



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ  
HELÁDIO GONÇALVES NEPOMUCENO**

**O AVIÃO LABORATÓRIO PARA PESQUISA ATMOSFÉRICAS  
(ALPA): a instrumentação embarcada**

**FORTALEZA – CEARÁ  
2011**

HELÁDIO GONÇALVES NEPOMUCENO

O AVIÃO LABORATÓRIO PARA PESQUISAS ATMOSFÉRICAS (ALPA): a  
instrumentação embarcada

Monografia submetida à Coordenação do  
Curso de Graduação em Física, modalidade  
Licenciatura Presencial, da Universidade  
Estadual do Ceará, como requisito parcial  
para a obtenção do Grau de Licenciado em  
Física.

Área de Concentração: Instrumentação  
Atmosférica Embarcada

Orientador: Prof. Dr. Carlos Jacinto de  
Oliveira

Co-Orientador: Prof. Dr. Francisco Geraldo  
de Melo Pinheiro

FORTALEZA - CEARÁ  
2011

N441a Nepomuceno, Heládio Gonçalves.  
O Avião Laboratório para Pesquisas Atmosféricas(A.L.P.A): a instrumentação embarcada / Heládio Gonçalves Nepomuceno. — 2011.  
82 f.: il. color, enc. ; 30 cm.

Monografia (Graduação) – Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciência e Tecnologia, Curso de Física, Fortaleza, 2011.  
Orientação: Prof. Dr. Carlos Jacinto de Oliveira.  
Co-orientador: Prof. Dr. Francisco Geraldo de Melo Pinheiro.

1. Instrumentação embarcada. 2. Pesquisas atmosféricas. I. Título.

CDD: 530

HELÁDIO GONÇALVES NEPOMUCENO

O AVIÃO LABORATÓRIO PARA PESQUISAS ATMOSFÉRICAS (ALPA): a  
instrumentação embarcada

Monografia submetida à Coordenação do  
Curso de Graduação em Física, modalidade  
Licenciatura Presencial, da Universidade  
Estadual do Ceará, como requisito parcial  
para a obtenção do Grau de Licenciado em  
Física.

Área de Concentração: Instrumentação  
Atmosférica Embarcada

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Carlos Jacinto de Oliveira (Orientador)  
Universidade Estadual do Ceará

---

Prof. Dr. Francisco Geraldo de Melo Pinheiro  
Universidade Estadual do Ceará

---

Prof. Dr. Antônio Carlos Santana dos Santos  
Universidade Estadual do Ceará

## DEDICATÓRIA

*Dedico esta Monografia ao meu pai Luís Rodrigues Nepomuceno e à minha mãe*

*Antônia Vilma Gonçalves Nepomuceno.*

*Dedico também à minha namorada Neiara Guerreiro de Miranda Leão por ter  
paciência com a minha pessoa durante a produção deste trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. Carlos Jacinto de Oliveira e ao Prof. Dr. Francisco Geraldo de Melo Pinheiro pelo desenvolvimento potencial na orientação deste trabalho e por compartilhar uma carga extensa e muito valiosa de conhecimento;

Ao Projeto CONBINE – Convecção sobre o Nordeste Brasileiro: variabilidade em múltiplas escalas – Proc. 620057/2008-4/CNPq, na pessoa do Prof. Dr. Alexandre Araújo Costa, pelo custeio dos voos da ALPA;

Aos amigos de laboratório Ednardo Moreira Rodrigues, Jonathan Silva Alencar, João Vitor Vieira Colares e aos amigos da universidade Natanael Vieira de Sousa, Paulo Jarbas Camurça, Renato Pinheiro e Bruno Calixto;

Um agradecimento especial ao amigo Rafael Rodrigues Silva por me acompanhar por todo curso de Graduação em Física me ajudando em várias situações;

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos Santana dos Santos por me indicar para trabalhar no grupo de pesquisa do ALPA;

Aos Pilotos Comandantes João Linhares Neto e Alfeu Aboim Neto e ao Auxiliar Técnico de Aeronaves Sr. Francisco Raimundo de Oliveira, enquanto tripulantes dos do ALPA.

*Pensar é fácil. Agir é difícil. Agir conforme o que pensamos, isso ainda o é mais.*

**JohannWolfgang von Goethe**

## RESUMO

Aeronaves instrumentadas são plataformas de pesquisas ideais para colher dados *in situ* quando é preciso cobrir grandes áreas em pouco tempo e realizar coletas de maneira intrusiva. O Avião Laboratório para Pesquisas Atmosféricas (ALPA) é uma aeronave equipada para realizar pesquisas fazendo aquisição e processamento de dados em voo. Sua instrumentação permite que se tenham medidas de tamanho e concentração de gotas e gotículas, concentração de núcleos de condensação de nuvens, conteúdo de água líquida, pressão estática e dinâmica, temperatura do ar e temperatura de ponto de orvalho, onde um GPS permite que se tenha precisão do local para cada medida adquirida. Tendo ainda potencial para realização de outras pesquisas relacionadas com as Ciências da Atmosfera, tais como: Radiometria, Química Atmosférica, Aerofotometria, Ecologia, entre outras. Assim, aeronaves de pesquisas em geral, são plataformas valiosas para uma coleta de dados em meios em que certos parâmetros atmosféricos ainda são indefinidos.

Palavras-chave: Instrumentação Embarcada. Pesquisas Atmosféricas.

## **ABSTRACT**

Instrumented aircrafts are ideal research platforms to collect data in situ whenever need cover large areas in short time and make collections intrusively. The Aircraft Laboratory for Atmospheric Research (ALPA) is an equipped aircraft to do research making acquisition and processing of data in flight. Its instrumentation allows to have measures of size and concentration of drops and droplets, concentration of cloud condensation nuclei, liquid water content, dynamic and static pressure, air temperature and dew point temperature, where a GPS lets you have the local accuracy for each measurement. The ALPA has potential to make other research related to the atmospheric sciences, such as: Radiometry, Atmospheric Chemistry, Aerofotometria, ecology, among others. So, research aircrafts in general, are a valuable platform for data collection in certain surroundings in which atmospheric parameters are still undefined.

**Keywords:** Embedded Instrumentation. Atmospheric Research.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Aeronave T-28 <i>Thunderstorm</i> .....	20
Figura 2 – Dano causado por granizo na região sem blindagem da asa esquerda da aeronave T-28.....	24
Figura 3 – Encapsulamento da FSSP da aeronave T-28 depois de ser atingido por granizo.....	24
Figura 4 – Pilone da asa esquerda do F27 contendo quatro sondas de tipo PMS.....	25
Figura 5 - Cabine da aeronave F27.....	26
Figura 6 - Disposição das sondas e sensores na aeronave F27 .....	29
Figura 7 – Aeronave estratosférica M-55 <i>Geophysica</i> .....	30
Figura 8 - High-Performance Instrumented Airborne Platform for Environmental Research (HIAPER).....	35
Figura 9 - <i>Microwave Temperature Profiler (MTP)</i> .....	37
Figura 10 - <i>Multiple Enclosure Device for Unfractionated Sampling of Air (MEDUSA)</i> .....	39
Figura 11 - <i>Quantum Cascade Laser System (QCLS)</i> .....	41
Figura 12 - CDP instalada no HIAPER .....	42
Figura 13 - <i>Two Dimensional Cloud Probe (2D-C)</i> instalada no HIAPER .....	43
Figura 14 - <i>Ultra-High Sensitivity Aerosol Spectrometer (UHSAS)</i> instalado no HIAPER .....	44
Figura 15 - Plataforma de pesquisa atmosférica montada em aeronave ultraleve....	45
Figura 16 - Fotografia da Plataforma de pesquisa ALPA .....	48
Figura 17 - Localização dos instrumentos na plataforma ALPA.....	51
Figura 18 - Gráficos de velocidade da aeronave, altitude, temperatura e pressão estática de acordo com o tempo de voo .....	54
Figura 19 - Sonda Espectrométrica de Pró-Espalhamento (FSSP).....	59
Figura 20 - Percurso do laser antes e depois do espalhamento luminoso e esquema do arranjo óptico da FSSP.....	60

Figura 21 - OAP-200Y (em primeiro plano) e OAP 200-X (em segundo plano) instaladas na plataforma ALPA.....	62
Figura 22 - Figura 22 – Arranjo óptico da OAP-200X .....	62
Figura 23 - Sensor da sonda SCIRO-King.....	63
Figura 24 - Figura 24 – Diagrama de blocos do CCNC-SDCC.....	64
Figura 25 - Tela principal da Interface gráfica do CCNC-SDCC (versão 1.0) .....	65
Figura 26 - Gráficos de leitura das sondas CSIRO-King, OAP-200X, OAP-200Y e FSSP.....	66
Figura 27 - Gráfico do número de núcleos de condensação de nuvens por unidade de volume em função da supersaturação .....	67
Figura 28 - <i>Cloud Droplet Probe</i> (CDP) .....	69
Figura 29 - <i>Cloud Imaging Probe</i> (CIP).....	69
Figura 30 - <i>Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe</i> (PCASP).....	70
Figura 31 - CIP e CDP instaladas em aeronave de pesquisa.....	70
Figuras 32 (a) e (b) - Método empregado para calibrar a CDP na fábrica .....	71
Figura 33 - <i>Lidar</i> aerotransportado.....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Configuração da aeronave BANDEIRANTE EMB 110 para transporte de passageiros .....	49
Tabela 2 - BANDEIRANTE EMB 110 na configuração de aeronave de pesquisa (ALPA).....	50
Tabela 3 - Comparação de forma geral das aeronaves onde são baseadas as plataformas de pesquisa .....	73
Tabela 4 - Período de atuação, principal local de operação e medidas colhidas pelas plataformas de pesquisa .....	74
Tabela 5 - Instrumentos utilizados pelas aeronaves para adquirir as medidas dos parâmetros de pesquisa .....	75

## LISTA DE SÍMBOLOS

$p_s$	Pressão estática
$q_s$	Pressão dinâmica
$T_t$	Temperatura total
$T_a$	Temperatura ambiente
$T_r$	Temperatura de recuperação
$u_a$	Velocidade da aeronave relativa ao solo
$c_p$	Calor específico do ar seco a pressão constante
$r$	Fator de recuperação
$T_{po}$	Temperatura de ponto de orvalho
$m$	Massa de ar úmido
$V$	Volume de ar
$p$	Pressão atmosférica
$m_{va}$	Massa de vapor d'água
$m_{vs}$	Massa de ar seco
$e_{va}$	Pressão de vapor d'água
$p_{vs}$	Pressão parcial do vapor seco
$T_e$	Temperatura equivalente
$r_m$	Razão de mistura
$c_p$	Calor específico à pressão constante
$\theta$	Temperatura potencial
$p_o$	Pressão padrão de 1000 <i>hPa</i>
$R$	Constante de gás para o ar seco
$\theta_e$	Temperatura potencial equivalente
$T_{nca}$	Temperatura do nível de condensação ascendente
$\rho_{va}$	Umidade absoluta ou densidade de vapor d'água
$e_v$	Pressão do vapor com respeito a uma superfície plana de água

$M_a$	Massa molecular da água
$R_o$	Constante universal dos gases
$U_r$	Umidade relativa
$e_s$	Pressão de saturação do vapor d'água
$N$	Concentração de gotículas por unidade de volume
$D_m$	Diâmetro médio das gotículas
$LWC$	Conteúdo de água líquida
$x$	Número de canais adotados para operarem na sonda
$n_i$	Número de gotículas detectadas pelo canal $i$ da sonda
$d_i$	Diâmetro das gotículas medido pelo canal $i$ da sonda
$\rho$	Densidade da água
$N_c$	Número de núcleos de condensação
$s$	Supersaturação do meio

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALPA	Avião Laboratório para Pesquisas Atmosféricas
FUNECE	Fundação Universidade Estadual do Ceará
LAPA	Laboratório de Pesquisas Atmosféricas
CCT	Centro de Ciências e Tecnologia
UECE	Universidade Estadual do Ceará
GPS	<i>Global Position System</i>
FSSP	<i>Forward Scattering Spectrometer Probe</i>
PMS	<i>Particle Measuring System</i>
ASP	<i>Air State Probe</i>
PADS	<i>Primary Aircraft Data System</i>
DAS	<i>Sistema de Aquisição de Dados - Data Acquisition System</i>
MDB	<i>Myasishchev Design Bureau</i>
Lidar	<i>Light Detection and Ranging</i>
ARIAS	<i>In-Situ Aerosol-Measurement System</i>
MAS	<i>Multiwavelength Aerosol Scatterometer</i>
ABLE	<i>Airborne Lidar Experiment</i>
MAL	<i>Microjoule Airborne Lidar</i>
ECOC	<i>Electrochemical Ozone Cell</i>
FOZAM	<i>Fast Ozone Analyzer</i>
FLASH	<i>Fluorescent Airborne Stratospheric Hygrometer</i>
ACH	<i>Aircraft Condensation Hygrometer</i>
SAFIRE	<i>Spectroscopy of the Atmosphere using Far-Infrared Emission-Airborne</i>
GASCOD	<i>Gas Absorption Spectrometer Correlating Optical Differences-Airborne</i>
HIAPER	<i>High-Performance Instrumented Airborne Platform for Environmental</i>

*Research*

NSF	<i>National Science Foundation</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
HIPPO	<i>HIAPER Pole to Pole Observations</i>
MTP	<i>Microwave Temperature Profiler</i>
IRS	<i>Inertial Reference System</i>
MEDUSA	<i>Multiple Enclosure Device for Unfractionated Sampling of Air</i>
WAS	<i>Whole Air Sampler</i>
QCLS	<i>Quantum Cascade Laser System</i>
RICE	<i>Raw Icing-Rate Indicator</i>
VCSEL	<i>Vertical Cavity Surface Emitting Laser Hygrometer</i>
SP2	<i>Single Particle Soot Photometer</i>
2D-C	<i>Two Dimensional Cloud Probe</i>
UHSAS	<i>Ultra-High Sensitivity Aerosol Spectrometer</i>
CCNC	<i>Contador de Núcleos de Condensação de Nuvens - Cloud Condensation Nuclei Counter</i>
OAP	<i>Optical Array Probe</i>
CSIRO	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation</i>
NCN	<i>Núcleo de Condensação de Nuvem</i>
SDCC	<i>Câmara de Difusão Estática - Static Diffusion Cloud Chamber</i>
CCD	<i>Dispositivo Acoplado de Carga - Charge Coupled Device</i>
INCLINA	<i>Infraestrutura para Estudo das Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro: Papel das Nuvens e Aerossóis</i>
CDP	<i>Cloud Droplet Probe</i>
CIP	<i>Cloud Imaging Probe</i>
PCASP	<i>Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe</i>
INPE	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
NASA	<i>Agência Espacial Americana</i>

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1	T-28 <i>THUNDERSTORM</i> .....	20
2.1.1	VARIÁVEIS DE ESTADO.....	21
2.1.2	HIDROMETEOROS.....	21
2.1.3	VARIÁVEIS DE NAVEGAÇÃO E DESEMPENHO DA AERONAVE .....	23
2.2	<i>FOKKER FRIENDSHIP</i> F27 .....	24
2.2.1	VARIÁVEIS DINÂMICAS .....	26
2.2.2	VARIÁVEIS DE ESTADO DO AR.....	27
2.2.3	SONDAS DE PARTÍCULAS DE NUVENS.....	27
2.2.4	AMOSTRA DE GASES.....	27
2.2.5	AMOSTRA DE AEROSSÓIS .....	28
2.3	M-55 <i>GEOPHYSICA</i> .....	29
2.3.1	INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO DE AEROSSÓIS <i>IN SITU</i> .....	31
2.3.2	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE AEROSSÓIS POR SENSORIAMENTO REMOTO.....	31
2.3.3	INSTRUMENTOS DE QUÍMICA <i>IN SITU</i> .....	32
2.3.4	INSTRUMENTOS DE QUÍMICA POR SENSORIAMENTO REMOTO .....	33
2.4	<i>HIGH-PERFORMANCE INSTRUMENTED AIRBORNE PLATFORM FOR ENVIRONMENTAL RESEARCH (HIAPER)</i> .....	34

2.4.1 INSTRUMENTOS DE TEMPERATURA E PRESSÃO ATMOSFÉRICAS E VELOCIDADE DO VENTO .....	36
2.4.2 INSTRUMENTOS DE QUÍMICA DA ATMOSFERA .....	38
2.4.3 GRUPO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE GASES ATMOSFÉRICOS QUE INFLUENCIAM AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	38
2.4.4 INSTRUMENTOS DE PONTO DE ORVALHO, UMIDADE E VAPOR D'ÁGUA .....	41
2.4.5 INSTRUMENTOS DE AEROSSÓIS E FÍSICA DE NUVENS.....	42
2.5 ULTRALEVE DE PESQUISA.....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	48
3.1 PARÂMETROS DO AVIÃO E DO AMBIENTE .....	52
3.2 PARÂMETROS TERMODINÂMICOS.....	55
3.3 PARÂMETROS DE MICROFÍSICA DE NUVENS .....	58
3.4 PARÂMETROS DE NAVEGAÇÃO.....	72
4 RESULTADOS .....	73
5 CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS .....	78

# 1 INTRODUÇÃO

Algumas medidas de parâmetros atmosféricos necessitam de coletas de dados *in situ*, tendo em vista que as coletas sejam feitas em um meio que possua parâmetros ainda indefinidos.

