HEERWAARDEN, C. C. van; KROL, M. C. A conceptual framework to quantify the influence of convective boundary layer development on carbon dioxide mixing ratios. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 12, n. 6, p. 2969–2985, 2012.
- PIRINGER, M. Exploring the urban boundary layer by sodar and tetheredsonde. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 26, p. 213–217, 2001.
- PIRINGER, M.; BAUMANN, K.; LANGER, M. Summertime mixing heights at vienna, austria, estimated from vertical soundings and by a numerical model. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 89, p. 25–45, 1998.
- RAMANA, M. V.; RAMANATHAN, V.; KIM, D.; ROBERTS, G. C.; CORRIGAN, C. E. Albedo, atmospheric solar absorption and heating rate measurements with stacked uavs. *Quartely Journal of The Royal Meteorology Society*, v. 133, p. 1913–1931, 2007.
- REUDER, J.; BRISSET, P.; JONASSEN, M.; MULLER, M.; MAYER, S. Sumo: A small unmanned meteorological observer for atmospheric boundary layer research. In: *14th International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing*. [S.l.: s.n.], 2008.
- REUDER, J.; BRISSET, P.; JONASSEN, M.; MULLER, M.; MAYER, S. The small unmanned meteorological observer sumo: A new tool for atmospheric boundary layer research. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 18, p. 141–147, 2009.
- SCHWARTZ, B.; GOVETT, M. *A hydrostatically consistent North American Radiosonde Data Base at the forecast Systems Laboratory, 1946-present*. Broadway, Boulder, 1992.
- SEIBERT, P.; BEYRICH, F.; GRYNING, S.-E.; JOFFRE, S.; RASMUSSEN, A.; TERCIER, P. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmospheric Environment*, v. 34, p. 1001–1027, 2000.
- SODDELL, J. R.; MCGUFFIE, K.; HOLLAND, G. J. Intercomparison of atmospheric soundings from the aerosonde and radiosonde. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY*, v. 43, p. 1260–1269, 2004.
- STULL, R. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer, 1988.
- STULL, R. B. Static stability - an update. *Bulletin of American Meteorological Society*, v. 72, p. 1521–1529, 1991.
- TENNEKES, H. A model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 30, p. 558–567, 1973.

TENNEKES, H.; DRIEDONKS, A. G. M. Basic entrainment equations for the atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 20, p. 515–531, 1981.

TOMBROU, M.; DANDOU, A.; HELMIS, C.; AKYLAS, E.; ANGELOPOULOS, G.; FLOCAS, H.; ASSIMAKOPOULOS, V.; SOULAKELLIS, N. Model evaluation of the atmospheric boundary layer and mixed-layer evolution. *Bo*, v. 124, p. 61–79, 2007.

US-DOD. *Joint Publication 1-02*. [S.l.]: Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms, 2010.

VALAVANIS, K. P.; KONTITSIS, M. *Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy. Chapter 2: A Historical Perspective on Unmanned Aerial Vehicles*. Tampa: In: K. P. Vlavanis, Editor. Springer, 2007.

VALAVANIS, K. P.; KONTITSIS, M. *Observing Systems for Atmospheric Composition. Chapter 8: Uninhabited Aerial Vehicles: Current and Future Use*. [S.l.]: In: G. Visconti, M. Schoeberl, P. Di Carlo, A. Wahner, W. H. Brune, Editors. Springer, 2007.

VALAVANIS, K. P.; VACHTSEVANOS, G. J.; ANSTAKLIS, P. J. *Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy . Chapter 18: Conclusions and the Road Ahead*. Tampa: In: K. P. Vlavanis, Editor. Springer, 2007.

VILLANI, M. G.; MAURIZI, A.; TAMPIERI, F. Discussion and applications of slab models of the convective boundary layer based on turbulent kinetic energy budget parameterisations. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 114, p. 539–556, 2005.

WATAI, T.; MACHIDA, T.; ISHIZAKI, N.; INOUE, G. A observation system for atmospheric carbon dioxide concentration using a small unmanned aerial vehicle. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 23, p. 700–710, 2006.

YU, T. W. Determining height of nocturnal boundary layer. *Journal of Applied Meteorology*, v. 17, p. 28–33, 1978.

ZANTEN, M. C. V.; DUYNKERKE, P. G.; CUIJPERS, J. W. M. Entrainment parameterization in convective boundary layers. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 56, p. 813–828, 1999.

ZEMAN, O.; TENNEKES, H. Parameterization of the turbulent energy budget at the top of the daytime atmospheric boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 34, p. 111–123, 1977.

ZILITINKEVICH, S. S. Comments on “a model for the dynamics of the inversion above a convective boundary layer”. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 32, p. 991–992, 1975.