



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**LAICAnSat: UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL
PARA BALÕES DE PEQUENO PORTE**

Pedro Henrique Dória Nehme

Brasília, Julho de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**LAICAnSat: UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL
PARA BALÕES DE PEQUENO PORTE**

Pedro Henrique Dória Nehme

*Relatório submetido ao Departamento de Engenharia
Elétrica como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Dr. Renato Alves Borges, ENE/UnB
Orientador

Dr. Thyrso Villela Neto, CGEE
Examinador externo

Dr. Jackson Max Furtunato Maia, CGEE
Examinador externo

Dedicatória

Aos meus pais, Abílio e Heloísa, e ao meu irmão, Eduardo.

Pedro Henrique Dória Nehme

Agradecimentos

Um agradecimento especial aos meus pais, Abílio e Heloísa, que me ensinaram, com esforço, amor e responsabilidade, a dar os primeiros passos na vida, permitindo que hoje eu trilhe o meu próprio caminho, na certeza de sempre encontrar apoio em qualquer situação. Ao meu irmão Eduardo, pelo seu companheirismo, suporte e dedicação durante todos esses anos. À Juliana, pela paciência, compreensão e diálogo nos momentos alegres e não tão alegres.

Aos professores que me acompanharam durante esses anos, tanto na Universidade de Brasília, quanto na Catholic University, em especial ao meu orientador, Prof. Renato Borges, pela confiança, dedicação, persistência e companheirismo durante esse trabalho, ao Prof. Geovany Borges, pelo incentivo desde o primeiro semestre do curso, ao Prof. Jandro Abot, um uruguaio de alma verde e amarela, pela dedicação durante todo o período na CUA, a Prof. Duília de Mello, pela visão, oportunidade, confiança e pelas valiosas conversas e conselhos. Ainda, agradeço ao Prof. Mathews, ao Prof. Schuette e aos colegas do GSFC, em especial Dr. Rimehart, Dr. Benford e aos futuros Dr. Rizzo e Dr. Eufrásio, pela dedicação e pelos valiosos ensinamentos.

Agradeço aos colegas de laboratório, por me ensinarem a viver a engenharia, em especial a equipe do Projeto LAICAnSat, Rafael Resende, André Vinicius, Bruno Noronha, Simone Battistini e Chantal Cappelletti, e aqueles que me incentivaram desde o princípio, Felipe Brandão, Bruno Amui, George Brindeiro e Pedro Santana. Agradeço também ao CNPq, pelo apoio financeiro parcial ao projeto desenvolvido.

Enfim, agradeço a você leitor, por dar significado à existência desse documento.

Pedro Henrique Dória Nehme

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma de balão de alta altitude para aplicações em meteorologia e sensoriamento remoto. O LAICAnSat tem como objetivo obter dados para a identificação de camadas atmosféricas, assim como proporcionar imagens da superfície terrestre. Para isso, o sistema embarcado possui receptor GPS, sensor de temperatura, pressão, umidade, raios ultravioleta, infravermelho, câmera, assim como sensores de tensão e corrente, para *housekeeping* do sistema. É apresentado também uma revisão bibliográfica, resumindo as principais atividades de balões de alta altitude no mundo e os projetos já desenvolvidos no Brasil. Por fim, são apresentadas diversas perspectivas de evolução para o projeto LAICAnSat. A contribuição desse projeto é a solução das principais dificuldades que tangem o desenvolvimento inicial de balões de alta altitude, assim como o desenvolvimento de uma primeira plataforma, com uma arquitetura capaz de atender aos requisitos apresentados. Assim, o sistema foi testado em uma aeronave e depois lançado em dois balões de alta altitude.

ABSTRACT

This work presents the development of a high altitude balloon platform with meteorology and remote sensing applications. The LAICAnSat main objective is to gather data about the atmosphere layers, as well as provide high altitude images. Therefore, this platform has a broad sensor suite, with GPS, temperature, pressure, humidity sensors, along with ultraviolet sensors, infrared sensors and camera. Also, some sensors are used for housekeeping as for instance the voltage and current monitors. Besides that, this work presents a review of the history behind high altitude balloon research and also the projects developed in Brazil regarding this activity. Nevertheless, future perspectives for the LAICAnSat project are highlighted. The solution for most of the difficulties that restrain the initial development of high altitude balloons is the expected contribution of this work, along with the development of the first high altitude balloon payload, addressing each of the assigned requirements.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	BREVE HISTÓRICO	3
1.2	BALÕES ESTRATOSFÉRICOS	5
1.2.1	BALÕES ESTRATOSFÉRICOS NO BRASIL	7
1.3	BALLOONSATS	11
1.4	DESCRIÇÃO E OBJETIVOS DO PROJETO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E DESENVOLVIMENTOS PRELIMINARES	15
2.1	MODELO DE VÔO DE BALÕES ESTRATOSFÉRICOS	15
2.1.1	MOVIMENTO VERTICAL DE BALÕES ESTRATOSFÉRICOS	18
2.2	DESCRIÇÃO DO <i>hardware</i>	20
2.2.1	COMPUTADOR DE BORDO	21
2.2.2	SUBSISTEMA DE ENERGIA	22
2.2.3	SENSORES	24
2.2.4	COMUNICAÇÃO	28
2.3	DESCRIÇÃO DO <i>software</i>	30
3	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	32
3.1	TESTE DO SISTEMA EMBARCADO EM UMA AERONAVE	32
3.2	PRIMEIRO LANÇAMENTO - 02 DE MAIO DE 2014	38
3.3	SEGUNDO LANÇAMENTO - 24 DE MAIO DE 2014	47
4	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
	ANEXOS	63
I	DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS	64
II	DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD	66
III	LEGISLAÇÃO	67
IV	NOTAM	78

LISTA DE FIGURAS

1.1	Primeiros balões de ar quente projetados pelos irmãos Montgolfier.	3
1.2	Primeiros balões de hidrogênio projetados por Jacques Charles.	4
1.3	Cientistas que conduziram experimentos utilizando balões no século XIX.	5
1.4	Lançamento de balões científicos modernos.	6
1.5	Descrição das camadas atmosféricas. <i>fonte: http://theozonehole.com</i>	7
1.6	Tipos de balões estratosféricos.	8
1.7	Lançamento de balões científicos do INPE.	8
1.8	Lançamento de balões estratosféricos de diferentes localidades no Brasil.	10
1.9	Exemplos de <i>balloonsats</i>	12
1.10	Carga útil do balão HASP.	13
2.1	Modelo do balão estratosférico [1].	16
2.2	Diagrama representando a disposição dos componentes.	20
2.3	Diagramas de bloco apresentando as conexões dos microcontroladores com os demais dispositivos dos sistema.	21
2.4	Baterias utilizadas nos subsistemas do LAICAnSat.	22
2.5	Sensor de corrente e tensão e detalhe do circuito de referência do regulador de tensão utilizado no subsistema de energia.	24
2.6	Sensores de temperatura e umidade e temperatura e pressão.	26
2.7	Sensor de temperatura e pressão e sensor de temperatura.	26
2.8	Sensor de radiação infravermelha e gráfico mostrando a sensibilidade do sensor para determinados comprimentos de onda.	27
2.9	Sensor de radiação ultravioleta e especificação das diferentes faixas de ultravioleta, de acordo com o comprimento de onda.	27
2.10	Imagem da câmera GoPro e detalhada do sensor CMOS responsável pelas imagens obtidas.	28
2.11	Transmissor APRS utilizado no LAICAnSat e a respectiva posição do <i>balloonsat</i> plotada no site do sistema APRS.	30
2.12	Rede de rádios Xbee, uma opção de modularização.	31
3.1	Variação da altitude (GPS) durante o voo.	34
3.2	Alcance do canal de comunicação do XBee.	34
3.3	Imagens do teste do sistema em uma aeronave.	35
3.4	Percurso dos vôos realizados na aeronave.	35