Uma das formas de coleta de dados nessas condições é através de aeronaves instrumentadas, sendo elas plataformas ideais quando é preciso cobrir grandes áreas em curtos espaços de tempo, ou quando é exigido um tipo de pesquisa mais intrusiva, tomando como exemplo dados coletados dentro de nuvens. Então serão abordadas várias aeronaves de pesquisa focando a instrumentação dedicada à coleta de medias atmosféricas. Posteriormente essas plataformas de pesquisa serão utilizadas para fazer uma breve comparação com o Avião Laboratório para Pesquisas Atmosféricas (ALPA).

O ALPA é uma plataforma de pesquisa que atua principalmente na área da Física da Atmosfera, sendo destinada à aquisição de dados meteorológicos em voo. A sua instrumentação embarcada é particularmente voltada para pesquisas em Microfísica de Nuvens, embora esteja em condições de realizar pesquisas em outras áreas das Ciências Atmosféricas. Essa plataforma está baseada em uma aeronave BANDEIRANTE EMB 110-P1 de prefixo PT-SCY pertencente à Fundação Universidade Estadual do Ceará (FUNECE). Essa plataforma de pesquisa faz parte do Laboratório de Pesquisas Atmosféricas (LAPA) do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Estadual do Ceará (UECE).

A instrumentação do ALPA, na configuração atual, permite a aquisição de dados de temperatura do ar e de ponto de orvalho, pressão estática e dinâmica, conteúdo de água líquida, medidas de tamanho e concentração de gotas e gotículas e concentração de núcleos de condensação de nuvens, tendo a posição (altitude,

longitude, latitude) de cada medida adquirida através de um sistema de GPS (*Global Position System*). Mas podem ser anexados outros equipamentos, dependendo do tipo de pesquisa que se deseja realizar, tendo potencialidades para realizar medidas em várias áreas como: Radiometria, Química da Atmosfera, Aerofotometria, Ecologia, dentre outras. Podendo até mesmo, pela versatilidade de instalação dos seus equipamentos, remover toda a instrumentação embarcada configurando a aeronave para transporte de passageiros. Tornando essa plataforma de pesquisa uma ferramenta valiosa para aquisição de dados atmosféricos *in situ*, assim como qualquer tipo de dado que necessite ser coletado a partir do sobrevoo de uma região com até 7500 metros de altitude acima do nível do mar.

Tendo o ALPA e sua instrumentação como objetos principais, essa Monografia foca apresentar várias aeronaves instrumentadas para pesquisas atmosféricas usadas no mundo e compará-las ao ALPA. Assim a descrição das aeronaves e suas respectivas instrumentações será feita na Revisão da Literatura para que nos Resultados haja uma breve comparação entre as mesmas e o ALPA. Dessa forma pode se ter uma ideia de como o ALPA está inserido meio às pesquisas atmosféricas.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 T-28 *THUNDERSTORM*

Muitos estudos de Física de Nuvens e precipitação requerem observações de dentro das nuvens (JOHNSON e SMITH, 1980). O T-28 *Thunderstorm* (Figura 1) é um avião instrumentado para realizar pesquisas atmosféricas no interior de nuvens meio a tempestades de granizo de grande porte que opera no Estado Norte Americano da Dakota do Sul. Assim, tanto os instrumentos utilizados na pesquisa quanto a aeronave são reforçados para entrar e resistir com segurança a esse tipo de ambiente hostil.

Figura 1– Aeronave T-28 *Thunterstorm*



Fonte: Warner (2007)

Os instrumentos a bordo do T-28 (JOHNSON e SMITH, 1980) podem ser agrupados em três categorias, de acordo com a grandeza da medida: Variáveis de Estado, Hidrometeoros e Variáveis de Navegação e Desempenho da Aeronave.

### 2.1.1 VARIÁVEIS DE ESTADO

Devido à importância da pressão estática e temperatura dentro e ao redor das nuvens de tempestade, estas variáveis são medidas de forma redundante. Onde as medidas são realizadas e os dados armazenados com intervalos de milissegundos. Sendo necessária uma resolução mais elevada nos dados de pressão para que a taxa de subida da aeronave possa ser determinada através da sua diferenciação (altitude).

### 2.1.2 HIDROMETEOROS

Segundo Johnson e Smith (1980), uma de suas características, considerada única da instrumentação do T-28, é a capacidade de medir todo o espectro de tamanho de hidrometeoros presentes em uma tempestade. As partículas podem variar de gotículas de nuvem, com alguns micrômetros de diâmetro, a granizo, com vários centímetros de diâmetro. Assim vários sensores cobrem porções diferentes do intervalo de tamanho fazendo uma sobreposição. Os sensores aplicáveis a cada categoria de tamanho de partícula instalados no T-28 serão listados abaixo. Os valores entre parênteses indicam o volume de amostragem aproximada por unidade de distância ao longo da rota de voo para cada instrumento, o volume de amostragem por unidade de tempo pode ser estimado multiplicando pela velocidade nominal de voo do T-28 de  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

- Gotículas de nuvens, até cerca de  $45 \text{ mm}$  de diâmetro: J-W sensor de concentração de água líquida de nuvem ( $0,015 \text{ m}^3 \cdot \text{Km}^{-1}$ ); Sistema de

medição de partículas *Forward Scattering Spectrometer Probe* (FSSP) ( $3 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{Km}^{-1}$ ).

- Partículas de tamanho intermediário ou "embriões", de 30 *mm* a um pouco mais de 1000 *mm*: *Particle Measuring System* (PMS) *2-dimensional optical array spectrometer* ( $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{Km}^{-1}$ ); *Cannon particle camera* (até  $2 \text{ m}^3 \cdot \text{Km}^{-1}$ ).
- Gotas de chuva, graupel e flocos de neve, cerca de 1 a 5 *mm*: *Continuous hydrometeor sampler* (*foil impactor*:  $1,4 \text{ m}^3 \cdot \text{Km}^{-1}$ ); *Particle camera*.
- Granizo, de 4 *mm* a um pouco mais de 5 *cm*: *Hail spectrometer* ( $100 \text{ m}^3 \cdot \text{Km}^{-1}$ ); *Foil impactor*.

De acordo com Johnson e Smith (1980), o volume de amostragem dos instrumentos tende a ser maior para partículas maiores para compensar as menores concentrações de tais partículas. A alocação de instrumentos para as categorias de tamanhos é arbitrária até certo ponto. Por exemplo, a *2-dimensional optical array spectrometer* fornece imagens parciais de partículas consideravelmente maiores que 1000 *mm*, enquanto a *particle camera* pode fotografar granizo, que possui alguns centímetros. No entanto, os volumes de amostragem dos instrumentos impõem sérias limitações sobre a representatividade dos dados. Comparando as concentrações de partículas submilimétricas determinadas pela *2-dimensional optical array spectrometer* e dados da *foil impactor* mostrou que a última sub-representa os dados para partículas desse tamanho. Portanto, os dados da *foil impactor* do T-28 para esta faixa de tamanho não são normalmente reduzidos.

Informações sobre a distribuição de tamanho de partículas podem ser obtidas a partir das sondas PMS, *particle camera*, *foil impactor* e *hail spectrometer*. Além disso, as fases das partículas (gelo ou água) podem ser determinadas de forma inequívoca a partir dos dados da *particle camera* e, frequentemente, também podem

ser identificados a partir das imagens do PMS *2-dimensional optical array spectrometer*.

### 2.1.3 VARIÁVEIS DE NAVEGAÇÃO E DESEMPENHO DA AERONAVE

Instrumentos que medem a posição da aeronave, altitude e movimento são utilizados para determinar as características dinâmicas da tempestade, como os movimentos verticais do ar e turbulência. O método descrito por Auer e Sand (*apud* JOHNSON e SMITH, 1980) foi inicialmente utilizado para estimar o movimento vertical do ar. No entanto, foram encontradas variações no comportamento das tempestades durante as penetrações, variações essas tão grandes que as suposições do método foram consideradas inválidas. Esforços para empregar os métodos discutidos por Lenschow (*apud* JOHNSON e SMITH, 1980) não tiveram sucesso porque não há dados válidos de ângulo de ataque disponíveis sobre o T-28. Uma palheta de ângulo de ataque foi montada sob a asa direita, mas o efeito *downwash* não pode ser compensando com precisão. A localização central para o instrumento seria o ideal, mas não é viável em um monomotor. O método usado atualmente para determinar os movimentos verticais do ar é semelhante ao descrito em Dye e Toutenhoofd (*apud* JOHNSON e SMITH, 1980).

Johnson e Smith (1980) diz que embora dados valiosos sejam adquiridos com o sistema T-28, há uma necessidade contínua de dados melhorados e observações de outras variáveis. E também afirma que os instrumentos a serem utilizados devem ser tanto eletricamente e mecanicamente robusto para resistir as tempestades, pois aeronaves comuns não o poderiam fazer esse tipo de pesquisa com segurança. As figuras a seguir mostram alguns dos danos causados ao T-28 durante os voos de pesquisa no interior das tempestades, a Figura 2 mostra a região da asa esquerda que não possui blindagem depois de ser atingida pelo granizo e a Figura 3 mostra os danos ao encapsulamento da FSSP utilizada na aeronave.

Figura 2 – Dano causado por granizo na região sem blindagem da asa esquerda da aeronave T-28



Fonte: Warner (2007)

Figura 3 – Encapsulamento da FSSP da aeronave T-28 depois de ser atingido por granizo



Fonte: Warner (2007)

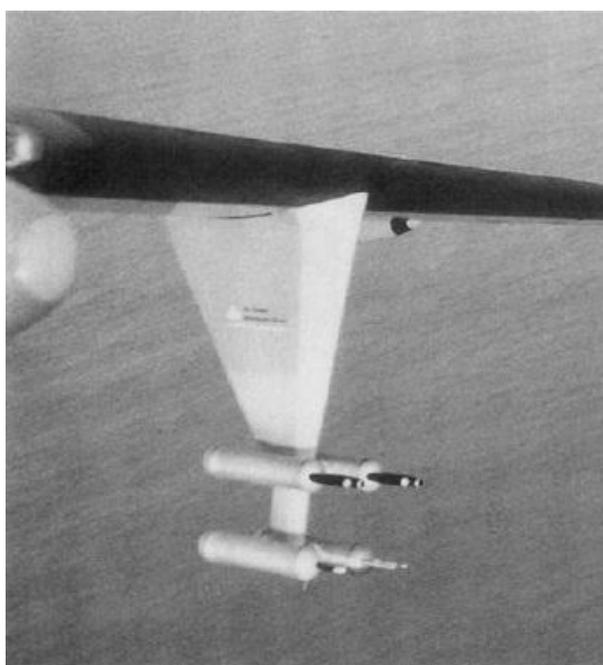
## 2.2 FOKKER FRIENDSHIP F27

O Serviço de Meteorologia da Nova Zelândia possuía uma aeronave *Fokker Friendship F27* instrumentada para coletar dados sobre a troposfera livre na região sudoeste do Oceano Pacífico, porém hoje esse projeto está desativado. Larsen *et al.* (1991) descreve a aeronave e sua instrumentação de maneira geral.

O F27 que coletava dados para o Serviço de Meteorologia neozelandês é um bimotor turboélice que possuía dois pilones de dois metros, um sob cada asa,

sendo que cada pilone tinha a capacidade de transportar quatro sondas do tipo PMS (LARSEN *et al.*, 1991), tendo a função de manter as sondas longe do corpo da aeronave para evitar complicações nas medições e classificação de tamanhos partículas (NORMENT, 1976 apud LARSEN *et al.*, 1991). Larsen *et al.* (1991) ainda relata que esta disposição foi relativamente fácil de conseguir, já que o F27 foi projetado para carregar tanques de combustível sob as asas e não foi preciso reforçar sua fuselagem para que a aeronave conseguisse carregar os pilones com os instrumentos. Assim cada pilone possuía dois pares de pontos de montagem para sondas, como mostra na Figura 4, e são facilmente removíveis caso não requeridos.

Figura 4 – Pilone da asa esquerda do F27 contendo quatro sondas de tipo PMS



Fonte: Larsen *et al.* (1991)

Na fuselagem do F27 continha portas que podiam ser nelas instaladas sensores para amostra de gases, de ponto de orvalho ou de temperatura total do ar. Uma das portas que ficava na parte inferior da fuselagem foi reforçada de tal forma que pudesse comportar um sensor com peso de até 20 Kg (como um medidor de conteúdo de água líquida de nuvens ou uma PMS). Sendo que na sua cabine continha equipamentos como inversores de alimentação e unidades de distribuição,

além de racks com capacidade de transportar até 150 Kg de equipamentos (Figura 5), que podiam ser carregados e instalados ou removidos pela porta da frente da aeronave.

Figura 5 - Cabine da aeronave F27



Fonte: Larsen *et al.* (1991)

As medidas que a aeronave fornecia estavam dispostas de acordo com Larsen *et al.*, 1991.

### 2.2.1 VARIÁVEIS DINÂMICAS

Dados de variáveis dinâmicas eram obtidos principalmente através de equipamentos da própria aeronave. As exceções eram o ângulo de ataque e ângulo de derrapagem, que eram derivados a partir de medições de pressão diferencial no nariz da aeronave (BROWN; FRIEHE; LENSCHOW, 1983 *apud* LARSEN *et al.*, 1991) e velocidade do ar nas sondas das asas, que era medido diretamente usando um anemômetro de vórtices.

### 2.2.2 VARIÁVEIS DE ESTADO DO AR

Variáveis de estado do ar eram medidas através de uma Sonda de Estado do Ar (*Air State Probe - ASP*) montada em um pilone sob uma das asas, bem como de sensores de temperatura e pressão originais da aeronave e sensores de temperatura de ponto de orvalho montados na fuselagem. A ASP é construída em um padrão sonda do tipo PMS que tem seis posições de montagem para vários sensores pequenos. A sonda era capaz de transportar um sensor de temperatura de rápida resposta, um sensor de temperatura de degelo, um anemômetro de vórtice e um sensor de conteúdo de água líquida (LARSEN *et al.*, 1991).

### 2.2.3 SONDAS DE PARTÍCULAS DE NUVENS

A maioria das medições de microfísica e aerossóis eram obtidas usando diversas sondas fabricadas pela *Particle Measuring Systems Incorporated* (KNOLLENBERG, 1976 *apud* LARSEN *et al.*, 1991). Estas sondas usavam técnicas de espalhamento de luz e sombra para determinar tamanhos, formas e concentrações de gotas de água, gelo, poeira e outras partículas pequenas encontradas na atmosfera.

### 2.2.4 AMOSTRA DE GASES

Um simples sistema de coleta de gases compreendendo um par de tubos de aço inoxidável de entrada e saída de ar, bombas de fole e garrafas para coleção de até 196 amostras de ar que posteriormente são levadas para análise laboratorial de cromatografia gasosa.

### 2.2.5 AMOSTRA DE AEROSSÓIS

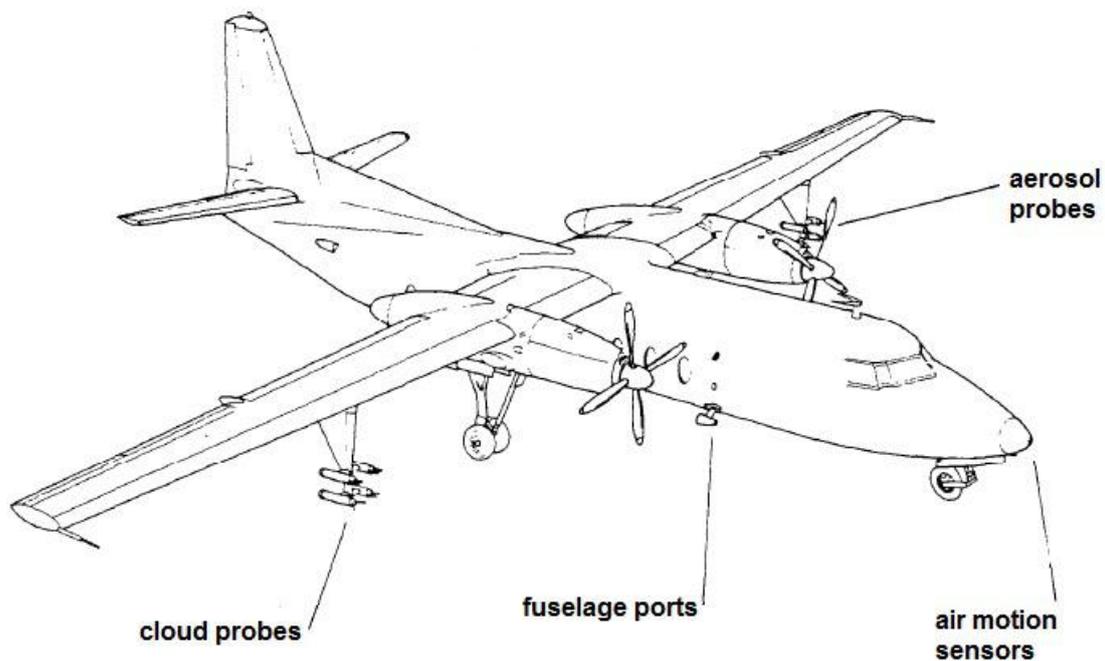
Além dos sensores sob as asas, medidas eram feitas pelo recolhimento dos aerossóis para cabine de fluxo de ar através da porta de gases, em seguida, extraídos por impactação ou filtração para um estudo mais aprofundado.

O Sistema Primário de Dados da Aeronave (*Primary Aircraft Data System* - PADS) foi desenvolvido pelo Serviço de Meteorologia da Nova Zelândia. Esse sistema recolhia e processava a maioria dos dados analógicos e todos os dados digitais, assim como os dados das sondas PMS. O modo com que o sistema foi montado permitia uma considerável flexibilidade quanto à configuração do hardware, permitindo mudar uma placa de circuito defeituosa durante o voo com o mínimo de tempo de inatividade, além de conter um Sistema de Aquisição de Dados (*Data Acquisition System* - DAS) PMS que podia manipular e gravar os dados das sondas.

Requisitos de calibração naturalmente diferem entre as aplicações de diferentes tipos de pesquisa (LARSEN *et al.*, 1991). Em geral, os sensores de variáveis dinâmicas e posicionamento dos aviões eram calibrados pelos operadores da aeronave a partir dos padrões de navegação. Sensores de temperatura e umidade eram calibrados no solo por correções aplicadas em sua dinâmica e posicionamento, seus dados também eram cruzados com os dados calibrados das sondas. Os contadores de partículas PMS eram calibrados em intervalos regulares e eram verificados antes e depois de cada sequência de voos utilizando esferas de látex com tamanhos predefinidos.

A disposição das sondas e dos sensores do F27 está de acordo com a Figura 6:

Figura 6 - Disposição das sondas e sensores na aeronave F27



Fonte: Larsen *et al.* (1991)

### 2.3 M-55 GEOPHYSICA

O avião estratosférico M-55 *Geophysica* (Figura 7) é uma aeronave turbofan desenhada por Myasishchev Design Bureau (MDB). A aeronave pode transportar cargas de até 1500 Kg e pode operar a uma altitude de até 21 Km por cerca de 5 a 6 horas de voo, com velocidade de cruzeiro de cerca de  $750 \text{ Km}\cdot\text{h}^{-1}$  (STEFANUTTI *et al.*, 1999).

Figura 7 – Aeronave estratosférica M-55 *Geophysica*

Fonte: Seaman (2011)

Segundo Stefanutti *et al.*, (1999) o *Geophysica* tem vários compartimentos na fuselagem, nas asas e na cauda, onde instrumentos como Lidar (*Light Detection and Ranging*), Emissor de Longo Infravermelho para Espectroscopia da Atmosfera e Dispersômetro de Múltiplos Comprimentos de Onda para Aerossóis estão instalados. A aeronave tem uma grande reserva de energia elétrica para a instrumentação (60 KVA a 115 VAC, 400 Hz e 3 KW a 27,5 VDC). Parâmetros de voo, necessários para missões de pesquisa, são regularmente registrados pela aeronave e distribuídos para cada instrumento. Distâncias de pouso e decolagem são de menos de 1000 m, mas uma pista com pelo menos 2000 m é necessária para uma operação segura. Com seus dois motores e sistema de trem de pouso com formato triangular, o *Geophysica* é um projeto muito robusto e assim

pode operar em uma ampla gama de condições climáticas, tolerando ventos de no máximo  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

A carga de instrumentos a bordo do M-55 pode ser dividida de acordo com os tipos de medições (STEFANUTTI *et al.*, 1999): instrumentos para medição de aerossóis *in situ*, instrumentos de medição de aerossóis por sensoriamento remoto, instrumentos de química *in situ* e instrumentos de química por sensoriamento remoto.

### 2.3.1 INSTRUMENTOS PARA MEDIÇÃO DE AEROSSÓIS *IN SITU*

- *In-Situ Aerosol-Measurement System* (ARIAS): Fazem parte de um sistema integrado para aeronaves de pesquisa de grandes altitudes, constituído de um Dispersômetro de Múltiplos Comprimentos de Onda para Aerossóis (*Multiwavelength Aerosol Scatterometer* - MAS) e um contador óptico para medir a distribuição do tamanho de partículas *in situ* FSSP-300 (BAUMGARDNER; DYE; GANDRUD, 1989 *apud* STEFANUTTI *et al.*, 1999). A luz retroespalhada e sua despolarização medida pelo MAS pode ser interpretada em termos de forma de partículas e índice de refração, mas apenas se combinado com medidas do contador óptico de partículas. O índice de refração e a forma medida pelo dispersômetro são então utilizados como entrada para o contador óptico de partículas, em um procedimento iterativo que refina o índice de refração da partícula e a densidade pelo número medido. Durante o voo horizontal o sistema oferece uma resolução espacial de cerca de 2 km, dependendo da carga de aerossóis na estratosfera.

### 2.3.2 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE AEROSSÓIS POR SENSORIAMENTO REMOTO

- *Airborne Lidar Experiment* (ABLE): É um lidar de retroespalhamento com taxa de repetição de pulso de 10 Hz e 100 mJ de energia (FIOCCO *et al.*,

1997 *apud* STEFANUTTI *et al.*, 1999), dois geradores harmônicos adicionais podem ser usados para dobrar ou triplicar a frequência. Normas de segurança determinam quais frequências de luz podem ser usadas: se o laser é disparado para baixo em 355 *nm*, a densidade de energia ao atingir o solo é segura para o olho humano, se emitido para cima e de altitudes acima de 12 *km* (ou seja, acima do corredor de tráfego aéreo), a operação do laser também é segura (STEFANUTTI *et al.*, 1999).

- *Microjoule Airborne Lidar* (MAL): É um lidar com um diodo laser de microjoule (energia/ pulso 1  $\mu J/20$  *ns*) pulsante com 880 *nm* de comprimento de onda direcionado para cima com 10 *KHz* de taxa de repetição para medir uma faixa de 0 a 500 *m* de distância da aeronave. Essa faixa de distância não é coberta pelo lidar ABLE, que é desativado para evitar retorno de dispersão de faixas acima de 1 *Km*. O MAL mede retroespalhamento a partir de partículas e moléculas de aerossóis ao longo do caminho de propagação do seu pulso, o tempo de integração para cada ciclo de medidas depende da densidade da nuvem de aerossóis e do nível de ruído dos fótons. O sistema do *Geophysica* é um lidar de retrodispersão usando dois canais de recepção (STEFANUTTI *et al.*, 1999).

### 2.3.3 INSTRUMENTOS DE QUÍMICA *IN SITU*

- *Electrochemical Ozone Cell* (ECOC): É um medidor eletroquímico de ozônio e consiste em um amostrador de teflon com uma bomba, uma célula eletroquímica preenchida com uma solução aquosa de *KI* (Iodeto de Potássio) similar a usada em sondas de ozônio, e um sistema de gravação de dados. A medida limiar de sensibilidade do sistema não excede a 1 *ppb*. A constante de tempo é determinada pela inércia da célula eletroquímica, que é cerca de 30 *s*, isso corresponde a uma resolução horizontal de 4 a 5 *Km* por

medida feita durante um voo nivelado e uma resolução vertical de 300 m para medidas feitas durante a subida e a descida da aeronave.

- *Fast Ozone Analyzer (FOZAN)*: Utiliza a reação quimioluminescente entre ozônio e um sensor com corante no estado sólido. Para melhorar a sensibilidade do aparelho e a precisão de medição são feitas uma detecção digital síncrona e uma média de sinal de medição, tendo o instrumento no seu interior um gerador de ozônio calibrado. O FOZAN pode medir as concentrações de 10 a 10000 *ppbv*, em um período de tempo de 2 s, e se destina a dar informações sobre flutuações rápidas de ozônio que estão fora da média do sinal do ECOC.
- *Fluorescent Airborne Stratospheric Hygrometer (FLASH)* e *Aircraft Condensation Hygrometer (ACH)*: São um par de instrumentos de medição de vapor de água que foram projetados para medir a uma distância de 25 Km do solo. O Medidor de Ponto de Geadas (*Frost Point Hygrometer*) tem sua faixa de medição de 0 a 9 Km de altitude e o Higrômetro Óptico por Fluorescência (*Optical Fluorescent Hygrometer*) mede proporções de mistura de vapor de água a partir de 8 Km. O Higrômetro de Ponto de Geadas é baseado na técnica padrão de refrigeração de espelho. O Higrômetro Óptico por Fluorescência é baseado no princípio de fluorescência Lyman- $\alpha$ . A calibração frequente do FLASH é necessária e é fornecida em voo pelo ACH (STEFANUTTI *et al.*, 1999).

#### 2.3.4 INSTRUMENTOS DE QUÍMICA POR SENSORIAMENTO REMOTO

- *Spectroscopy of the Atmosphere using Far-Infrared Emission-Airborne (SAFIRE-A)*: É um espectrômetro por transformada de Fourier para observação do espectro de emissão atmosférica na região espectral do infravermelho longo (CARLI *et al.*, 1999 apud STEFANUTTI *et al.*, 1999).

O espectrômetro observa a atmosfera através de uma porta aberta, onde a direção de observação é controlada por um espelho de varredura. O SAFIRE é capaz de medir a distribuição vertical, a partir da tropopausa até a altitude de voo, e a coluna vertical acima da altitude de voo, dos constituintes menores estratosféricos que exibam algumas características no infravermelho longo. O sistema detector de base tem dois canais: o canal 1 realiza medidas de  $N_2O$  (Óxido Nitroso),  $O_3$  (Ozônio),  $ClO$  (Hipoclorito) e  $HNO_3$  (Ácido Nítrico); o canal 2 realiza medidas de  $HOCl$  (Ácido Hipocloroso),  $HCl$  (Ácido Clorídrico),  $H_2O$  (Água),  $O_3$  (Ozônio),  $HDO$  (Água Semi Pesada),  $HO_2$  (Superóxido de Hidrogênio). Uma medida é obtida a cada minuto, correspondendo a uma resolução de 12 km na direção do voo.

- *Gas Absorption Spectrometer Correlating Optical Differences-Airborne* (GASCOD-A): É um espectrômetro de absorção óptica diferencial, operando nas regiões ultravioleta e do espectro visível. Os gases traço observadas são  $O_3$  (Ozônio),  $NO_2$  (Óxido Nítrico),  $BrO$  (Hipobromito), e  $OCIO$  (Dióxido de Cloro). O tempo de resposta depende da intensidade da radiação, o tempo de integração mais adequado para cada leitura espectral é selecionado automaticamente e varia de frações de segundo em medições diretas para um valor máximo de 120 s no crepúsculo (STEFANUTTI *et al.*, 1999).

#### 2.4 HIGH-PERFORMANCE INSTRUMENTED AIRBORNE PLATFORM FOR ENVIRONMENTAL RESEARCH (HIAPER)

A plataforma de pesquisa HIAPER (*High-Performance Instrumented Airborne Platform for Environmental Research*) é operada em sistema de parceria entre a NSF (*National Science Foundation*) e a NCAR (*National Center for*

*Atmospheric Research*), sendo uma das plataformas de pesquisa de projeto mais recente operando no mundo, tendo início em 2002 e começando a operar em 2005. Laursen *et al.* (2006) fala que o HIAPER (Figura 8) está baseado em uma aeronave a jato bimotor turbofan Gulfstream V que tem a capacidade de voar até altitudes em torno de 15500 m, podendo realizar pesquisas na alta Troposfera, Tropopausa e baixa Estratosfera de latitudes médias.

Figura 8 - High-Performance Instrumented Airborne Platform for Environmental Research (HIAPER)



Fonte: Laursen *et al.* (2006)

Modificações feitas para preparar a estrutura do HIAPER para a pesquisa destinam-se a fornecer aos cientistas ambientais uma série de possibilidades para a implantação de instrumentos na aeronave. Casulos nas asas e outros sensores (destinados à física das nuvens ou sondas para aerossóis) podem ser montados em três pontos em cada asa. Há três portas de visão (uma para cima e duas para baixo) de grande diâmetro (52,1 cm) para fornecer aos pesquisadores oportunidades de

visualização de grande abertura e implantação de equipamentos de sensoriamento remoto. Numerosas placas de abertura e pontos localizados na parte superior e inferior da fuselagem foram projetados para instalação de entradas, antenas e outros pequenos instrumentos de acordo com as exigências de cada projeto (LAURSEN *et al.*, 2006).

No projeto HIPPO (HIAPER *Pole to Pole Observations*) V, realizado de 09 de agosto a 09 de setembro de 2011, no HIAPER estava instalada a instrumentação listada abaixo.

#### 2.4.1 INSTRUMENTOS DE TEMPERATURA E PRESSÃO ATMOSFÉRICAS E VELOCIDADE DO VENTO

Conhecidos também como Parâmetros de Estado estas medições são utilizadas pelos cientistas como informações de base para uma melhor compreensão das medições físicas que seus instrumentos coletam. Esses Parâmetros de Estado são utilizados em conjunto com os dados coletados pelos pesquisadores para fornecer o conjunto de medidas mais precisas possível. Medições de altitude, latitude, longitude, por exemplo, fornecem uma posição exata no espaço e tempo da medida específica de um gás traço. Os pesquisadores podem então inferir sobre as características físicas, químicas e espaciais da medição. O restante das variáveis são usadas também pelos pesquisadores para fazer correções ou ajustar seu conjunto de dados, dependendo das condições que o avião realize o experimento (HIPPO, 2011).

- *Microwave Temperature Profiler* (MTP): É um sistema remoto de detecção passiva que fornece a temperatura atmosférica acima e abaixo da aeronave. Os componentes básicos do MTP (Figura 9) são um receptor que mede emissão por moléculas de oxigênio em três frequências de microondas e um espelho de varredura, que vê a emissão em dez ângulos de elevação.

Figura 9 - *Microwave Temperature Profiler (MTP)*



Fonte: HIPPO (2011)

- *Inertial Reference System (IRS) Variables*: É usado para obter informações sobre a posição, velocidade, aceleração e altitude da aeronave.
- Variáveis do Sistema de Posicionamento Global: Sistema que oferece dados de posição da aeronave com precisão inferior a meio metro.
- Variáveis Meteorológicas e de Estado da Aeronave: As medidas são feitas em vários locais do avião. As medições do radome presentes estão baseadas em cinco orifícios com sondas de pressão diferencial de medição em forma de rajada com todos os transdutores de pressão localizados na área do nariz da aeronave e conectados aos buracos do radome por uma tubulação semi rígida. A medição de pressão estática é independente da medição dos sensores eletrônicos da aeronave e é adquirida em uma porta estática fisicamente diferente.
- Variáveis Termodinâmicas: São medidas de temperatura ambiente, pressão de vapor d'água, temperatura potencial, temperatura do ar seco, umidade relativa e razão de mistura.