3.5	Variação da pressão interna da aeronave durante os dois vôos.	36
3.6	Variação da temperatura interna da aeronave durante os dois vôos.	36
3.7	Gráficos de dados obtidos no teste do sistema em uma aeronave.	37
3.8	Gráficos de dados obtidos no teste do sistema em uma aeronave.	37
3.9	Imagens do primeiro lançamento.	39
3.10	Imagens do primeiro lançamento.	40
3.11	Trajetória do <i>balloonsat</i> dada pelo sistema APRS. <i>fonte: http://aprs.fi</i>	41
3.12	Simulação do lançamento e local de pouso previsto. <i>fonte: http://predict.habhub.org</i>	42
3.13	Trajetória do <i>balloonsat</i> pelos dados do GPS embarcado. <i>fonte: Google Earth</i>	43
3.14	Local do pouso real. <i>fonte: http://aprs.fi</i>	44
3.15	Gráficos de dados obtidos no primeiro lançamento.	44
3.16	Variação da altitude (GPS) durante o vôo.	45
3.17	Dados de temperatura obtidos no primeiro lançamento.	45
3.18	Dados de pressão obtidos no primeiro lançamento.	45
3.19	Imagem da superfície terrestre durante vôo do LAICAnSat-1.	46
3.20	Imagem da superfície terrestre durante vôo do LAICAnSat-1.	46
3.21	Imagens do segundo lançamento.	47
3.22	Imagens do segundo lançamento.	48
3.23	Trajetória do <i>balloonsat</i> pelos dados do GPS embarcado. <i>fonte: Google Earth</i>	49
3.24	Trajetória do <i>balloonsat</i> dada pelo sistema APRS. <i>fonte: http://aprs.fi</i>	50
3.25	Simulação do lançamento e local de pouso previsto. <i>fonte: http://predict.habhub.org</i>	50
3.26	Local do pouso real. <i>fonte: http://aprs.fi</i>	51
3.27	Tensão na saída da bateria.	52
3.28	Dados da umidade relativa do ar durante o vôo.	52
3.29	Variação da altitude (GPS) durante o vôo.	53
3.30	Dados obtidos no segundo lançamento.	53
3.31	Dados obtidos no segundo lançamento.	53
3.32	Variação de pressão no sensor MS5611.	54
3.33	Variação de pressão no sensor BMP085.	54
3.34	Imagem da superfície terrestre durante vôo do LAICAnSat-2.	55
3.35	Imagem do local mostrado na Figura 3.34. <i>fonte: Google Maps</i>	55
3.36	Imagem da superfície terrestre durante vôo do LAICAnSat-2.	56
3.37	Imagem do local mostrado na Figura 3.36. <i>fonte: Google Maps</i>	56
3.38	Imagem da superfície terrestre durante vôo do LAICAnSat-2.	57
3.39	Imagem do local mostrado na Figura 3.38. <i>fonte: Google Maps</i>	57

LISTA DE TABELAS

1.1	Informações técnicas dos balões meteorológicos da Hwoyee.....	9
2.1	Informações técnicas da bateria Turnigy nano-tech 2100mAh.	23
2.2	Informações técnicas dos sensores presentes na Central de Medidas Inerciais YEI 3-Space Sensor.....	29

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

c_e	Calor específico do envelope do balão	[J/kg.K]
c_{pg}	Calor específico do gás dentro do balão	[J/kg.K]
R	Constante universal dos gases	[J/K.mol]
D_b	Diâmetro do balão	[m]
F	Força aerodinâmica que atua sobre o balão	[N]
F_D	Força aerodinâmica que atua paralelo ao vetor velocidade relativa do vento	[N]
F_Y	Força aerodinâmica que atua perpendicular ao vetor velocidade relativa do vento	[N]
A_b	Maior secção perpendicular ao eixo do balão	[m ²]
m_b	Massa do balão	[kg]
m_p	Massa da carga útil	[kg]
m_c	Massa do contrapeso	[kg]
m_G	Massa bruta do sistema	[kg]
m_t	Massa total do sistema	[kg]
m_v	Massa adicional devido à inércia do fluido	[kg]
m_e	Massa do envelope do balão	[kg]
M_a	Massa molar do ar	[kg/mol]
x_b	Posição do balão no eixo x	
y_b	Posição do balão no eixo y	
z_b	Posição do balão no eixo z	
p_a	Pressão atmosférica	[kPa]
q_e	Quantidade de calor que flui para dentro do balão	[J]
q_g	Quantidade de calor que flui para o gás dentro do balão	[J]
T_a	Temperatura atmosférica	[C]
T_e	Temperatura da superfície do balão	[K]
i	Vetor unitário no eixo x	
j	Vetor unitário no eixo y	
k	Vetor unitário no eixo z	
v_b	Vetor velocidade do balão	
v_w	Vetor velocidade do vento	
V_b	Volume do balão	[m ³]

Símbolos Gregos

α	Ângulo de ataque do balão	[°]
μ_a	Coefficiente de viscosidade do ar	[N.s/m ²]
ρ_a	Densidade atmosférica	[m ³ /kg]

Grupos Adimensionais

C_D	Coefficiente de arrasto do balão
C_Y	Coefficiente de força lateral
C_m	Coefficiente de massa adicional devido à inércia do fluido
Re_b	Número de Reynolds
\tilde{M}	Razão entre as massas molares dos gases
\tilde{p}_g	Razão entre a pressão do gás e a pressão atmosférica
\tilde{T}_g	Razão entre a temperatura do gás e a temperatura da atmosfera

Siglas

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ACES	Aerospace Catalyst Experiences for Students
ADC	Analog to Digital Converter
ADCS	Attitude Determination and Control System
APRS	Automatic Packet Reporting System
BOREALIS	Balloon Outreach, Research, Exploration and Landscape Imaging System
CDR	Critical Design Review
CINDACTA	Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo
CMOS	Complementary metal-oxide semiconductor
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRS/INPE	Centro Regional Sul (INPE)
CSBF	Columbia Scientific Balloon Facility
DCEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DCTA)
ELAT	Grupo Eletricidade Atmosférica da Divisão de Geofísica Espacial (INPE)
EPS	Electrical Power System
FAA	Federal Aviation Administration
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FPGA	Field-Programmable Gate Array
FRR	Flight Readiness Review
FSK	Frequency-shift keying
GLB	Grupo de Lançamento de Balões (UNESP-Bauru)
GPS	Global Positioning System
HASP	High Altitude Student Platform
HF	High Frequency
I2C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPMET	Instituto de Pesquisas Meteorológicas (UNESP-Bauru)
JAXA	Agência Espacial Japonesa
LAICA	Laboratório de Aplicações e Inovação em Ciência Aeroespacial
LFP	Baterias Lithium Iron Phosphate
LIB	Baterias de íon de Lítio
LOS	Line-of-Sight
LTE	Long Term Evolution
MASCO	Máscara Codificada
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research

NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NOTAM	Notice to Airmen
NSCF	National Scientific Balloon Facility
NSF	National Science Foundation
OBDH	On-board Data Handling
PDR	Preliminary Design Review
PLA	Poliácido Láctico
PVC	Policloreto de Vinila
PWM	Pulse Width Modulation
ROE	Relação de Ondas Estacionárias
SLB	Setor de Lançamento de Balões (INPE)
SOFIA	Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy
SPI	Serial Peripheral Interface
TNC	Terminal Node Controller
TT&C	Telemetry, Tracking and Command
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
UHF	Ultra High Frequency
UMI	Unidade de Medição Inercial
USB	Universal Serial Bus
UTC	Coordinated Universal Time
VHF	Very High Frequency

Capítulo 1

Introdução

O balão parece estar parado no ar enquanto a terra voa lá embaixo.