#### 2.4.2 INSTRUMENTOS DE QUÍMICA DA ATMOSFERA

- Medidas de Oxigênio: Os instrumentos de oxigênio medem a concentração de  $O_2$  usando uma técnica de absorção ultravioleta a vácuo, esse equipamento foi projetado especificamente para uso em aeronaves, com o movimento e a sensibilidade térmica minimizados e com um sistema de pressão e fluxo de entrada controlados.
- Medidas de Monóxido de Carbono: O  $CO$  é detectado através de ressonância de fluorescência de ultravioleta, onde uma fonte emite ultravioleta fazendo o  $CO$  ficar fluorescente e a detecção é feita por contagem de fótons.
- Medidas de Dióxido de Carbono: As concentrações de  $CO_2$  são medidas usando uma fonte de luz, células de gás, e um detector de estado sólido feito a partir de um analisador infravermelho não dispersivo modificado.

#### 2.4.3 GRUPO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO DE GASES ATMOSFÉRICOS QUE INFLUENCIAM AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Essas medidas são feitas dividindo os gases em quatro grandes categorias, incluindo: gases de efeito estufa, isótopos de carbono, hidrocarbonetos halogenados e hidrocarbonetos.

- Gases de Efeito Estufa: O sistema consiste em entradas de gás em analisadores específicos e um sistema de controle por *software*. Os sistemas de entrada de gás de utilizam uma série de válvulas de seleção de fluxo para selecionar o frasco específico ou mistura de gases padrão para referência.

- Hidrocarbonetos Halogenados e Hidrocarbonetos: Mais de 50 tipos de hidrocarbonetos halogenados, hidrocarbonetos e gases contendo enxofre são medidos em vários pontos da aeronave. Os gases são medidos através de espectrometria de massa, que para ser realizada requer 200 ml de amostra de cada frasco coletor de gás.
- Isótopos de Carbono: Uma amostra de ar é recolhida e passa por diversos filtros para extrair o  $CO_2$ , depois disso o  $CO_2$  é submetido a um espectrômetro de massa de razão isotrópica e comparado com referências de trabalho.
- *Multiple Enclosure Device for Unfractionated Sampling of Air (MEDUSA)*: É um sistema para amostragem de ar que possui 64 linhas de tubulação flexível que faz comparações de amostras de gases *in situ*. O MEDUSA (Figura 10) tem um computador de bordo, dois controladores de pressão, duas bombas, válvulas seletoras de três posições, e uma série de outros equipamentos que controlam e direcionam as amostras de ar. Colhe e analisa amostras de  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $Ar/N_2$ ,  $^{13}CO_2$ ,  $C^{18}O^{16}O$ .

Figura 10 - *Multiple Enclosure Device for Unfractionated Sampling of Air (MEDUSA)*



Fonte: HIPPO (2011)

- *Whole Air Sampler (WAS)*: É um sistema semi automático que preenche garrafas com amostras de ar feitas a partir da parte inferior da fuselagem da aeronave. Posteriormente essas garrafas com amostra de gases são levadas para um laboratório para serem analisadas por uma variedade de instrumentos gerando dados para mais de 80 gases traço encontrados na atmosfera global. O amostrador é projetado para remover o excesso de vapor d'água do ar amostrado e comprimi-lo sem contaminação em frascos de vidro ou aço inoxidável de volume aproximado a 1 litro. O WAS monitora CFCs, HCFCs, HFCs, solventes, halogenetos de metila, nitratos orgânicos, hidrocarbonetos não metânicos, perflourocarbonos.
- *Medida de Ozônio*: As medidas são feitas *in situ* utilizando um fotômetro consistido de uma lâmpada de mercúrio, duas células de amostra que podem ser intercambiáveis e dois detectores que medem a radiação de 254 *nm* transmitida através de uma câmara.
- *Quantum Cascade Laser System (QCLS)*: O QLS (Figura 11) Realiza medidas simultâneas de concentração de CO, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O *in situ* utilizando dois lasers de cascata quântica termoeletricamente resfriados como fonte de luz, uma célula de absorção em vários passos e dois detectores de estado sólido resfriados a nitrogênio líquido.

Figura 11 - *Quantum Cascade Laser System (QCLS)*



Fonte: HIPPO (2011)

#### 2.4.4 INSTRUMENTOS DE PONTO DE ORVALHO, UMIDADE E VAPOR D'ÁGUA

- Ponto de Orvalho: Há duas sondas de pesquisa de ponto de orvalho localizado em ambos os lados, direito e esquerdo, abaixo e atrás do nariz da aeronave.
- PMS Sensor de Água Líquida (King): É usado principalmente para o estudo dos processos de Microfísica de Nuvens e em estudos de congelamento. Ele utiliza um fio aquecido para medir o conteúdo de água líquida. Este instrumento é relativamente simples e preciso para o maior teor de água líquida, no entanto, a precisão é diminuída em baixas medidas de água líquida. Sendo dependente da velocidade, temperatura e pressão. Gotículas entre 5 a 40 *mm* de diâmetro são eficientemente amostradas.
- *Raw Icing-Rate Indicator (RICE)*: É uma sonda constituída por um conjunto hastes que vibram um cristal piezoelétrico. A frequência de oscilação da

sonda muda de acordo com carga a de gelo. Quando a sonda está carregada até um certo ponto a haste é aquecida para remover o gelo. Sua tensão de saída é proporcional à massa de gelo acrescida.

- Temperatura Total: É à saída da temperatura de recuperação a partir de um sensor de temperatura calibrado.
- *Vertical Cavity Surface Emitting Laser Hygrometer (VCSEL)*: Mede a concentração de vapor d'água em toda a troposfera e na baixa estratosfera em alta frequência (25 vezes por segundo). A ampla faixa dinâmica do VCSEL é particularmente bem adequada para HIPPO Global, onde os ambientes vão desde a camada de ar quente e úmido marinha do limite dos trópicos até a estratosfera fria e seca das regiões polares.

#### 2.4.5 INSTRUMENTOS DE AEROSSÓIS E FÍSICA DE NUVENS

- *Cloud Droplet Probe (CDP)*: É uma miniatura leve e de baixa potência de um espectrômetro de partículas de nuvens (Figura 12), que mede gotículas na faixa de 2 a 50  $\mu m$  em concentrações tão elevadas quanto 2000 partículas /  $cm^3$ .

Figura 12 - CDP instalada no HIAPER



Fonte: HIPPO (2011)

- *Single Particle Soot Photometer (SP2)*: É um instrumento que mede diretamente o carbono negro, conhecido como fuligem, medindo as partículas de aerossóis de forma individual. A alta sensibilidade, resposta rápida, e especificidade do carbono elementar o torna um instrumento para a caracterização de fontes de poluição e fuligem em neve, gelo ou água, realizando uma documentação fina da contaminação das camadas atmosféricas.
- *Two Dimensional Cloud Probe (2D-C)*: É uma PMS (Figura 13) desenvolvida para a medição de tamanho de gotas de nuvens. É usada principalmente para o estudo dos processos microfísicos, especialmente o crescimento de gotas de nuvem e cristais de gelo por agregação ou coalescência, em garoa, gotas de chuva, graupel ou outras formas de precipitação.

Figura 13 - *Two Dimensional Cloud Probe (2D-C)* instalada no HIAPER



Fonte: HIPPO (2011)

- *Ultra-High Sensitivity Aerosol Spectrometer (UHSAS)*: O espectro de partículas medido por essa sonda (Figura 14) cobre uma faixa de tamanho

aproximado de 0,05 a 1 *mm* de diâmetro. A sonda funciona com 4 estágios de amplificação, e produz espectros contínuos de partículas.

Figura 14 - *Ultra-High Sensitivity Aerosol Spectrometer* (UHSAS) instalado no HIAPER



Fonte: HIPPO (2011)

## 2.5 ULTRALEVE DE PESQUISA

Plataformas de pesquisa não necessariamente precisam ser montadas em aeronaves robustas como as plataformas descritas em Johnson e Smith (1980), Larsen *et al.* (1991) e Stefanutti *et al.* (1999). Dependendo do tipo de pesquisa que deseja-se realizar, pode ser adotada uma aeronave de pequeno porte como plataforma, assim como a aeronave ultraleve descrita em Junkermann (2001).

Junkermann (2001) relata que a plataforma baseada no ultraleve (Figura 15) possui um sistema para medir radiação e outros parâmetros atmosféricos.

Figura 15 - Plataforma de pesquisa atmosférica montada em aeronave ultraleve



Fonte: Junkermann (2011)

A radiação actínica é medida com base no design descrito em Junkermann, Platt e Thomas (*apud* JUNKERMANN, 2001), que se baseia em um conjunto de sensores que medem a radiação ascendente e descendente, e radiação global com dois piranômetros, para cima e para baixo. Há também a instrumentação para caracterização das propriedades ópticas, tamanho, e coeficiente de dispersão dos aerossóis, assim como do ozônio, que reduz parcialmente a radiação ultravioleta na baixa troposfera. As respectivas condições meteorológicas da atmosfera, na distribuição da nuvem particular, a cobertura do solo, etc., são registradas por um conjunto de câmeras reunindo imagens digitais em ambas as direções, horizontal e vertical.

A aeronave ultraleve foi escolhida porque oferece propriedades únicas como velocidade horizontal baixa e bom desempenho em subidas para medições de perfis verticais. Perfis de até 4500 m podem ser feitos em menos que uma hora e, assim, permitem uma comparação direta com cálculos dos modelos atmosféricos

para um determinado tempo e lugar. Dados da aeronave podem ser auxiliados por imagens de câmeras digitais em bases terrestres fazendo medições de profundidade óptica de aerossóis em 340 e 500 nm, caso a área de sondagem vertical esteja perto de uma estação meteorológica terrestre adequada (JUNKERMANN, 2001).

A instrumentação da aeronave é semelhante a descrita em Junkermann (*apud* JUNKERMANN, 2001), contendo um conjunto de quatro sensores fotoelétricos para radiação actínia com campo de visão uniforme de  $2\pi$  e de diferentes sensibilidades espectrais, combinando com a fotólise do ozônio de  $300 \pm 3$  nm ( $J_{O_3}$ ) e de  $NO_2$  de  $380 \pm 20$  nm ( $JNO_2$ ) (JUNKERMANN; PLATT; THOMAS, 1989 *apud* JUNKERMANN, 2001). Dois pares de sensores hemisféricos de mesma sensibilidade para cobrir a radiação ascendente e descendente, onde a soma dos dados dos sensores de fluxo ascendente e descendente fornece a radiação actínia total em torno da aeronave (JUNKERMANN, 1994). Os sensores que medem as quantidades de radiação podem ser calibrados por radiometria ou por actnometria química. Sensores de radiação adicionais (piranômetros tipo LI 2000 SZ e LI-COR Inc.) foram instalados direcionados para cima e para baixo para medir a radiação total por entrada de luz cosseno-dependente. Este conjunto de sensores de radiação permite que se tenham medidas em todas as elevações durante o voo e a estimativa do albedo do solo e das nuvens.

No painel com os sensores de fluxo de radiação ascendente são incluídos instrumentos adicionais como um fotômetro de ozônio para absorção de ultravioleta, um contador de partículas para partículas com diâmetro acima de 0,3 ou 0,5  $\mu m$ , um sensor para medir coeficiente de dispersão e visibilidade, um medidor de temperatura de alta velocidade, espelho de ponto de orvalho, uma bússola digital, um sistema de aquisição de dados e duas câmeras digitais.

A distribuição de tamanhos de partículas de aerossóis é medida com uma FSSP-100, que mede partículas e gotículas com tamanhos de 0,5 a 47  $\mu m$ , especialmente modificada pelo fabricante para medir na baixa taxa de velocidade da aeronave, 20 a 30  $m \cdot s^{-1}$ . Sendo a sonda normalmente usada um modo de medição

de partículas entre 5 a 8  $\mu m$  em 20 canais de distribuição, tendo nesse modo algumas limitações quanto às medições, mas se mostrou uma ferramenta adequada para caracterização de partículas.

O sistema da aeronave possui também uma unidade para aquisição e gravação de dados de pressão, radiação descendente e do GPS, tais como posição de acordo com o tempo, trajetória e velocidade da aeronave, e também realiza cálculos de velocidade do vento, temperatura potencial, posição do sol, etc.

Apesar de o ultraleve ser uma boa plataforma de pesquisa a aeronave oferece algumas limitações, sendo as principais delas: restrições de voo por causa das regras visuais de voo, proibição quanto a voos dentro de nuvens para medir tamanhos de gotas e radiação e velocidade de voo horizontal limitada de cerca de 80  $Kmh^{-1}$  (JUNKERMANN, 2001).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O Avião Laboratório para Pesquisas Atmosféricas (ALPA), mostrado na Figura 16, é uma plataforma de pesquisa destinada à aquisição de dados meteorológicos em voo na região da baixa troposfera. A instrumentação embarcada é particularmente voltada para pesquisas em Microfísica de Nuvens, embora esteja em condições de realizar pesquisas em outras áreas das Ciências Atmosféricas. O ALPA está baseado em uma aeronave BANDEIRANTE de modelo EMB 110-P1, onde os instrumentos nele instalados permitem a aquisição e processamento de dados, que são armazenados em microcomputadores embarcados e depois descarregados e analisados nas unidades de pesquisas em solo.

Figura 16 - Fotografia da Plataforma de pesquisa ALPA



Fonte: Oliveira (1998)

O BANDEIRANTE EMB 110-P1 é uma aeronave bimotor turboélice não pressurizada que na configuração normal tem capacidade para transportar vinte e um ocupantes. Na configuração normal para transporte de passageiros o BANDEIRANTE EMB 110-P1 segue os parâmetros listados na Tabela 1 (OLIVEIRA, 1998).

Tabela 1 - Configuração da aeronave BANDEIRANTE EMB 110 para transporte de passageiros

<b>Item</b>	<b>Discriminação</b>	<b>Características</b>
Motor	Turboélice <i>Pratt and Whitney</i>	02
Energia	(DC) Corrente Contínua	28 V
	Frequência	60 Hz
	(AC) Corrente Alternada	110 V
	Frequência	400 Hz
Dimensões	Largura	15,32 m (50.25 ft)
	Comprimento	14,59 m (47.87 ft)
	Altura	5,04 m (16.54 ft)
Teto de Voo	Sem Oxigênio	3000 m (10000 ft)
	Com Oxigênio	7500 m (25000 ft)
Velocidade Limite	Mínima	60 $m \cdot s^{-1}$
	Máxima	120 $m \cdot s^{-1}$
Tripulação Mínima	VRF ( <i>visual flight rules</i> )	01
	IRF ( <i>instrument flight rules</i> )	02
Autonomia de Voo	Com Tripulação e Passageiros	2h 43min
	Só com Tripulação	3h 30min

Fonte: Oliveira (1998)

A Tabela 2 mostra a aeronave na configuração ALPA, tendo as características de tripulação e autonomia de voo alteradas, onde sua velocidade típica para experimentos é de 80  $m \cdot s^{-1}$  (OLIVEIRA, 1998).

Tabela 2 - BANDEIRANTE EMB 110 na configuração de aeronave de pesquisa (ALPA)

<b>Item</b>	<b>Discriminação</b>	<b>Características</b>
Tripulação Científica	Mínima	02 (01 Técnico e 01 Pesquisador)
	Máxima	04 (01 Técnico e 03 Pesquisadores)
Autonomia Máxima de Voo para Pesquisa	Com Tripulação Mínima	3h 30min
	Com Tripulação Máxima	3h

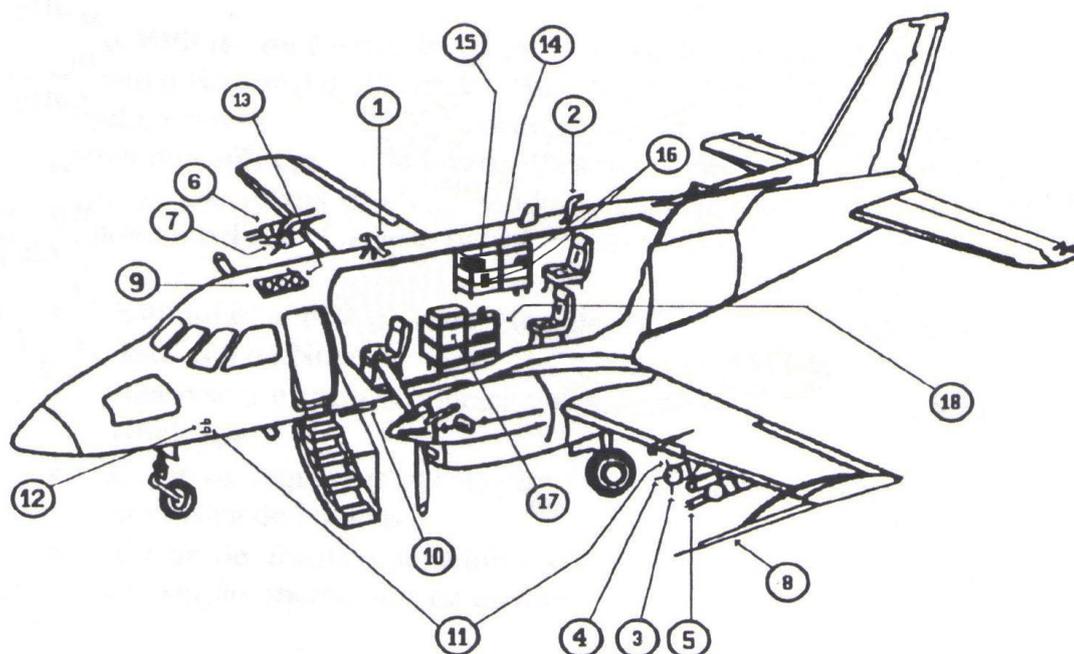
Fonte: Oliveira (1998)

Os diversos instrumentos instalados na plataforma ALPA permitem a obtenção em voo dos seguintes dados:

- Tempo (ano, mês, dia, hora, minuto e segundo);
- Temperatura do ar;
- Temperatura de ponto de orvalho e umidade relativa do ar;
- Pressão atmosférica (pressão absoluta);
- Pressão diferencial;
- Conteúdo de água líquida de nuvens;
- Concentração de núcleos de condensação de nuvens;
- Espectro de gotas de nuvens;
- Espectro de hidrometeoros;
- Intensidade de radiação solar de ondas curtas (visível);
- Intensidade de radiação solar de ondas curtas refletidas pela terra;
- Parâmetros de navegação (altitude, latitude, longitude).

A localização de cada um dos equipamentos instalados na aeronave de pesquisa, de acordo com o projeto original, segue o seguinte esquema mostrado na Figura 17:

Figura 17 - Localização dos instrumentos na plataforma ALPA



Fonte: Adaptado de Oliveira (1998)

- (1) Entrada de ar para o CCNC;
- (2) Saída de ar para o CCNC;
- (3) Sensor de conteúdo de água líquida Johnson Williams;
- (4) Sensor de conteúdo de água líquida CSIRO King;
- (5) Contador de gotículas de nuvens FSSP;
- (6) Contador de gotas de nuvens OAP-200X;
- (7) Contador de gotas de nuvens OAP-200Y;
- (8) Medidor de pressão dinâmica e estática Tubo de Pitot;
- (9) Piranômetros superiores;
- (10) Piranômetros inferiores;
- (11) Sensor de temperatura total;
- (12) Sensor de temperatura de ponto de orvalho;
- (13) Receptor do GPS e antena;

- (14) Rack do pesquisador;
- (15) Contador de Núcleos de Condensação de Nuvens (CCNC);
- (16) Microcomputadores;
- (17) Rack do técnico;
- (18) Sistema de Aquisição de Dados (DAS).

Atualmente o ALPA só trabalha com parte dos instrumentos do projeto original, porém, pela versatilidade quanto a montagem e desmontagem de sua instrumentação, é possível que o ALPA retorne à configuração do projeto original ou até mesmo que sejam instalados novos instrumentos, sendo passível de modificações de acordo com a linha de pesquisa que se deseja aplicar essa plataforma.

Os instrumentos instalados atualmente no ALPA são responsáveis por fornecer os seguintes dados: Parâmetros do Avião e do Ambiente, Parâmetros Termodinâmicos, Parâmetros de Microfísica de Nuvens e Parâmetros de Navegação.

### 3.1 PARÂMETROS DO AVIÃO E DO AMBIENTE

São parâmetros medidos a partir de sensores próprios da aeronave que estão instalados nas asas e na fuselagem.

- \* Pressão Estática ( $p_s$ ): As medidas são obtidas através de uma porta de Pressão Estática embutida na fuselagem estando conectada a um transdutor de pressão absoluta do tipo capacitivo que utiliza um diafragma ligado a um circuito medidor de capacitância;

- \* Pressão Dinâmica ( $q_s$ ): As medidas são realizadas por um Tubo de Pitot em relação a porta estática, sendo a Pressão Dinâmica obtida pela diferença entre a pressão do Tubo de Pitot e a Pressão Estática;
- \* Temperatura Total ( $T_t$ ): É obtida a partir de um elemento resistivo de platina que fica exposto ao fluxo de ar externo. Essa temperatura deve ser corrigida do resfriamento dinâmico;
- \* Temperatura Ambiente ( $T_a$ ): É a temperatura do ar em repouso, que é calculada a partir da Temperatura Total e de considerações de resfriamento dinâmico usando o princípio da conservação de energia por um gás perfeito sofrendo um processo de compressão adiabática desacelerado. Sendo

$$T_a = T_r - \frac{u_a^2}{2c_p}, \quad (1)$$

onde  $T_r$  é chamado de Temperatura de Recuperação,  $u_a$  é a velocidade da aeronave relativa ao solo e  $c_p$  é o calor específico do ar seco a pressão constante;

- \* Temperatura de Recuperação: Em geral, os sensores de temperatura não medem a Temperatura Total ( $T_t$ ), medem a temperatura do ar imediatamente em contato com o elemento sensível, esse ar não sofre desaceleração adiabática até o repouso e, portanto, apresenta uma temperatura ligeiramente menor que a Temperatura Total. A Temperatura de Recuperação ( $T_r$ ) é obtida de considerações de conservação de energia para um gás perfeito em processo adiabático, expressa por

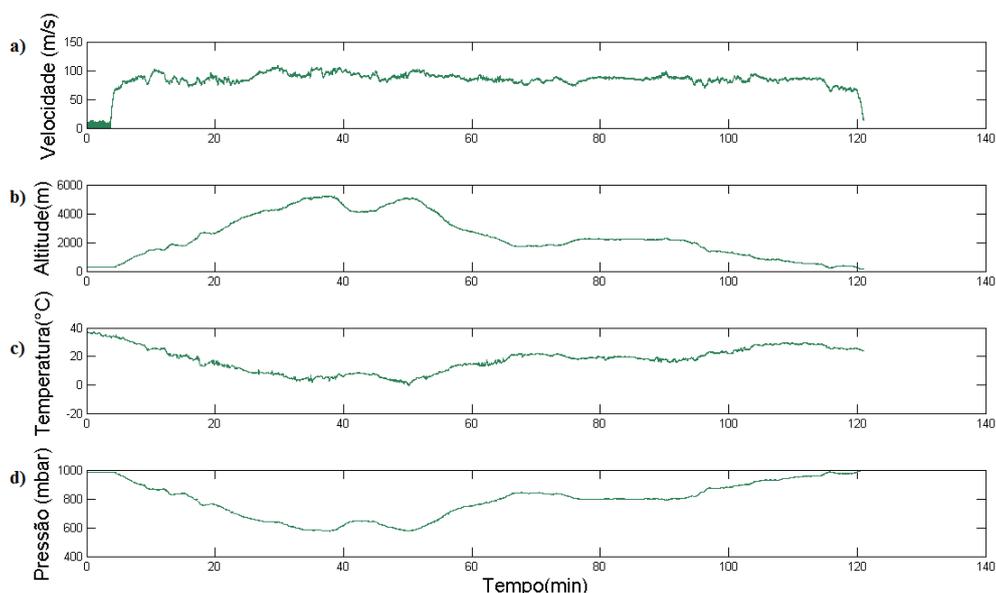
$$r = \frac{(T_r - T_a)}{(T_t - T_a)}, \quad (2)$$

onde  $r$  é chamado de "fator de recuperação" e é determinado em experiências de túneis de vento (OLIVEIRA, 1998);

- \* Temperatura de Ponto de Orvalho ( $T_{po}$ ): É a temperatura na qual ocorreria a saturação do ar atmosférico por vapor d'água se este ar fosse resfriado à pressão constante sem adição ou remoção de vapor d'água. Esta temperatura é medida por um hidrômetro que funciona com uma pequena fonte de luz emitida sobre um espelho resfriado que a reflete para um fotodetector de modo que a quantidade de luz detectada determina a taxa de resfriamento, assim o vapor d'água contido no ar condensa em contato com o espelho diminuindo a quantidade de luz detectada até atingir um ponto de equilíbrio. Quando isso ocorre a temperatura do espelho é a Temperatura de Ponto de orvalho.

Alguns Parâmetros do Avião e do Ambiente obtidos pelo ALPA são exemplificados na Figura 18 que mostra gráficos de medidas feitas em Ji Paraná - RO, no dia 28/09/2002.

Figura 18 - Gráficos de velocidade da aeronave, altitude, temperatura e pressão estática de acordo com o tempo de voo



Fonte: Rodrigues (2011)

A Figura 18 mostra o que já é conhecido por quem estuda os tipos de parâmetros mostrados nos gráficos. Nota-se que há um decréscimo na temperatura e na pressão estática de acordo com o aumento da altitude da aeronave e que seus máximos coincidem quando a altitude da aeronave é mínima, ou seja, quando ela está no solo ou próximo dele, levando em conta se os equipamentos foram ligados em solo ou somente depois da decolagem. Podendo observar também que durante as medições a aeronave tenta se estabilizar em uma velocidade constante de  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 3.2 PARÂMETROS TERMODINÂMICOS

Entende-se por parâmetros termodinâmicos aqueles que envolvem medidas de trocas de calor e trabalho entre massas de ar atmosférico.

Uma amostra de ar úmido de massa  $m$  encerrada num volume  $V$  e sob pressão  $p$  é constituída de uma massa  $m_{va}$  de vapor d'água, e de uma massa  $m_{vs}$  de ar seco que compreende todos os outros constituintes da amostra ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , etc.), exceto vapor d'água (OLIVEIRA, 1998). A massa da amostra é, portanto, dada por

$$m = m_{va} + m_{vs}, \quad (3)$$

- \* Pressão de Vapor D'água ( $e_{va}$ ): Pela lei de Dalton a pressão total de uma mistura de gases (perfeitos) é igual à soma das pressões parciais dos seus constituintes. Por pressão parcial entende-se a pressão que o constituinte gasoso exerceria se ocupasse sozinho todo o volume da mistura à mesma temperatura que esta. Como a amostra de ar úmido é considerada como uma mistura de dois constituintes, vapor d'água e ar seco pode-se então escrever que

$$p = e_{va} + p_{vs}, \quad (4)$$

onde  $p$  é a pressão atmosférica,  $e_{va}$  é a pressão parcial do vapor d'água e  $p_{vs}$  é a pressão parcial do vapor seco (OLIVEIRA, 1998);

- \* Temperatura Equivalente ( $T_e$ ): É definida como a temperatura que uma amostra de ar úmido atingiria se toda a umidade do ar condensasse a pressão constante, assim

$$T_e = T_a + L \frac{r_m}{c_p}, \quad (5)$$

onde  $T_a$  é a temperatura ambiente,  $L$  é o calor de vaporização,  $r_m$  é a razão de mistura e  $c_p$  é o calor específico à pressão constante (OLIVEIRA, 1998);

- \* Temperatura Potencial ( $\theta$ ): É a temperatura que uma parcela de ar teria em um nível de pressão  $p_s$  à temperatura  $T_a$  qualquer da atmosfera, se ela fosse levada deste nível até o nível de pressão padrão  $p_o$ , por um processo adiabático seco. A expressão matemática é dada por (ROGERS; YAU, 1989 apud OLIVEIRA, 1998)

$$\theta = T_a \left( \frac{p_o}{p_s} \right)^{\frac{R}{c_p}}, \quad (6)$$

onde  $p_o = 1000 \text{ hPs}$  é a pressão e  $R$  é a constante de gás para o ar seco;

- \* Temperatura Potencial Equivalente ( $\theta_e$ ): É a temperatura que uma parcela de ar teria se ela fosse levada de sua temperatura equivalente  $T_e$  até o nível de pressão padrão  $p_o$ , por um processo adiabático seco. A expressão matemática é dada por (BOLTON, 1980 apud OLIVEIRA, 1998)

$$\theta_e = \theta \exp \left\{ \left[ \left( \frac{3,376}{T_{nca}} \right) - 0,00254 \right] \left[ r_m \left( 1 + 0,81 \times 10^{-3} \right) \right] \right\}, \quad (7)$$

onde  $\theta$  é a temperatura potencial, em  $K$ ,  $T_{nca}$  é a temperatura do nível de condensação ascendente, em  $K$ , dada por

$$T_{nca} = \left\{ \left[ \frac{2840}{(3,5 - \ln e_{va} - 4,805)} \right] + 55 \right\}, \quad (8)$$

sendo  $\ln$  o logaritmo neperiano,  $T_a$  a temperatura ambiente em  $K$ ,  $e_{va}$  a pressão de vapor d'água em  $mb$  e  $r_m$  a razão de mistura medida em grama por quilograma ( $g \cdot Kg^{-1}$ );

- \* Umidade Absoluta ou Densidade de Vapor D'água ( $\rho_{va}$ ): É definida como massa específica do vapor d'água na atmosfera, ou seja, a massa de vapor d'água contida na unidade de volume de ar. A expressão matemática usada, obtida a partir de definição, é dada por

$$\rho_m = \frac{10^6 e_v M_a}{R_a T_a}, \quad (9)$$

onde o fator  $10^6$  é para que  $\rho_{va}$  seja medida em grama por metro cúbico ( $g \cdot m^{-3}$ ),  $e_v$  é a pressão do vapor com respeito a uma superfície plana de água,  $M_a$  é a massa molecular da água,  $R_o$  é a constante universal dos gases e  $T_a$  é a temperatura ambiente em  $K$  (OLIVEIRA, 1998);

- \* Umidade Relativa ( $U_r$ ): É definida como a relação entre a razão de mistura observada e aquela que prevaleceria em condições saturadas, à mesma temperatura. Expressa em porcentagem, a expressão matemática usada, obtida por definição é dada por

$$U_r = \frac{e_{va}}{e_s} \times 100\%, \quad (10)$$

onde  $e_{va}$  é a pressão de vapor d'água na atmosfera e  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor d'água;

- \* Razão de Mistura ( $r_m$ ): Expressa em  $g \cdot Km^{-1}$ , é definida como massa de vapor d'água por unidade de massa de ar seco. A expressão matemática usada é dada por

$$r_m = 622 \frac{e_{va}}{p_s - e_{va}}, \quad (11)$$

onde  $e_{va}$  é a pressão de vapor d'água na atmosfera,  $p_s$  é a pressão estática, e o fator 622 é mil vezes a razão entre o peso molecular do vapor d'água e do ar seco.

### 3.3 PARÂMETROS DE MICROFÍSICA DE NUVENS

Entende-se por Parâmetros de Microfísica Nuvens (ou simplesmente parâmetros microfísicos) aquelas quantidades que descrevem particularidades microscópicas da natureza da nuvem, e que, portanto, devem ser amostradas diretamente dentro das nuvens.

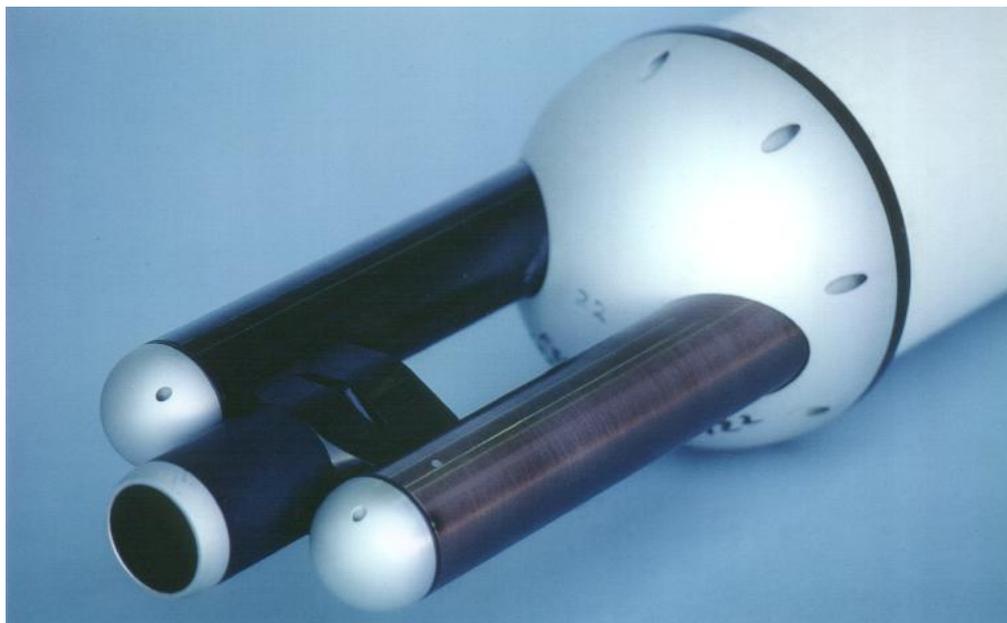
As medidas de parâmetros microfísicos - concentração e tamanho de gotículas, conteúdo de água líquida, concentração e tamanho de gotas de chuva, por exemplo - são difíceis de serem realizadas devido, principalmente, ao grande intervalo de tamanhos, formas e concentrações encontradas nos vários tipos de nuvens e condições atmosféricas (OLIVEIRA, 1998).