Santos Dumont

A comunidade aeroespacial compartilha um velho dilema na exploração espacial: o alto custo do acesso ao espaço [2]. Já presente como um complicador nos desenvolvimentos iniciais de Werner von Braun, engenheiro conhecido pelo projeto dos foguetes V-2 e Saturno V, o orçamento disponível para a exploração espacial sempre foi o fator limitante dos feitos nesse setor. Um dos fatos que sustenta essa afirmativa é o curto intervalo de tempo entre o lançamento do primeiro satélite americano. Os Estados Unidos da América, diante de um orçamento praticamente ilimitado para o setor aeroespacial, colocou o seu primeiro satélite em órbita, o *Explorer 1* em 1958, e apenas 11 anos depois colocou seus primeiros astronautas na superfície lunar [3]. Considerando a atual situação econômica mundial, bem como a relevância tecnológica de se manter um programa espacial competitivo, novas possibilidades de exploração do espaço são consideradas a cada dia. Dessa forma, plataformas de voo suborbital e, em especial, balões de alta altitude, ganham novas perspectivas de desenvolvimento, abarcando cada vez mais missões experimentais e de desenvolvimento de tecnologias espaciais [4]. Nesse contexto, diversas perguntas surgem para definir melhor as vantagens e desvantagens existentes na concepção de experimentos suborbitais que buscam validar tecnologias e experimentos a serem aplicados em missões espaciais.

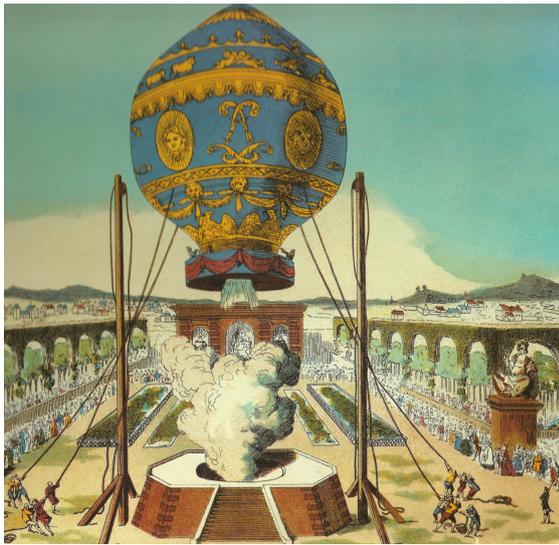
Balões de alta altitude, do inglês *High Altitude Balloons*, são plataformas utilizadas para experimentação científica e demonstração de novos conceitos e tecnologias [1]. Além do balão, que leva o experimento até a estratosfera, essas plataformas são compostas de carga útil, carregando o experimento e o equipamento de suporte e paraquedas, para a redução da velocidade de descida e impacto. Devido a versatilidade dos balões de alta altitude, as dimensões e a massa da carga útil podem variar de forma significativa, de gramas a toneladas, de centímetros a metros, dependendo do experimento a ser realizado. Os principais tipos de balões de alta altitude são: balão de alta pressão, balão de pressão zero e balão-sonda [5] [6]. Esses balões são selecionados de acordo com a dinâmica e duração do voo. O LAICAnSat possui uma carga útil de massa inferior a 4kg e é lançado com um balão-sonda. Devido a essas características, pode ser classificado como um *balloonsat* [7].

Balloonsats são plataformas de pesquisa em alta altitude, normalmente construídas por estudantes [7]. Também conhecidos como *near-space satellites*, essas plataformas são levadas até a estratosfera a partir de balões-sonda, com um período de flutuação muito pequeno, passando grande parte do tempo de vôo subindo ou descendo. A carga útil desses balões inclui câmeras, acelerômetros, giroscópios, magnetômetros, *geiger counters*, sensor de pressão, umidade, temperatura, raios ultravioleta, infravermelho, detectores de gases e até microorganismos vivos. Dessa forma, é possível explorar diversos aspectos relacionados ao desenvolvimento de uma carga útil para uma missão espacial, assim como as outras fases do projeto, que compreendem a concepção, procedimentos, lançamento e operação.

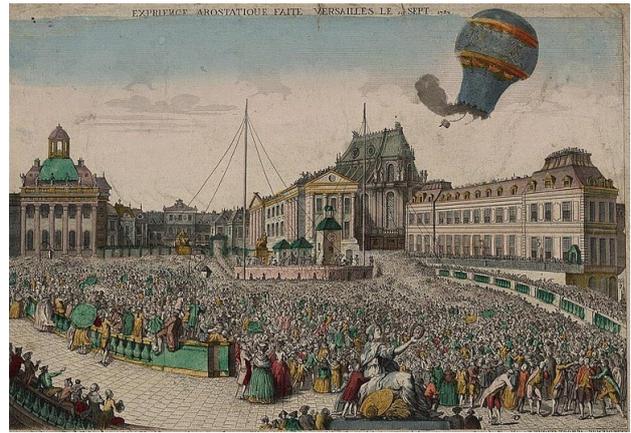
Assim como os *balloonsats*, os *cansats* também tem despertado a atenção de estudantes por todo o mundo. Concebidos para serem lançados de foguetes específicos, de baixa altitude, os *cansats* se assemelham muito aos *balloonsats*. Entretanto, a disparidade entre a dinâmica de vôo dessas duas plataformas influenciam muito seu projeto. Enquanto os *balloonsats* necessitam de uma atenção maior no balanço térmico da carga útil, devido a grande exposição a temperaturas baixas [8] e são mais flexíveis com relação a massa e dimensões, os *cansats* possuem limitações rígidas quanto a massa e dimensões, dado que são lançados de um foguete de sondagem, e praticamente não necessitam de tratamento térmico significativo. Ainda, os *cansats* são normalmente ejetados do foguete a uma altitude de, no máximo, 3km. Efetivamente, a altitude alcançada por um *balloonsat* pode ser 10 vezes maior que a altitude alcançada por um *cansat*. Apesar das diferenças entre *balloonsats* e *cansats*, é possível identificar diversas similaridades do ponto de vista de concepção, desenvolvimento, procedimentos e operação.

Do ponto de vista educacional, os *balloonsats* e *cansats* são plataformas que contribuem de forma significativa para o desenvolvimento de capacidades importantes desejadas para engenheiros, principalmente os atuantes no setor Aeroespacial [9]. Engenheiros ou cientistas são profissionais treinados, experientes, que contam com diversas habilidades práticas, capazes de trabalhar em grupo, comunicar de forma efetiva os resultados obtidos, fazendo relatórios, documentos e apresentações, bem como administrar pessoas, tempo e orçamento. Visando formar engenheiros com tais características, capazes de sustentar o desenvolvimento aeroespacial dos Estados Unidos da América, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *National Space Grant Foundation* têm proposto diversos prêmios e programas educacionais baseado no desenvolvimento de cargas úteis para balões de alta altitude. Pode-se citar aqui o projeto *High Altitude Student Platform* (HASP) e *Aerospace Catalyst Experiences for Students* (ACES), desenvolvidos pela *Louisiana State University* e o projeto *Borealis* da *Montana State University*.

O Brasil também têm necessidade de engenheiros capazes de suprir a demanda nacional, principalmente no setor aeroespacial. O Plano Nacional de Atividades Espaciais (PNAE) possui como uma das diretrizes: "Fomentar a formação e capacitação de especialistas necessários ao setor espacial brasileiro, tanto no país como no exterior"[10]. Além disso, "as atividades espaciais exigem recursos humanos de alto nível técnico, em constante processo de aprimoramento"[11]. Projetos como os *balloonsats* são capazes de viabilizar estratégias para a formação de massa crítica de especialistas, como por exemplo, a retenção de talentos no setor aeroespacial [12] .



(a) Lançamento do primeiro balão de ar quente.



(b) Lançamento em Versailles, França.

Figura 1.1: Primeiros balões de ar quente projetados pelos irmãos Montgolfier.