No ALPA as medidas dos parâmetros microfísicos são por sondas espectrométricas, contador de água líquida e contador de núcleos de condensação nele instalados. Assim os instrumentos utilizados para obter os parâmetros microfísicos são:

- \* Sonda Espectrométrica de Pró-Espalhamento (FSSP): Tem sua descrição de forma extensa em Knollenberg (1981), Dye e Baumgardner (1984) e Baumgardner, Strapp e Dye (1985), onde tem sido muito usada por pesquisadores para estudar gotículas de nuvens e distribuição de aerossóis. A

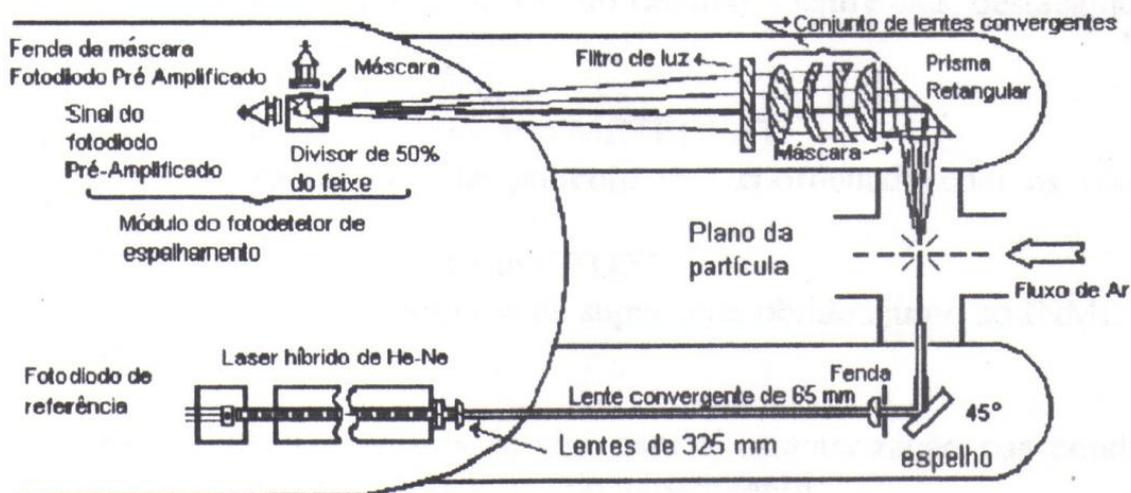
FSSP (Figura 19) mede tamanhos de gotículas de 2 a 50  $mm$ , sendo que para realizar as medições é empregada a Teoria de Espalhamento Luminoso de Mie. Seu princípio de funcionamento consiste na gotícula atravessar um feixe laser de 0,2  $mm$  de diâmetro causando um espalhamento luminoso, onde a luz espalhada passa por um conjunto de lentes para ser mais à frente captada por um conjunto de fotodiodos, que posteriormente, com a luz captada, é dado o tamanho da gotícula que atravessou o feixe, o percurso do laser antes e depois do espalhamento e o arranjo óptico da FSSP é mostrado na Figura 20.

Figura 19 - Sonda Espectrométrica de Pró-Espalhamento (FSSP)



Fonte: Inc. (1997a)

Figura 20 - Percurso do laser antes e depois do espalhamento luminoso e esquema do arranjo óptico da FSSP



Fonte: Adaptado (BAUMGARDNER, D.; STRAPP, W.; DYE, J. E., 1985 apud OLIVEIRA, 1998)

A FSSP possui, na sua parte posterior, um cilindro responsável pela passagem do fluxo de ar, onde o laser atravessa na linha que corresponde ao seu diâmetro. Consequentemente se a gotícula passar no centro do cilindro ela estará cortando o feixe luminoso ao meio e a leitura de tamanho dessa gotícula só será válida caso isso aconteça. Para que não haja captação de luz pelos fotodiodos quando não houver passagem de gotículas foi colocada uma pequena máscara com o formato circular no centro da face do prisma responsável por captar a luz logo após o espalhamento. Com isso, caso não esteja havendo espalhamento luminoso o feixe estará atingindo a máscara diretamente, impedindo que a luz chegue aos fotodiodos responsáveis pela medição. Caso o laser seja atravessado pela gotícula o espalhamento fará com que o diâmetro do feixe pró-espalhado seja maior que o diâmetro da máscara, fazendo com que a luz chegue aos fotodiodos.

Para que o sistema da sonda saiba que uma leitura de tamanho de gotícula seja válida, caso a gotícula passe exatamente no centro do feixe luminoso, depois da luz passar pelo prisma e pelo conjunto de lentes ela chega a um componente chamado *beam splitter* que divide o feixe em 50% para um sensor chamado *annulus* e 50% para um sensor chamado *signal*.

O funcionamento do *annulus* consiste em uma máscara posicionada na lateral do *beam splitter* que tem a função de impedir que a luz chegue aos seus fotodiodos caso a gotícula passe pelo feixe na posição correta, caso isso não aconteça a luz é desviada da máscara atingindo os seus fotodiodos e anulando a leitura do *signal*. Com as leituras da FSSP é possível encontrar a concentração de gotículas por unidade de volume ( $N$ ), expresso em  $n^\circ cm^{-3}$ , diâmetro médio das gotículas ( $D_m$ ), expresso em mm e conteúdo de água líquida (LWC - *Liquid Water Content*), expresso em  $g \cdot cm^{-3}$ , calculados pelas expressões

$$N = \sum_{i=1}^{i=x} \frac{n_i}{V}, \quad (12)$$

$$D_m = \sum_{x=1}^{i=x} \frac{n_i d_i}{N}, \quad (13)$$

$$LWC = \frac{\pi}{6} \rho \sum_{i=1}^{i=x} \frac{n_i d_i^3}{V}, \quad (14)$$

onde  $x$  é o número de canais adotados para operarem na sonda,  $n_i$  é o número de gotículas detectadas pelo canal  $i$ ,  $d_i$  é o diâmetro das gotículas medido pelo canal  $i$ ,  $V$  é o volume de amostragem e  $\rho$  é a densidade da água, que é igual a  $1000 \text{ Kg} \cdot m^{-3}$ .

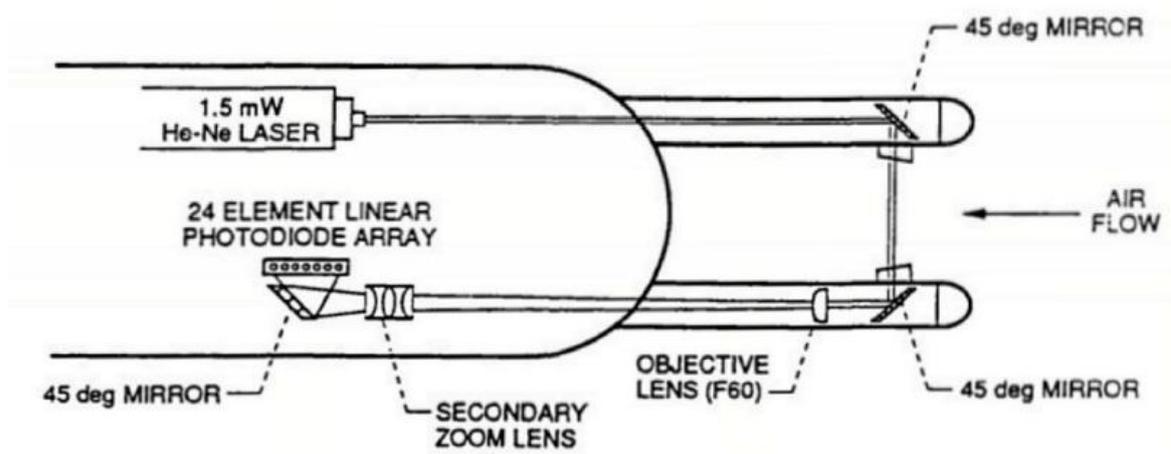
- \* Sondas Espectrométricas 200-X e 200-Y (OAP 200-X e OAP 200-Y): As OAP (*Optical Array Probe*) 200-X e 200-Y guardam algumas semelhanças com a FSSP no que diz respeito à classificação de gotículas, no caso da 200-X e 200-Y gotas, em categorias pelo sistema óptico, porém, ao invés de espalhamento, essas sondas medem o tamanho das gotas através do sombreamento dos seus fotodiodos quando a gota corta o laser que os ilumina. Tanto a estrutura óptica quanto o sistema de medições são idênticos nas duas sondas, mudando apenas o intervalo de tamanho que elas medem. A OAP 200-X tem a capacidade de medir e classificar gotas no intervalo de 20 a 300  $\mu m$  de diâmetro, enquanto a OAP 200-Y mede e classifica gotas no intervalo de 300  $\mu m$  a 4 mm de diâmetro. A Figura 21 mostra as duas sondas, 200-X e 200-Y instaladas sob a asa da plataforma ALPA e a Figura 22 mostra o arranjo óptico da OAP-200X, tendo a OAP-200Y engenharia semelhante.

Figura 21 - OAP-200Y (em primeiro plano) e OAP 200-X (em segundo plano) instaladas na plataforma ALPA



Fonte: IFRONLINE (2009)

Figura 22 - Figura 22 – Arranjo óptico da OAP-200X



Fonte: Oldenburg e Ide (1990)

Os parâmetros microfísicos obtidos pelas sondas 200-X e 200-Y são calculados usando as mesmas expressões matemáticas para os parâmetros obtidos pela FSSP.

- \* CSIRO-King: Desenvolvida pela *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) é uma sonda responsável por medir conteúdo de água líquida usando como elemento sensor um fio de cobre fino enrolado em um tubo de 1,5 mm de diâmetro com 8 cm de comprimento, que é montado entre duas pontas e transversal à passagem de ar. O fio é

mantido a uma temperatura constante a cerca de  $100^{\circ} C$ , aquecido através de um circuito eletrônico. As gotas de água das nuvens incidem sobre o fio aquecido e o resfriam, provocando um aumento na corrente elétrica fornecida ao fio para manter a temperatura programada. O aumento da corrente é diretamente proporcional ao conteúdo de água líquida da amostra de ar, sendo as medidas expressas em  $gm^{-3}$ . O sensor do CSIRO-King é mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Sensor da sonda SCIRO-King

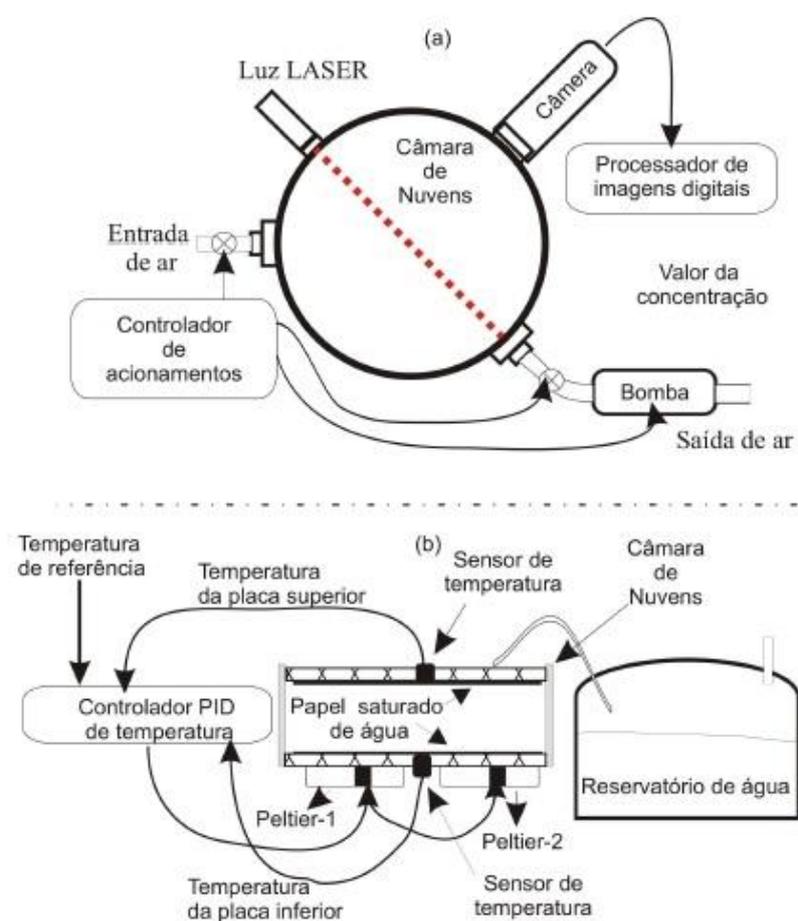


Fonte: Inc. (1997b)

- \* Contador de Núcleos de Condensação de Nuvens (CCNC): O princípio de funcionamento é baseado na Câmara de Wilson, uma câmara supersaturada. Os aerossóis menores que  $0,5 \mu m$  são difíceis de detectar, pois o tamanho minúsculo desfavorece o espalhamento de luz. O ambiente supersaturado da câmara de vapor d'água propicia a formação de gotícula. O aerossol que tem afinidade por água é, com certeza, um NCN que revestido ou diluído em água é detectável opticometricamente por espalhamento Mie-Lorenz (WILSON, 1911 *apud* RODRIGUES, 2011).

O CCNC utilizado na Plataforma ALPA foi desenvolvido pelo Prof. Dr. Francisco Geraldo de Melo Pinheiro, da Universidade Estadual do Ceará. Sendo um contador estático, mais compacto e leve que seus antecessores, nomeado CCNC-SDCC que significa CCNC-Câmara de Difusão Estática (*Static Difusion Cloud Chamber*) (RODRIGUES, 2011). A Figura 24 mostra diagrama esquemático do CCNC-SDCC.

Figura 24 - Figura 24 – Diagrama de blocos do CCNC-SDCC



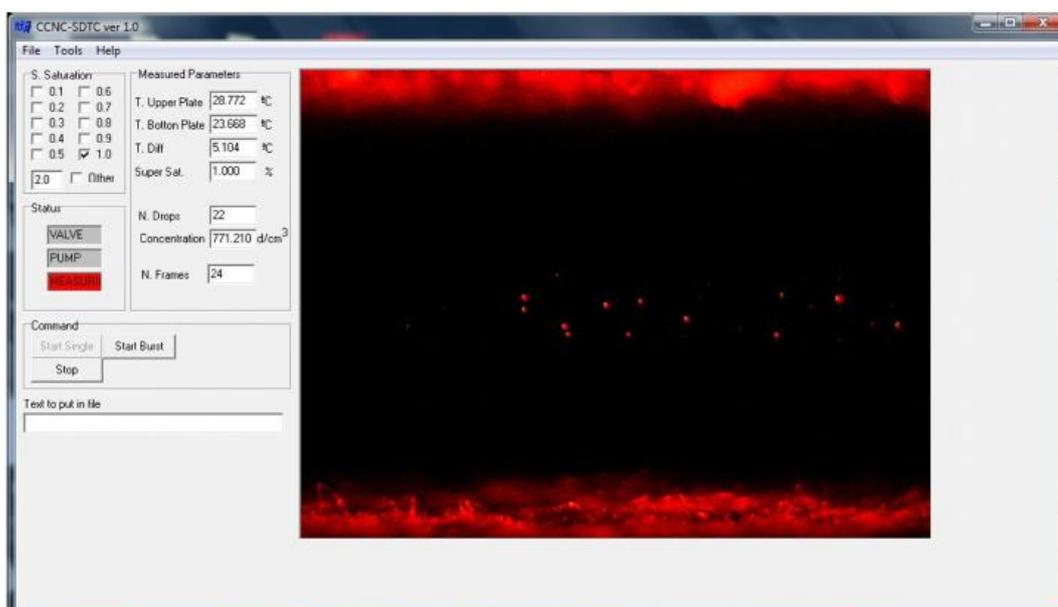
Fonte: Pinheiro (2011)

A vista lateral da Figura 24 esquematiza como o ambiente no interior da câmara é mantido supersaturado. A supersaturação é condicionada por um gradiente de temperatura entre duas placas com superfícies de papel saturado de água. A temperatura, por sua vez, é controlada por duas Pastilhas de Peltier. E a umidade é

fornecida por um reservatório de água. Na vista superior, uma bomba retira o ar da câmara reduzindo a pressão em seu interior. O controle de acionamento permite a entrada de ar a ser analisado. O ambiente supersaturado promove a condensação de gotículas sobre os NCNs. Ao atravessarem o feixe do laser, espalham luz que é captada por um CCD (Dispositivo Acoplado de Carga - *Charge Coupled Device*), que converte as intensidades de luz que incidem sobre ele em valores digitais armazenáveis (PINHEIRO, 2011).