1.1 Breve histórico

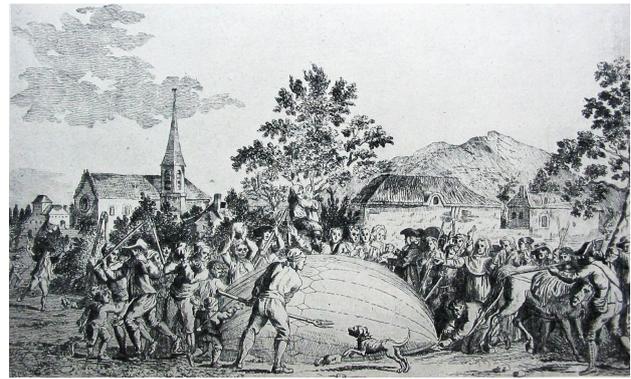
O primeiro balão da história da humanidade foi lançado pelos irmãos Joseph-Michel Montgolfier e Jacques-Étienne Montgolfier, em 5 de Junho de 1783, na região de Annonay, sul da França [1]. O experimento, ilustrado na Figura 1.1a, consistia em um balão não-tripulado de ar quente, com um volume de 700m^3 . Na ocasião, atingiu uma altitude de 2000m. O feito só foi possível a partir de vários anos de pesquisa e experimentação, organizando o conhecimento a partir do método científico. Ainda no ano de 1783, os irmãos Montgolfier realizaram outros lançamentos, dessa vez para uma audiência muito maior, como é possível perceber na Figura 1.1b. Em 19 de Setembro e 21 de Novembro, realizaram lançamentos em Paris, sob o olhar de Luis XVI, deposto e executado alguns anos depois pela Revolução Francesa. Os irmãos Montgolfier embarcavam pequenos animais em seus balões, procedimento repetido mais de 170 anos depois no desenvolvimento dos primeiros módulos espaciais tripulados.

Apenas três meses depois do primeiro balão dos irmãos Montgolfier, Jacques Alexandre César Charlevers e os irmãos Robert (Anne-Jean Robert e Nicolas-Louis Robert) realizaram o primeiro vôo utilizando um balão de hidrogênio, em 27 de Agosto de 1783, ilustrado na Figura 1.2. Em 1º de Dezembro desse mesmo ano, fizeram o primeiro vôo tripulado em um balão de hidrogênio [1]. Diferentemente do balão de ar quente, o balão de gás Hidrogênio era totalmente fechado. Devido a tendência do balão em subir de forma contínua, Charles instalou uma válvula de controle do volume de gás, com o objetivo de controlar a altitude do balão. O cientista francês contribuiu de forma significativa com o desenvolvimento de balões de gás, devido as técnicas desenvolvidas para realizar esse feito, assim como os dados obtidos durante os testes e o vôo.

Alguns cientistas, então, começaram a utilizar balões para fazer experimentos. Em 24 de Agosto de 1804, Joseph Louis Gay-Lussac subiu em um balão até a altitude de 8000m carregando um barômetro, um termômetro e um higrômetro, como apresentado na Figura 1.3a Outros cientistas



(a) Lançamento do primeiro balão de Hidrogênio.



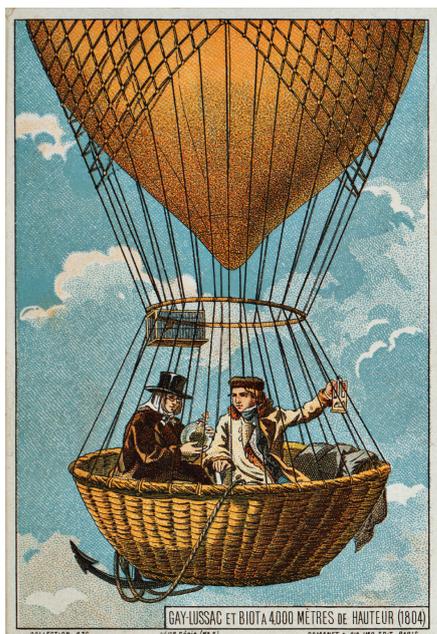
(b) Habitantes da vila de Gonesse atacam um balão.

Figura 1.2: Primeiros balões de hidrogênio projetados por Jacques Charles.

também arriscaram suas vidas nessa tarefa. Um deles foi James Glaisher, em 1862. O cientista inglês quebrou o recorde mundial de altitude, porém, ao chegar a 8800m, desmaiou antes que pudesse realizar a leitura dos instrumentos [1]. Acredita-se que nesse vôo o balão tenha alcançado entre 9500m e 10900m. Nessa ocasião, um dos pássaros levados com ele no balão morreu. Esses relatos demonstram ao mesmo tempo o risco e a vontade de explorar o desconhecido.

Apesar da grande importância desses experimentos para consolidar os balões como plataformas de pesquisa, um experimento em específico chamou a atenção do mundo. Entre os anos de 1911 e 1912, o físico Victor Francis Hess realizou o primeiro experimento de astrofísica em um balão, ocasião registrada por um fotógrafo, como é possível ver na Figura 1.3b. Carregando um eletroscópio até 5000m, Hess mediu a variação dos raios cósmicos com a altitude. Baseado nos dados de vôo obtidos, foi possível comprovar que esses raios chegavam à Terra pelo espaço, e não o contrário, como se acreditava na época. Essa importante descoberta demonstrou que os balões poderiam ser importantes também para explorar o espaço, e não apenas para a observação da Terra. Em 1936 Hess foi premiado com o Prêmio Nobel de Física pela contribuição na descoberta dos raios cósmicos [13].

No início do século XX, diversas contribuições foram feitas para a concepção moderna de balões científicos. Na década de 30 a *Imperial Chemical Industries* desenvolveu o polietileno de baixa densidade, um material fino, leve, resistente e com boas características elásticas. Na década seguinte, diversas instituições de ensino superior, bem como a Marinha dos EUA, desenvolveram novas tecnologias, dentre materiais e equipamentos, permitindo o aumento da autonomia dos balões e também aprimorando a comunicação e controle a longa distância. Assim, foi possível executar experimentos mais elaborados. No final da década de 50, cargas úteis de mais de 1 tonelada já eram lançadas por balões estratosféricos, sendo levadas a 30km de altitude. Os projetos Stratoscope I e II, e diversos outros, foram realizados por instituições como o *Smithsonian Observatory*, *Princeton University* e *Johns Hopkins University* [14]. Normalmente, tinham como tema experimentos de astrofísica, testes com foguetes de sondagem, os *Rockoons* [15], ou então testes de componentes para as missões espaciais tripuladas. Os experimentos relacionados ao desenvolvimento de telescópios contribuíram, posteriormente, para o projeto do Telescópio Espacial Hubble. Com o avanço



(a) Gay-Lussac e Jean-Baptiste Biot realizando medições em vôo.



(b) Um dos lançamentos de Victor Hess.

Figura 1.3: Cientistas que conduziram experimentos utilizando balões no século XIX.

das pesquisas utilizando balões estratosféricos, diversos países criaram instituições responsáveis por conduzir experimentos e realizar lançamentos de balões [16], como o experimento da NASA mostrado na Figura 1.4.