As informações são enviadas a um computador e processadas pelo software CCNC-SDCC (versão 1.0). A interface gráfica do software, ilustrada na Figura 25, foi desenvolvido em C++ para Sistema Operacional *Windows*. O que o software faz, na verdade, é um processamento de imagens obtidas a cada 10 segundos. Resumidamente, a imagem é convertida para escala de cinza, depois os pixels das gotículas são destacados numa conversão para preto e branco e um algoritmo finalmente conta o número de agrupamentos de pixels brancos que correspondem as gotículas e divide pelo volume conhecido do feixe do laser. Deste modo obtém-se a medida de concentração de NCNs por centímetro cúbico (PINHEIRO, 2011).

Figura 25 - Tela principal da Interface gráfica do CCNC-SDCC (versão 1.0)

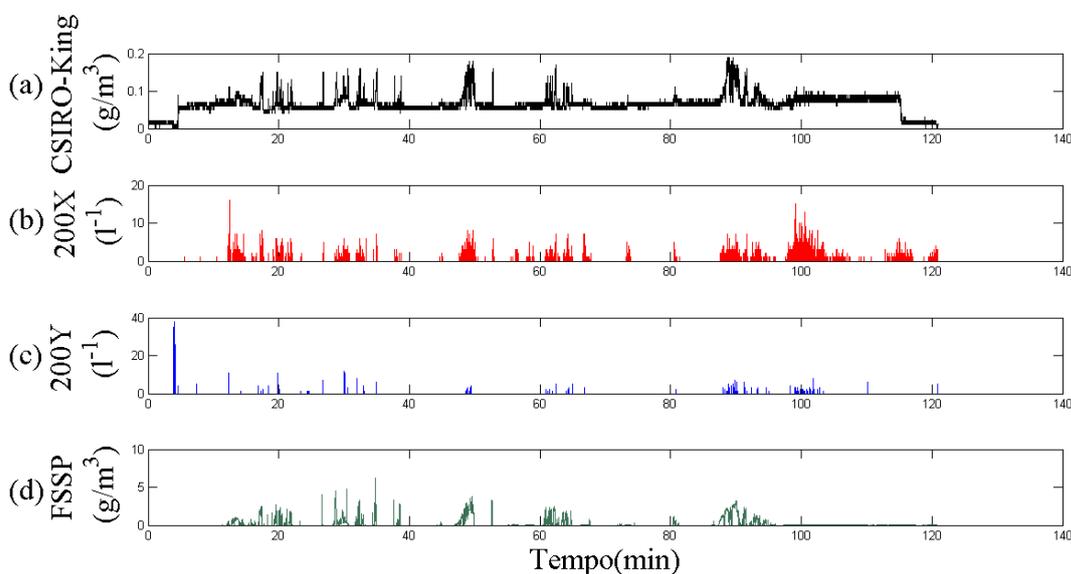


Fonte: Pinheiro (2011)

Pinheiro (2011) explica que nesta tela é possível permite a seleção de quais supersaturações devem ser induzidas no interior da câmara, o disparo do ciclo de medição e a visualização de gotículas. Além disso, apresenta as temperaturas inferior e superior, a diferença de temperatura entre as superfícies superior e inferior da câmara, número de gotículas e o valor obtido da concentração dos núcleos de condensação de nuvens.

As Figuras 26 e 27 mostram, como exemplo de Parâmetros de Microfísica de Nuvens, resultados provenientes de medidas feitas pelo ALPA em Ji Paraná - RO no dia 28/09/2002. A Figura 26 apresenta gráficos de medidas das sondas (a) CSIRO-King com leituras de quantidade de água líquida em  $g \cdot m^{-3}$ , (b) OAP-200X e (c) OAP-200Y com leituras de número de gotas por litro, (d) FSSP com leituras de quantidade de água líquida em  $g \cdot m^{-3}$ . A Figura 27 mostra o resultado de medidas feitas pelo CCNC.

Figura 26 - Gráficos de leitura das sondas CSIRO-King, OAP-200X, OAP-200Y e FSSP

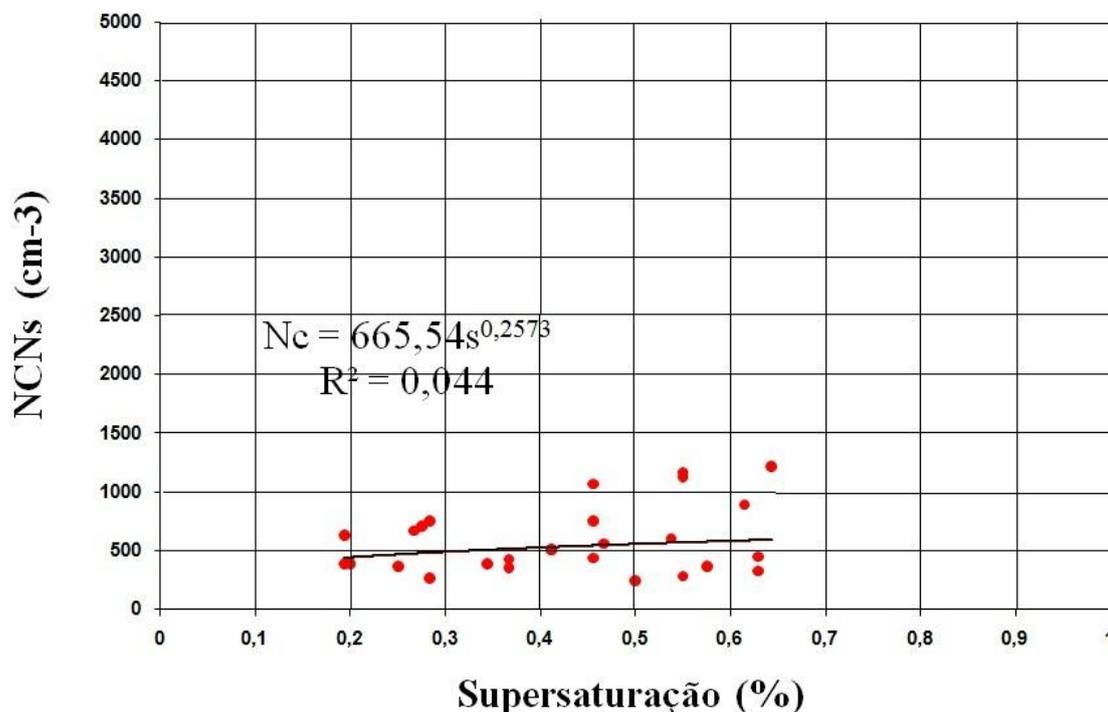


Fonte: Rodrigues (2011)

De acordo com Rodrigues (2011) no gráfico da FSSP na Figura 26 as suas leituras estão defasadas em relação as outras sondas, tomando a CSIRO-King

como referência, suas leituras estariam atrasadas 9,8 segundos. Levando isso em conta pode-se observar que a maioria dos picos dos gráficos são coincidentes de acordo com o tempo, esses picos significam passagens por nuvens, porém deve-se atentar que quando as leituras das OAPs 200-X e 200-Y estão muito altas há uma ausência de leituras na FSSP, isso mostra que o ambiente apresenta concentrações razoáveis de grandes gotas formadas, ocorrendo é escassez de gotículas. Com isso o inverso também pode ser tomado, chegando conclusão que em ambientes com grande formação de gotículas ocorre escassez de gotas grandes. Juntando essas afirmativas com os dados do CCNC, exemplificados através do gráfico da Figura 27, pode-se averiguar se uma nuvem está em um local com baixas ou altas taxas de poluição.

Figura 27 - Gráfico do número de núcleos de condensação de nuvens por unidade de volume em função da supersaturação



Fonte: Rodrigues (2011)

O gráfico da Figura 27 mostra o número de núcleos de condensação de nuvens por unidade de volume em função da

supersaturação, obedecendo à Equação 15. O gráfico mostra que quanto maior a supersaturação mais núcleos de condensação são ativados, onde a concentração mínima é de  $295 \text{ cm}^3$  foi obtida com 0,5 de saturação e a concentração máxima de  $1218 \text{ cm}^3$  com 0,64 de saturação (RODRIGUES, 2011). Sendo a equação que determina o número de núcleos de condensação por unidade de volume ( $N_c$ )

$$N_c = C_s^k, \quad (15)$$

onde  $s$  é a supersaturação do meio,  $C$  e  $k$  parâmetros que dependem da massa do ar.

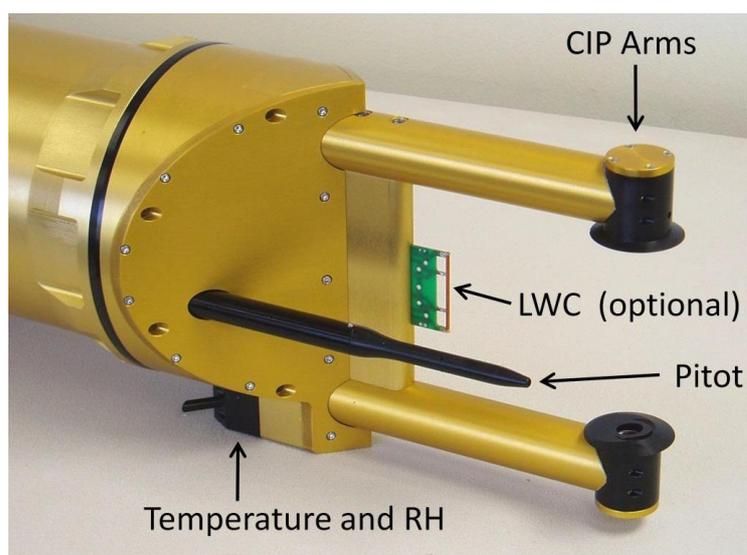
Há um projeto já aprovado denominado INCLINA (Infraestrutura para Estudo das Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro: Papel das Nuvens e Aerossóis), para através de recursos da FINEP, atualizar parte da instrumentação responsável pela coleta de medidas de parâmetros microfísicos. Os instrumentos que serão instalados no ALPA serão listados abaixo.

- \* *Cloud Droplet Probe* (CDP): Esse espectrômetro de partículas de nuvem (Figura 28) mede gotículas no intervalo de 2 a  $50 \mu\text{m}$  de diâmetro, podendo medir concentrações em torno de  $2000 \text{ partículas/cm}^3$ . Preço em Dólares: U\$ 38,500.

Figura 28 - *Cloud Droplet Probe (CDP)*

Fonte: DMT (2010)

- \* *Cloud Imaging Probe (CIP)*: Esse espectrômetro (Figura 29) oferece medidas de partículas de nuvens no intervalo de 25 a 1550  $\mu\text{m}$ . Inclui um sensor de conteúdo de água líquida por fio quente que mede de 0,01 a 3  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , um tubo de pitot que mede velocidades de até 200  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  e um sensor de temperatura. Preço em Dólares: U\$ 63,800.

Figura 29 - *Cloud Imaging Probe (CIP)*

Fonte: DMT (2011)

- \* *Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe (PCASP)*: Esse espectrômetro (Figura 30) mede partículas de aerossóis na faixa de 0,1 a 3  $\mu\text{m}$ . Preço em Dólares: U\$ 47,200.

Figura 30 - *Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe (PCASP)*



Fonte: DMT (2009)

A Figura 31 mostra a CDP e a CIP instaladas em uma aeronave de pesquisa juntamente com outras sondas.

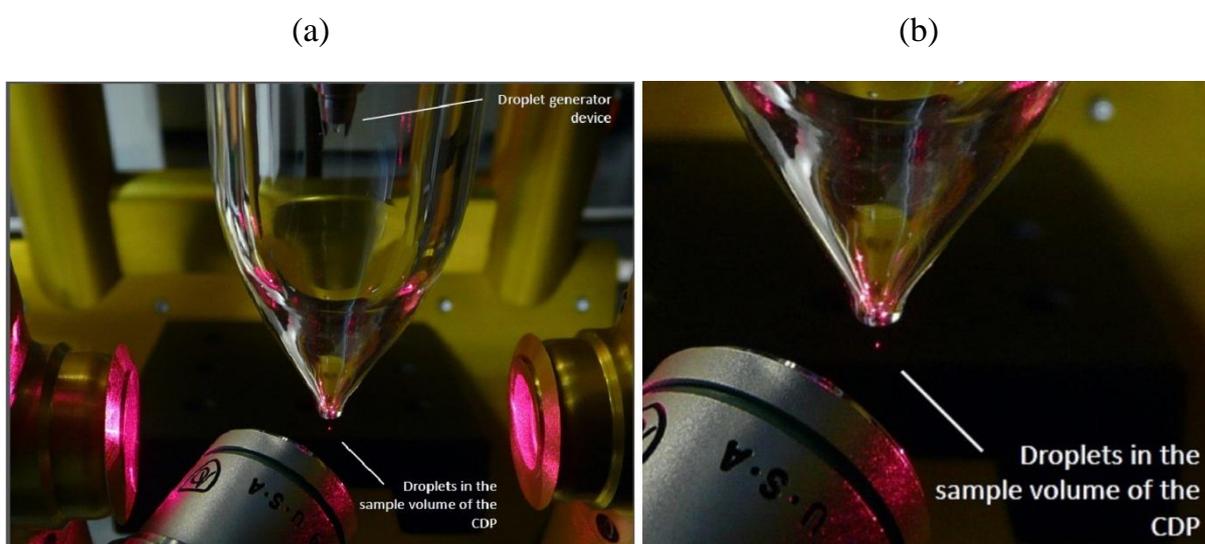
Figura 31 - CIP e CDP instaladas em aeronave de pesquisa



Fonte: Lance *et al.* (2010)

Esse tipo de atualização permite uma maior confiabilidade na coleta de dados, pois os métodos de calibração de fábrica dessas novas sondas evoluíram juntamente com a tecnologia das mesmas, tornando seus dados mais próximos da realidade. As Figuras 32 (a) e (b) mostra o tipo de calibração de fábrica realizada na CDP.

Figuras 32 (a) e (b) - Método empregado para calibrar a CDP na fábrica



Fonte: Lance *et al.* (2010)

A Figura 32 (a) e (b) mostram a CDP no momento da calibração. Esse calibrador consiste em um dispositivo que gera uma gotícula de tamanho conhecido que precipita e atravessa o laser, sendo que, obviamente, a leitura final da sonda deve ser idêntica ao valor do tamanho da gotícula gerada. No lado esquerdo a figura mostra parte do dispositivo gerador de gotícula e no lado direito é mostrada de forma ampliada a gotícula precipitante. O princípio de funcionamento desse calibrador é bem parecido com o do CCNC, tendo uma câmara de condensação supersaturada onde um NCN que condensará uma gotícula de tamanho conhecido é introduzido na câmara, fazendo com que a gotícula formada precipite e atravesse o feixe luminoso da sonda. Esse mesmo calibrador também pode ser usado para calibrar a FSSP.