1.2 Balões Estratosféricos

Balões estratosféricos, ou balões de alta altitude, são balões que utilizam gases menos densos que o ar, normalmente Hélio ou Hidrogênio, para levar uma carga útil, com experimentos de observação científica ou desenvolvimento tecnológico. A Figura 1.5 mostra as diferentes camadas atmosféricas e algumas atividades desenvolvidas em cada uma delas. Existem 3 tipos de balões de alta altitude: os balões de pressão zero, balões de superpressão e os balões-sonda [17, 18]. Os balões de pressão zero são denominados assim por não existir diferença de pressão entre o interior e o exterior do balão. Os balões estratosféricos de pressão zero são compostos por válvula exaustora, balão, aberturas de exaustão, mecanismo de separação, paraquedas, carga útil e sistema de amortecimento de impacto. O balão é feito de um filme fino de polietileno, e é construído a partir de vários gomos cortados individualmente. Fibras de alta resistência, também chamadas de fitas de carga, são utilizadas como reforço nas juntas entre os gomos. Essas fibras ligam o topo do balão à carga útil. A válvula exaustora é utilizada para controlar a altitude do balão, a partir da liberação ou não do gás contido no balão. Os balões de pressão zero são caracterizados pelas aberturas de exaustão, localizados na parte inferior do balão. Após o balão expandir até atingir o volume máximo, o gás que está contido no balão transborda pelas aberturas de exaustão, mantendo, assim, a plataforma a uma altitude constante. O mecanismo de separação é também chamado de



(a) Balão de alta altitude lançado na Antártica. fonte: <http://csbf.nasa.gov>



(b) Carga útil sendo erguida pelo caminhão grua antes do lançamento. fonte: <http://csbf.nasa.gov>

Figura 1.4: Lançamento de balões científicos modernos.

dispositivo de terminação de voo. Como o termo indica, esse mecanismo separa o experimento do balão, provocando a queda da carga útil e o fim do período de flutuação do balão. Da forma como foi apresentado aqui, o termo carga útil leva em consideração tanto o experimento motivador do lançamento quando os sistemas de telemetria e telecomando (TT&C), potência (baterias) e o lastro, para contrabalancear o empuxo resultante do balão. Uma das maiores empresas fabricantes de balões estratosféricos de pressão zero e alta pressão é a americana RAVEN AEROSTAR [17].

Balões de alta pressão são balões que possuem volume quase constante, desde o lançamento até flutuação. Essa característica é muito importante devido ao comportamento indesejável apresentado pelos balões de volume variável, principalmente durante o período de flutuação. Os balões de pressão zero são estáveis quando ganham altitude, durante a flutuação, mas são instáveis quando perdem altitude, tendo que liberar parte do contrapeso que levam para diminuir o peso. Assim, quando a carga de contrapeso termina, não é possível manter a altitude do balão. Já os balões de alta pressão são estáveis quando ganham e quando perdem altitude. Se, durante a flutuação, um balão de alta pressão ganha altitude, a menor densidade do ar faz com que o vetor empuxo diminua em módulo. Por outro lado, se o balão perde altitude, a maior densidade do ar faz com que o vetor empuxo aumente em módulo, funcionando como um controlador on-off natural. Dessa forma, os balões de alta pressão tem um período de flutuação muito maior que os balões de pressão zero, permitindo missões que podem chegar a 100 dias de duração.

Balões-sonda, também chamados de balões meteorológicos, são normalmente feitos de borracha, especificamente látex. O látex oferece propriedades de alongamento melhores do que os materiais sintéticos, podendo ser estendido em até 500% em uma direção [1]. Os balões de látex são vendidos

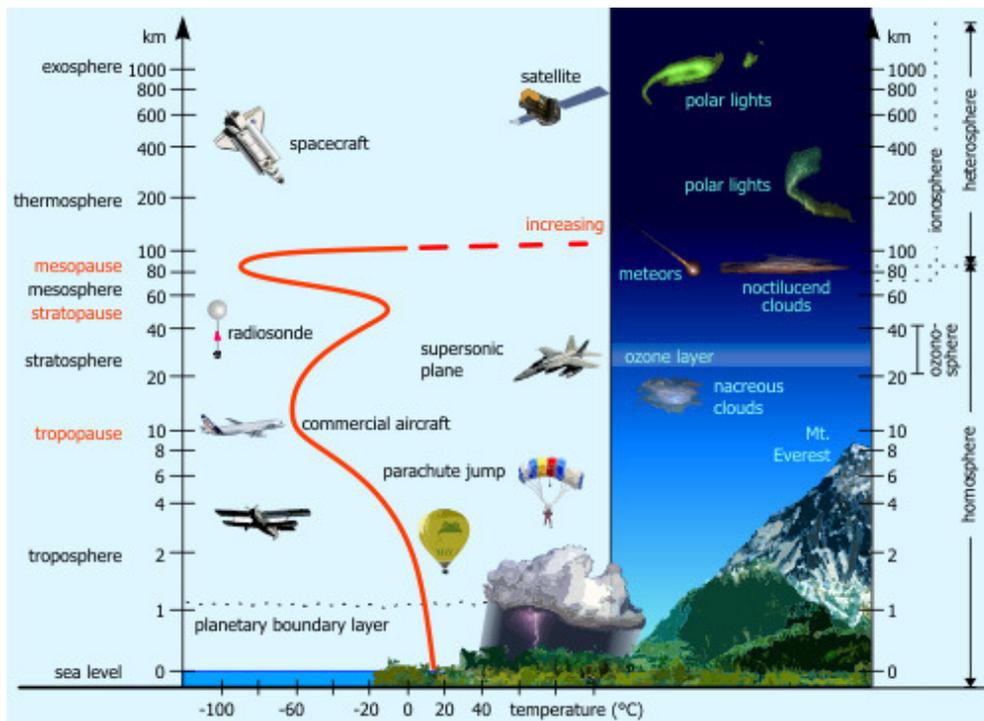


Figura 1.5: Descrição das camadas atmosféricas. fonte: <http://theozonhole.com>

em diferentes tamanhos, variando de 140g a 3000g. De acordo com o tamanho do balão, vários outros parâmetros também variam, como é possível ver na Tabela 1.2 ¹. O mercado de balões meteorológicos é composto por 3 empresas: a americana Kaymont (Totex), a chinesa Hwoyee e a indiana PAWAN.

1.2.1 Balões estratosféricos no Brasil

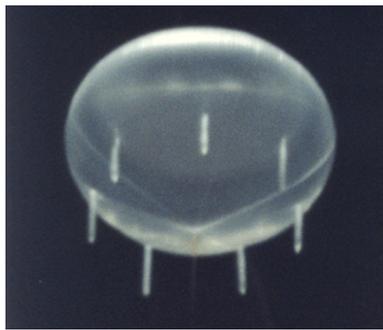
No Brasil, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem conduzido experimentos em balões estratosféricos desde 1969 [19]. Os experimentos estão concentrados nas áreas de Astrofísica, Aeronomia, Geofísica, Astrofísica Extragaláctica e Cosmologia O Grupo de Astrofísica de Altas Energias, da Divisão de Astrofísica do INPE, tem se dedicado a estudar a radiação X e gama, enquanto as pesquisas na área de geofísica estão concentradas em eletricidade atmosférica e precipitação de partículas no cinturão interno de radiação, estudando os efeitos da Anomalia do Atlântico Sul [20]. Também, o Setor de Lançamento de Balões (SLB) realiza diversos lançamentos em cooperação com instituições internacionais. Alguns desses lançamentos são vôos de longa duração, transoceânicos, entre o Brasil e a Austrália.

O primeiro lançamento de balão no Brasil foi realizado em 1966 [21]. Cientistas americanos, sob coordenação da *National Science Foundation* (NSF) e *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), lançaram um balão de alta altitude com o objetivo de estudar a camada de ozônio durante um eclipse solar. A princípio o lançamento seria realizado da cidade de Alegrete no Rio Grande do Sul (RS). Entretanto, devido às condições climáticas, o lançamento ocorreu no aeroporto da cidade

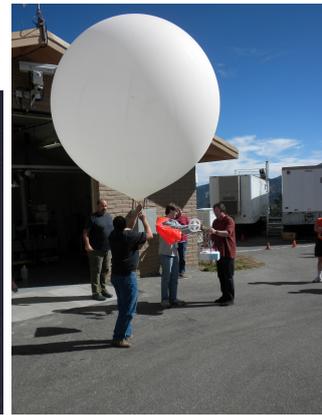
¹fonte: <http://www.hwoyee.com>



(a) Balão de Alta Pressão. *fonte: NASA*



(b) Balão de Pressão Zero. *fonte: NASA/CSBF*



(c) Balão-Sonda. *fonte: NASA/JPL*

Figura 1.6: Tipos de balões estratosféricos.



(a) Lançamento de balão estratosférico do INPE em São José dos Campos. *fonte: INPE*



(b) Lançamento de balão estratosférico do INPE de Cachoeira Paulista. *fonte: INPE*

Figura 1.7: Lançamento de balões científicos do INPE.

de Uruguaiana. Devido aos fortes ventos de superfície, que chegavam a 12m/s, o balão foi puxado das mãos da equipe antes que fossem finalizados os procedimentos de lançamento. Então, o vôo foi terminado após 2 horas, no momento do eclipse solar. Três dias após o primeiro lançamento, foram realizados outros dois, dessa vez da cidade de Alegrete. Ambos os lançamentos foram mal sucedidos, por problemas durante a passagem do experimento pela tropopausa.

Em junho de 1968 foi lançado o primeiro balão do INPE, com o objetivo de estudar os raios X estratosféricos [21]. O lançamento foi realizado de São José dos Campos, com uma carga útil de 30kg. O balão pousou na África do Sul, perto de Pretória, após alguns dias em flutuação. Até 1982 foram realizados mais de 35 lançamentos de São José dos Campos. Em 1982, as atividades de lançamento de balões foram transferidas para Cachoeira Paulista. Desde então, mais de 40 lançamentos já foram realizados, envolvendo também parceiros internacionais como a Agência Espacial Francesa (CNES), Agência Espacial Japonesa (JAXA) dentre outras instituições.

A infra-estrutura disponível em Cachoeira Paulista é mais adequada para o lançamento de balões: uma base de lançamento circular com aproximadamente 400m de diâmetro, favorável para

Tabela 1.1: Informações técnicas dos balões meteorológicos da Hwoyee.

Especificação	Peso (g)	Comprimento da abertura (cm)	Diâmetro da abertura (cm)	Diâmetro de ruptura (cm)
HY-140	140 + 20	9.0 ± 1,0	3,1 ± 0,3	≥ 200
HY-200	200 + 25	12.0 ± 2,0	3,5 ± 0,3	≥ 297
HY-300	300 + 30	12.0 ± 2,0	4,3 ± 0,3	≥ 430
HY-350	350 + 35	12.0 ± 2,0	4,4 ± 0,3	≥ 480
HY-500	500 + 45	12.0 ± 2,0	5,1 ± 0,3	≥ 580
HY-600	600 + 45	12.0 ± 2,0	5,4 ± 0,3	≥ 650
HY-750	750 + 45	13.0 ± 2,0	5,4 ± 0,3	≥ 690
HY-800	800 + 50	13.0 ± 2,0	5,7 ± 0,3	≥ 700
HY-1000	1000 + 100	13.0 ± 2,0	5,9 ± 0,3	≥ 800
HY-1200	1200 + 150	14.0 ± 2,0	6,0 ± 0,3	≥ 910
HY-1600	1600 + 150	14.0 ± 2,0	7,8 ± 0,43	≥ 1000
HY-2000	2000 + 200	14.0 ± 2,0	7,9 ± 0,4	≥ 1000
HY-3000	3000 + 200	14.0 ± 2,0	8,0 ± 0,4	≥ 1000

o lançamento de balões de médio porte e espaço suficiente para realizar lançamentos dinâmicos e semi-dinâmicos [21]. Dois veículos são utilizados para auxiliar as atividades: um caminhão grua, com um braço de 7m, utilizado para içar a carga útil e um veículo carretel, com sistemas para balões de 600.000m³ e 1.500.000m³. Ainda, dois hangares estão disponíveis para preparação de vôo, integração e montagem da carga útil, e um outro edifício para telemetria. O rastreamento do balão é feito por 2 sistemas, um deles transmite os dados de um GPS embarcado e o outro funciona como *beacon*, com modulação FSK, na frequência de 166,550 MHz [20]. Com relação ao TT&C, ambos operam em banda L. Um segundo TT&C é operado em *Ultra High Frequency* (UHF) e banda P. Grande parte dos lançamentos ocorre no período de novembro a março, com voos de duração entre 6 horas e 2 dias, dependendo da velocidade dos ventos na região. Normalmente, a carga útil é recuperada no oeste do estado do Paraná.

Outra instituição que também realiza lançamento de balões no Brasil é o Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMET), da UNESP-Bauru [21]. Os primeiros lançamentos foram realizados ainda em 1978, porém sem continuidade. Em 1991, a partir de uma colaboração entre a Academia de Ciências Russa e a Universidade de Campinas, surgiu o Grupo de Lançamento de Balões (GLB). Em 1993, com recursos da Universidade Estadual Paulista (UNESP) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), a infra-estrutura necessária para o lançamento de balões foi construída. Desde 1995 diversos experimentos são lançados, em cooperação com instituições internacionais como o *Centre National de la Recherche Scientifique* (CNRS) e o CNES. O grupo ainda conta com a ajuda de um helicóptero da Força Aérea Brasileira para realizar o resgate da carga útil. Atualmente, o GLB não está mais incluído na estrutura do IPMET, devido à aposentadoria do pesquisador chefe do grupo. Entretanto, futuras campanhas ainda podem ser realizadas utilizando a infraestrutura existente em Bauru, São Paulo.



(a) Telescópio MASCO erguido pelo caminhão grua. fonte: INPE



(b) Lançamento de balões do Projeto Loon do Piauí. fonte: <http://www.techguru.com.br/projeto-loon-piaui-e-o-1-estado-do-brasil-a-receber-projeto-de-internet-por-baloos/>

Figura 1.8: Lançamento de balões estratosféricos de diferentes localidades no Brasil.

Outras localidades no Brasil também foram utilizadas para lançamentos de balões. Em 1979, especialistas da Universidade de Wyoming e da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) desembarcaram em Quixeramobim, Ceará, para realizar o lançamento de um balão. O lançamento fazia parte de uma coleta de dados mundial, realizada no Alaska, Austrália, Pólo Sul e na região equatorial. No mesmo ano, o município de Juazeiro do Norte foi sede de uma campanha realizada pelo INPE, em cooperação com a NCAR. Aproximadamente 20 anos depois, em 1996, o programa de balões da NASA, representado pela antiga *National Scientific Balloon Facility* (NSBF), hoje denominada *Columbia Scientific Balloon Facility* (CSBF), escolheu o município para realizar lançamentos de experimentos próximo a linha do Equador. Na época, essa instituição realizou um investimento de 100.000 dólares para aprimorar a infraestrutura do local. No final da década de 90 alguns balões chegaram a ser lançados da região, porém, o alto custo, a complicada logística e a burocracia levaram ao fim da iniciativa. Em 2004, o município de Timon, Maranhão, foi escolhido para sediar uma campanha do INPE e do CNES. Devido às condições climáticas, o lançamento foi atrasado por 1 ano. A campanha de lançamento foi bem sucedida e foi cogitada a utilização da localidade para a realização de outros lançamentos.

Em 2006, a Universidade Federal de Santa Maria, com a colaboração do Centro Regional Sul (CRS/INPE), do grupo de Eletricidade Atmosférica da Divisão de Geofísica Espacial (ELAT) e do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), realizou o lançamento de 2 balões estratosféricos com o objetivo de estudar as características eletrodinâmicas das tempestades elétricas responsáveis pela geração de transientes na alta atmosfera. O primeiro lançamento não foi bem sucedido devido às condições climáticas. O segundo lançamento, realizado no mês seguinte, durou aproximadamente 10h, mas a carga útil não foi recuperada. Outras campanhas do experimento Sprite foram realizadas em outras regiões do Brasil. O aeroporto de Birigui, São Paulo e

o aeroporto Municipal de Poços de Caldas, Minas Gerais podem ser utilizados pelo INPE como locais de lançamento alternativos ao sítio de Cachoeira Paulista. Os lançamentos no aeroporto de Birigui são realizados no período de maio a setembro, na trajetória Oeste-Leste.