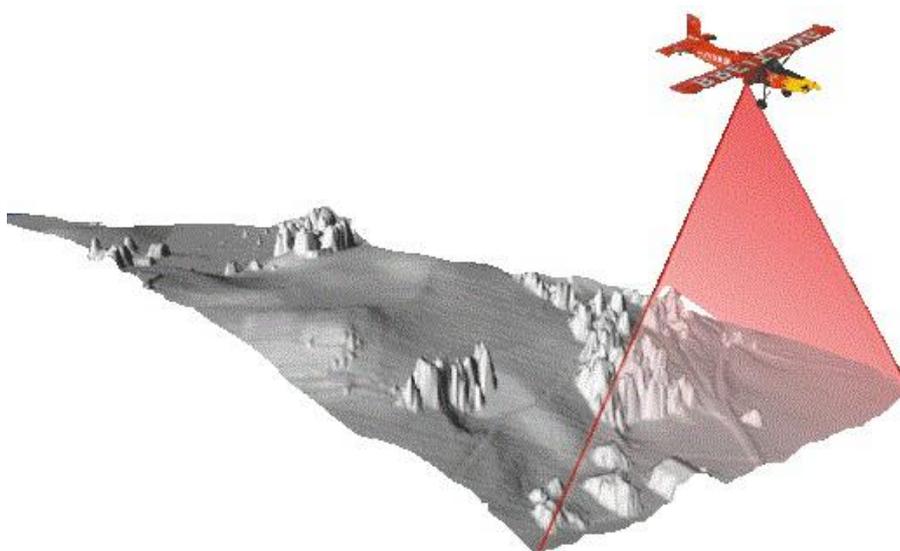
### 3.4 PARÂMETROS DE NAVEGAÇÃO

Os Parâmetros de Navegação são obtidos através de um sistema de GPS instalado no avião. Dessa forma tem como juntar os dados de posição da aeronave (altitude, latitude e longitude) com as medidas das sondas através do tempo em que cada medida foi realizada e assim ter o local exato de cada dado recolhido pela instrumentação.

Todos os dados recolhidos pelos equipamentos da plataforma de pesquisa ALPA passam por um Sistema de Aquisição de Dados (DAS) e são armazenados em microcomputadores a bordo da aeronave para serem descarregados em solo e disponibilizados aos pesquisadores interessados para que sejam trabalhados.

Outros tipos de equipamentos que podem ser instalados na plataforma de pesquisa ALPA são uma câmera digital para pesquisa de distribuição de aerossóis atmosféricos (como citado em Janeiro *et al.* (2007)) e aerofotometria, e um *Lidar* aerotransportado (Figura 33) para fazer levantamento de topografia e também, assim como a câmera, fazer levantamento de distribuição de aerossóis atmosféricos.

Figura 33 - *Lidar* aerotransportado



Fonte: Gachet (2006)

## 4 RESULTADOS

A plataforma ALPA pode ser comparada às plataformas de pesquisas citadas na Revisão de Literatura. Assim pode se ter uma ideia de como a mesma está inserida em termos de linhas de pesquisa, tipos de medidas coletadas, aplicabilidade quanto à altitude de operação, etc. Tendo em vista que a escolha dessas plataformas de pesquisa foi feita pela disponibilidade de artigos completos e várias outros tipos de informações provenientes de fontes consideradas confiáveis, tornando-as aptas a serem usadas como referência.

A Tabela 3 faz uma comparação inicial e geral entre as aeronaves nas quais as plataformas de pesquisa foram baseadas.

Tabela 3 - Comparação de forma geral das aeronaves onde são baseadas as plataformas de pesquisa

<b>Aeronave</b>	<b>Propulsão</b>	<b>Pressurização</b>	<b>Altitude de Operação</b>
M-55	2 Motores Turbofan	Pressurizado	Até 21000 m
<i>Fokker Friendship</i> F27	2 Motores Turboélice	Pressurizado	Até 6600 m
T-28	1 Motor Radial	Não Pressurizado	Até 11000 m
Gulfstream V	2 Motores Turbofan	Pressurizado	Até 15500 m
Ultraleve	1 Motor ROTAX 582	Não Pressurizado	Até 7500 m
BANDEIRANTE BEM 110-P1	2 Motores Turboélice	Não Pressurizado	Até 7500 m

Fonte: Autoria Própria

Observando a Tabela 3 nota-se que não há modelo específico de aeronave que seja ideal para realizar pesquisas atmosféricas. Podendo haver entre algumas aeronaves somente a semelhança na faixa de altitude máxima de voo. Assim conclui-se que a escolha da aeronave vai de acordo com fatores como o tipo de pesquisa que se deseja realizar, disponibilidade quanto à aquisição, etc.

A Tabela 4 mostra uma natureza um pouco mais específica das plataformas de pesquisa, mostrando o período que a aeronave instrumentada atuou realizando medidas, principal local de operação da plataforma e os tipos de medidas colhidas por instrumentos voltados exclusivamente à pesquisa, não incluindo as leituras feitas por instrumentos originais do avião.

Tabela 4 - Período de atuação, principal local de operação e medidas colhidas pelas plataformas de pesquisa

<b>Plataforma de Pesquisa</b>	<b>Período de atuação</b>	<b>Principal Local de Operação</b>	<b>Medidas Colhidas</b>
<i>M-55 Geophysica</i>	1993 - atualmente	Rússia	Aerossóis, Amostra de Gases e Ozônio
<i>Fokker Friendship F27</i>	1986 - 1992	Nova Zelândia e Pacífico Sul	Aerossóis, Amostra de Gases e Hidrometeoros
<i>T-28 Thunderstorm</i>	1969 - atualmente	Dakota do Sul	Hidrometeoros
HIAPER	2005 - atualmente	Colorado (EUA)	Aerossóis, Amostra de Gases, Ozônio e Hidrometeoros
Ultraleve	2000 - atualmente	Alemanha	Aerossóis, Radiação e Ozônio
ALPA	1992 - atualmente	Ceará (Brasil)	Aerossóis, Radiação e Hidrometeoros

Fonte: Autoria Própria

Pela análise da Tabela 4 dá para ver que há semelhanças nos tipos de medidas colhidas pelas plataformas. A maioria colhe medidas de aerossóis e/ou hidrometeoros, estando o ALPA em meio ao grupo que realiza os dois tipos de medidas. Com isso nota-se que o ALPA realiza medidas dos parâmetros mais visados pelos projetos de aeronaves de pesquisa.

A Tabela 5 lista os instrumentos usados para adquirir as medias citadas na Tabela 4 de acordo com cada aeronave de pesquisa.

Tabela 5 - Instrumentos utilizados pelas aeronaves para adquirir as medidas dos parâmetros de pesquisa

Plataforma de Pesquisa	Hidrometeoros	Aerossóis	Radiação	Gases Traços	Ozônio
M-55 <i>Geophysica</i>	-	ARIAS, MAS, FSSP, ABLE e MAL	-	FLASH, ACH, SAFIRE e GASCOD	-
<i>Fokker Friendship F27</i>	FSSP e 2D-C	Extraídos por impactação ou filtragem	-	Colhidos por portas na fuselagem e armazenados	-
T-28 <i>Thunderstorm</i>	J-W, 2DC, <i>Cannon Particle Camera, Hail Spectrometer Foil Impactor</i> e FSSP	-	-	-	-
HIAPER	CDP e 2D-C	SP2 e UHSAS	-	MEDUSA, WAS, QCLS e portas de coleta na fuselagem	Fotômetros de lapada de mercúrio
Ultraleve	-	FSSP	Radiômetro e Piranômetro	-	Fotômetro de UV
ALPA	FSSP, OAP-200X, CCNC, PCASP OAP-200Y, CSIRO- King /CDP, CIP (Futuramente)	CCNC, PCASP (Futuramente)	-	-	-

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 5 mostra a presença da FSSP em quase todas as plataformas de pesquisa. Isso se deve à faixa de tamanho de partículas que ela mede, sendo utilizada para medir tamanhos de gotículas e aerossóis. Atualmente a CDP cobre a faixa de tamanhos da FSSP e, por ser de tecnologia mais recente, a está aos poucos substituindo, o que ocorrerá futuramente no ALPA.

Tendo o ALPA como uma plataforma passível de modificações ele pode se adaptar a qualquer linha de pesquisa relacionada às Ciências da Atmosfera, tendo como alvo a coleta de dados em altitudes até 7500 m. Levando em conta a sua instrumentação atual e vendo como ele está situado meio as plataformas de pesquisa abordadas nas tabelas, nota-se que seu projeto é de larga importância por ter aeronaves de pesquisa que recolhem os mesmo parâmetros em várias partes do mundo, muito além até do que o número de plataformas que foram aqui referenciadas.

## 5 CONCLUSÕES

As aeronaves instrumentadas são plataformas ideais para estudos de micro e meso escala na atmosfera, pois antes de rodar modelos estatísticos para se ter resultados de alguns parâmetros atmosféricos é preciso que sejam colhidos dados in situ para conhecer o meio de forma inicial. Depois de coletados os dados podem dar origem, através de certos padrões estabelecidos depois das coletas, aos tais modelos a serem trabalhados.

Comparado com aeronaves de pesquisa de várias partes do mundo o ALPA se mostra uma plataforma de pesquisa muito valiosa, sendo a única do tipo operando atualmente na América Latina. Suas medidas adquiridas e sua instrumentação vão totalmente de acordo com os projetos das instituições mais renomadas que realizam pesquisas atmosféricas, como a NCAR.

Sua importância é totalmente reconhecida por órgãos de pesquisa nacionais, como INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), e internacionais, como a NASA (Agência Espacial Americana), tendo realizado pesquisa em parceria com ambas fazendo medidas de parâmetros microfísicos para auxiliar na construção de modelos de previsão de pluviosidade mais precisos. Realizando também medidas para o estudo de impactos de atividades humanas na climatologia local, a exemplo de Ji Paraná - RO em 2002.

## REFERÊNCIAS

AUER, A. H. J.; SAND, W. Updrafts measurements beneath the base of cumulus and cumulonimbus cloud. **Journal of Applied Meteorology**, v. 5, p. 461–466, 1966.

BAUMGARDNER, D.; DYE, J. E.; GANDRUD, B. W. Calibration of the forward scattering spectrometer probe used on the er-2 during the airborne Antarctic ozone experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 1647516480, 1989.

BAUMGARDNER, D.; STRAPP, W.; DYE, J. E. Evaluation of the forward scattering spectrometer probe. part ii: Corrections for coincidence and dead-time losses. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 2, p. 626–632, 1985.

BOLTON, D. The computations of equivalent potential temperature. **Monthly Weather Review**, v. 108, p. 1046–1053, 1980.

BROWN, E. N.; FRIEHE, C. A.; LENSCHOW, D. H. The use of pressure fluctuations on the nose of an aircraft for measuring air motion. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 22, p. 171–180, 1983.

CARLI, B. *et al.* Safire-a: Spectroscopy of the atmosphere using far-infrared emission/airborne. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 16, p. 1313–1328, 1999.

DMT. Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe (PCASP-100X) Manual. Droplet Measurement Technologies , **INC .**, 2009.

DMT. Cloud Droplet Probe (CDP) Manual. Droplet Measurement Technologies , **INC .**, 2010.

DMT. Cloud Imaging Probe (CIP) Manual. Droplet Measurement Technologies , **INC .**, 2011.

DYE, J. E.; BAUMGARDNER, D. Evaluation of the forward scattering spectrometer probe. part i: Eletronic and optical studies. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 1, p. 329–344, 1984.

DYE, J. E.; TOUTENHOOFD, W. Measurements of the vertical velocity of the air inside cumulus congestus clouds. **8th Con f. Severe Local Storms**, p. 33–34, 1973.

FIOCCO, G. *et al.* Particles in the stratosphere. EC Review of European Research on the Stratosphere: **The Contribution of EASOE and SESAME to our Current Understanding of the Ozone Layer**, J. A. Pyle, N. R. P. Harris, and G. T. Amanatidis, Eds., European Commission, Directorate General XII, Science, Research and Development, p. 31–72, 1997.

GACHET, G. Disponível em: <<http://www.gilles-gachet.ch/Lidar.htm>>. Acesso em: 06 nov 2011.

HIPPO. Disponível em: <[http://cdiac.ornl.gov/ftp/HIPPO/DOCUMENTATION/HIPPO\\_Instrument\\_Descriptions\\_HV03.pdf](http://cdiac.ornl.gov/ftp/HIPPO/DOCUMENTATION/HIPPO_Instrument_Descriptions_HV03.pdf)>. Acesso em: 10 dez 2011.

IFRONLINE. Disponível em: <<http://ifronline.blogspot.com/2009/09/aviao-laboratorio-da-universidade.html>>. Acesso em: 02 dez 2011.

INC., P. M. S. Disponível em: <<http://www.eol.ucar.edu/raf/Bulletins/B24/fssp100.html>>. Acesso em: 01 dez 2011.

INC., P. M. S. Disponível em: <<http://www.eol.ucar.edu/raf/Bulletins/B24/kingLwc.html>>. Acesso em: 03 nov 2011.

JANEIRO, F. M. *et al.* Automated atmospheric visibility measurements using a digital camera and image registration. Budapest University of Technology and Economics (BME), Faculty of Electrical Engineering and Informatics (VIK), 2007.  
JOHNSON, G. N.; SMITH, J. P. L. Meteorological instrumentation system on the t-28 thunderstorm research aircraft. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 61, p. 972–979, 1980.

JUNKERMANN. Disponível em: <<http://imk-ifu.fzk.de/1013.php>>. Acesso em 16 nov 2011.

JUNKERMANN, W. Measurements of the j(oid) actinic flux within and above stratiform clouds and above snow surfaces. **Geophys. Res. Lett.**, v. 21, p. 793–796, 1994.

JUNKERMANN, W. An ultralight aircraft as platform for research in the lower troposphere: System performance and first results from radiation transfer studies in stratiform aerosol layers and broken cloud conditions. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 18, p. 934–946, 2001.

JUNKERMANN, W.; PLATT, U.; THOMAS, A. V. A photoelectric detector for the measurement of photolysis frequencies of ozone and other atmospheric molecules. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 8, p. 203–227, 1989.

KNOLLENBERG, R. G. Three new instruments for cloud physics measurements: the 2-d spectrometer, the forward scattering spectrometer probe and the active scattering aerosol spectrometer. **International Conference on Cloud Physics, Boulder, Amer. Meteor. Soc.**, p. 554–561, 1976.

KNOLLENBERG, R. G. Techniques for probing cloud microstructure: Clouds, their formation and effects. **Academic Press**, p. 15–89, 1981.

LANCE, S. et al. **Topic 11: Calibration Techniques and Standards**. 2010.

LARSEN, H. R. *et al.* An instrumented aircraft for atmospheric research in new zealand and the south pacific. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 72, p. 192–200, 1991.

LAURSEN, K. K. *et al.* Hiaper: The next generation nsf/ncar research aircraft. **Bulletin American Meteorological Society**, p. 869–909, 2006.

LENSCHOW, D. H. Estimating updraft velocity from an airplane response. **Monthly Weather Review**, v. 104, p. 618–627, 1976.

NORMENT, H. G. Effects of aircraft flow fields on hydrometeor measurements. **International Conference on Cloud Physics, Boulder, Amer. Meteor. Soc.**, p. 591–596, 1976.

OLDENBURG, J. R.; IDE, R. F. Comparison of drop size distributions from two droplet sizing systems. **The Second International Congress on Optical Particle Sizing**, 1990.

OLIVEIRA, C. J. **Um Estudo das Propriedades Microfísicas de Pequena Escala em Nuvens Cumulus**. Tese de doutorado apresentada ao curso de Física da UFC, 1998.

PINHEIRO, F. G. M. **Um novo contador de núcleos de condensação de nuvens baseado em técnicas de visão computacional**. Tese de doutorado apresentada ao curso de Engenharia de Teleinformática da UFC, 2011.

RODRIGUES, E. M. **Caracterização da Microfísica de Nuvens Amazônicas Segundo os Dados de Ji Paraná de 2002**. Universidade Estadual do Ceará, 2011.

ROGERS, R. R.; YAU, M. K. A Short Course in Cloud Physics. **Pergamon Press**, 1989.

SEAMAN, R. Disponível em: <<http://www.richard-seaman.com/Aircraft/AirShows/Maks2005/Highlights/>>. Acesso em 14 jul 2011.

STEFANUTTI, L. *et al.* The m-55 geophysica as a platform for the airborne polar experiment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 19, p. 1303–1312, 1999.

WARNER, T. A. Disponível em: <<http://www.warnerimages.com/gallery/t28/index.html>>. Acesso em: 11 nov 2011.

WILSON, C. T. R. On a method of making visible the paths of ionizing particles through agas. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 85, p. 285288, 1911.