Os aeroportos de Uberaba e Nova Ponte, ambos em Minas Gerais, também foram utilizados como sítios de lançamento. O aeroporto de Nova Ponte, em especial, foi o local do lançamento do mais importante experimento de astrofísica, embarcado em um balão, desenvolvido no Brasil: o telescópio Máscara Codificada (MASCO) [22] [23] [24]. Com o objetivo de observar raios gama e raios X vindos de corpos cósmicos distantes, como buracos negros e estrelas de nêutrons, o MASCO foi lançado, com sucesso, em abril de 2004.

Recentemente, o projeto Loon do Google tem realizado alguns lançamentos no Brasil, com o intuito de levar conexão a internet a várias pessoas que vivem em áreas isoladas [25]. Foram realizados lançamentos principalmente na região Nordeste. No dia 16 de junho de 2014 foi realizado o primeiro teste com tecnologia *Long Term Evolution* (LTE), um marco para a equipe do projeto. Esses lançamentos, de caráter experimental, estão sendo acompanhados pelo Ministério das Comunicações, tendo em vista que a solução apresentada é uma das alternativas para a inclusão de milhares de brasileiros à internet. O interesse do projeto pelo Brasil também se justifica devido à importância dada pelos brasileiros à conexão com a internet.

1.3 Balloonsats

Balloonsats são balões-sonda que levam à estratosfera experimentos desenvolvidos por estudantes. Inicialmente proposto em 2000 por Chris Koehler, diretor do *Colorado Space Grant Consortium*, os *balloonsats* tem por objetivo oferecer aos estudantes o desafio de construir uma carga útil com os problemas típicos de projetos aeroespaciais, com um orçamento muito menor do que os projetos de pequenos satélites [7]. Os *ballonsats* podem ser utilizados para estudar condições atmosféricas, demonstrar o funcionamento de hardware em condições específicas, estudar os níveis de radiação na estratosfera, eficiência de células solares e muitas outras aplicações.

Segundo Koehler, um *balloonsat* deve pesar até 4000g e ter um custo de até 300 dólares. Entretanto, essa forma de definir os *balloonsats* pode ser precipitada, considerando que os gastos com o projeto podem ser bem maiores, dependendo da aplicação. Considerando que o lançamento será feito a partir de um balão meteorológico, e tendo em vista que o maior balão disponível comercialmente é o de 3000g, a massa da carga útil não deve ultrapassar 4000g. Assim, a massa do sistema é um parâmetro importante, devido ao empuxo necessário para levar os experimentos até a estratosfera. Na verdade, cumprir o requisito de massa é um dos maiores desafios em projetos de *balloonsat*. Um sistema de telemetria de longa distância é outro requisito. Assim, a solução mais frequente é adotar um sistema dentro da faixa do espectro utilizada por rádioamadores. Um outro requisito é não utilizar baterias de *lithium-ion*, devido ao risco de explosão oferecido, principalmente em condições adversas de temperatura e pressão. Ainda, é necessário cumprir os requerimentos da legislação vigente no país, com relação a documentação e procedimentos para realizar o lançamento de um balão estratosférico. Assim, é possível definir os seguintes requisitos



(a) Lançamento de múltiplos *balloonsats*.



(b) *Balloonsat* construído por estudantes da Virgínia, EUA.

Figura 1.9: Exemplos de *balloonsats*.

para *balloonsats*:

- 1) Massa da carga útil inferior a 4000g;
- 2) Sistema de telemetria de longa distância (>50km);
- 3) Não utilizar baterias de *lithium-ion*;
- 4) Cumprir a legislação vigente no país. (vide anexo)

Caso seja interessante fazer um lançamento com múltiplos *balloonsats*, é importante observar o limite de massa e distribuí-la uniformemente. Também, em um lançamento composto, é preciso ter um volume padrão para os experimentos, assim como um padrão para a conexão mecânica, garantindo a compatibilidade entre as diferentes cargas úteis na integração do balão.

O *Colorado Space Grant Consortium* começou o programa *Gateway to Space* no ano 2000 [7]. Um curso, aberto para todos os alunos, foi criado na *University of Colorado at Boulder*. Os estudantes são expostos desde os assuntos mais básicos relativos ao espaço até Projetos de Satélites. Membros da indústria e professores de vários cursos se revezam a cada uma das 15 semanas. O formato do curso busca replicar o processo de concepção, projeto, desenvolvimento, revisão, construção, testes e lançamento adotado por grande parte da indústria aeroespacial. Dessa forma, as equipes necessitam seguir uma cadeia de desenvolvimento que começa na submissão do projeto e passa pela *Preliminary Design Review* (PDR), *Critical Design Review* (CDR) e *Flight Readiness Review* (FRR). As etapas de desenvolvimento e os procedimentos tem um papel tão importante quando a execução do projeto e o próprio lançamento.

Um outro projeto em andamento é o Projeto Borealis, do *Montana Space Grant Consortium*. O projeto Borealis (*Balloon Outreach, Research, Exploration and Landscape Imaging System*) segue o mesmo modelo do projeto *Gateway to Space*. Desde 2004, estudantes da *Montana State University* e *University of Montana* elaboram experimentos que são lançados a partir de balões-sonda. Atualmente encontra-se em desenvolvimento experimentos com raios cósmicos, medição da velocidade

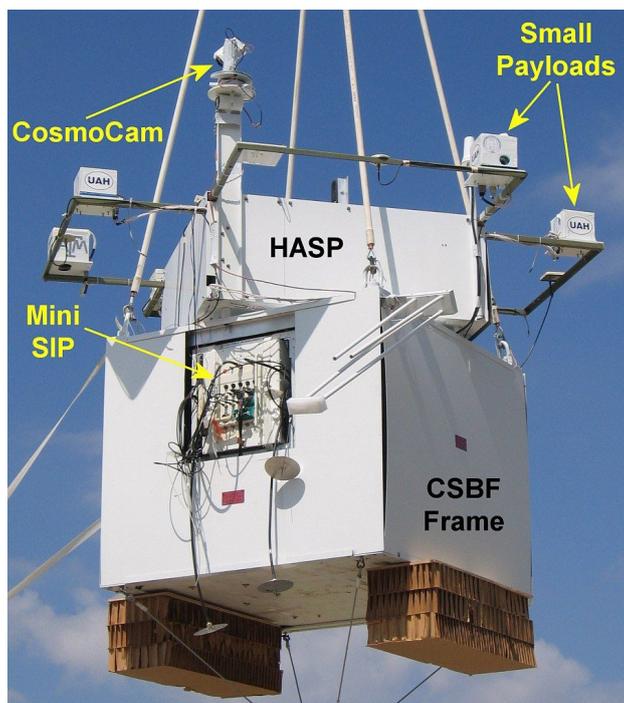


Figura 1.10: Carga útil do balão HASP.

do som, imageamento terrestre, controle de orientação e uma câmara de testes, para simular os efeitos da temperatura e pressão durante o voo.

Ainda nesse contexto, o *Louisiana Space Consortium* desenvolve um programa denominado *Aerospace Catalyst Experiences for Students* [26]. O diferencial desse programa está no lançamento dos experimentos desenvolvidos pelos estudantes. Com o intuito de estender o período de flutuação dos experimentos e atingir maiores altitudes, foi desenvolvida uma plataforma (*High Altitude Student Platform - HASP*) onde até 8 experimentos podem ser lançados [6]. Essa plataforma é integrada com uma estrutura da *Columbia Scientific Balloon Facility*, do ponto de vista mecânico e elétrico, e lançada por um balão de pressão zero. Os lançamentos tem o apoio tanto da *Columbia Scientific Balloon Facility* quanto do *NASA Balloon Program Office* e são realizados em Setembro, normalmente da base de Fort Sumner, Novo México, com um período de flutuação de mais de 16 horas.

Existem também várias outras iniciativas de desenvolvimento e compartilhamento de informações sobre *balloonsats*, muitas delas desenvolvidas por radioamadores, como *United Kingdom High Altitude Society*, *Edge of Space Sciences*, *High Altitude Science* e *Near Space*. O projeto LAICAnSat é membro de uma comunidade internacional denominada *Amateur Radio High Altitude Ballooning*. O site ² dessa comunidade possui registros de lançamentos de todos os seus membros, com informações detalhadas a respeito de vôos realizados em todo o mundo. Assim, utilizando as informações de cada vôo, as equipes são classificadas em *rankings*, de acordo com alguns parâmetros como altitude máxima alcançada, vôo com maior tempo de duração, entre outras. O LAICAnSat, hoje, detém a sexta melhor marca no quesito *Shortest Great Circle Distance, Release*

²<http://www.arhab.org/index.php>

to *Touchdown*, com a distância de 9,5km.

1.4 Descrição e objetivos do projeto

O LAICAnSat é um projeto que une o desenvolvimento de *balloonsats* e *cansats*, aproveitando as possibilidades de cada um dos sistemas. Assim, seu desenvolvimento é dividido em baixa altitude, denominado LAICAnSat-LAP, e alta altitude, denominado LAICAnSat-HAP. O LAICAnSat-HAP tem foco no sistema de aquisição de dados e nos procedimentos de lançamento de balões-sonda. O LAICAnSat-LAP tem como objetivo desenvolver o sistema de controle do paraquedas, visando, posteriormente, implementar um sistema de navegação, na aproximação para o pouso, para um balão de alta altitude. Essa divisão de linhas de desenvolvimento foi necessária devido à diferença de pressão e temperatura em baixa altitude e alta altitude.

A linha de desenvolvimento de baixa altitude, LAICAnSat-LAP tem o desafio de implementar um sistema capaz de guiar uma carga útil, no caso um *cansat*, para um determinado local de pouso. Assim, considerando que o paraquedas é a superfície de controle desse sistema, não é interessante abrí-lo em situações em que, por exemplo, os ventos estejam muito rápidos, como ocorre com frequência nas camadas mais altas da atmosfera, pois o sistema de controle não será efetivo. Ainda, a baixa pressão em ambientes de alta altitude não fornece a sustentação necessária para utilizar o paraquedas como superfície de controle. O salto estratosférico realizado por Felix Baumgartner é um bom exemplo dessa situação. O paraquedas quadrado utilizado por ele foi aberto na altitude de 1.524m [27]. Os dados de pressão obtidos nos experimentos também permitem concluir que a sustentação necessária para o paraquedas só é alcançada próximo a superfície. Por outro lado, o LAICAnSat-HAP, linha de desenvolvimento que será abordada nesse trabalho, tem o objetivo de desenvolver um sistema embarcado, que opere em altas altitudes, sujeito a variações de temperatura e pressão, capaz de fornecer dados meteorológicos e imagens para sensoriamento remoto. Para isso, o sistema é composto por diversos sensores, que serão descritos mais adiante. Além do desenvolvimento do sistema embarcado, o projeto possui como objetivo a definição de procedimentos operacionais, a escolha de um sistema de rastreamento e comunicação adequado e ainda o aprendizado técnico da equipe envolvida no lançamento do balão.

Nesse trabalho são apresentadas figuras obtidas de *softwares* da empresa Google, especificamente o Google *Maps* e o Google *Earth*. Essas figuras são utilizadas para fins didáticos, sem fins lucrativos ou comerciais, enriquecendo o trabalho realizado, e não são indispensáveis para a apresentação dos resultados obtidos, portanto não representam uma quantidade significativa de informações, se comparado a totalidade da obra. Por esses motivos, é do entendimento do autor que a utilização das figuras de *softwares* da empresa Google, nesse trabalho, está respaldada pelo princípio do *fair use*, definido pelo §107 do *Copyright Act*³ de 1976. No texto também são utilizadas figuras disponibilizadas pela NASA. Segundo a Agência Espacial Americana, as imagens podem ser utilizadas para fins educacionais e informativos, como acontece nessa obra⁴.

³<http://www.copyright.gov/fls/fl102.html>

⁴<http://www.nasa.gov/multimedia/guidelines/index.html>

Capítulo 2

Fundamentação Teórica e Desenvolvimentos Preliminares

It is really quite impossible to say anything with absolute precision, unless that thing is so abstracted from the real world as to not represent any real thing.

Richard Feynman

Nesse capítulo é apresentado inicialmente uma modelagem de vôo de balões estratosféricos na Sessão 2.1. Em seguida, são apresentados o *hardware* e o *software* desenvolvido para o projeto LAICAnSat. São também discutidas abordagens diferentes para a solução de alguns problemas típicos de *balloonsats* e balões estratosféricos em geral, como comunicação, rastreamento e controle térmico da carga útil. A Sessão 2.2 apresenta inicialmente conceitos gerais sobre o processo de concepção e desenvolvimento de um equipamento ou projeto e específica, posteriormente em suas subsessões, o hardware utilizado para atender os requisitos estabelecidos para o LAICAnSat. A Sessão 2.3 descreve a estrutura geral do *software* desenvolvido para a aquisição dos dados em vôo.

2.1 Modelo de vôo de balões estratosféricos

Para determinar o modelo de vôo de um balão é necessário modelar as forças que agem sobre o balão, assim como os fenômenos físicos que influenciam a dinâmica do vôo, como, por exemplo, as mudanças de temperatura do gás dentro do balão e, principalmente, os ventos. A modelagem apresentada nessa sessão segue o desenvolvimento realizado em [1]. Devido à dificuldade associada a determinação de alguns parâmetros, o balão será tratado como um ponto material, quando modeladas as forças agindo sobre ele [1]. Porém, ao modelar os efeitos do arrasto e pressão, serão considerados os gradientes de temperatura e o formato do balão, devido ao grande prejuízo ao modelo em não se considerar essas variáveis, nesse caso.

Considere o sistema de coordenadas mostrado na Figura 2.1. Vetores unitários, em cada eixo (x , y e z), são representados por i , j , k , respectivamente. Portanto, a posição do balão é representada por (x_b, y_b, z_b) , o vetor velocidade é representado por v_b , e tem componentes (v_{bx}, v_{by}, v_{bz}) . Ainda,

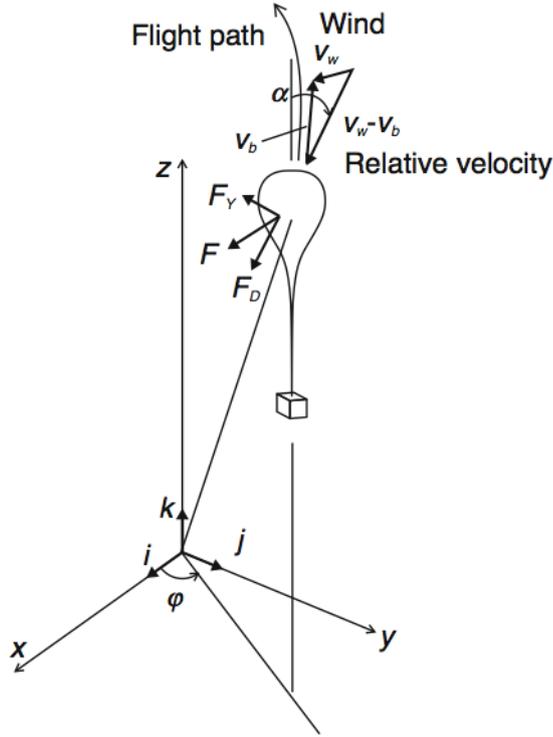


Figura 2.1: Modelo do balão estratosférico [1].

o vetor que representa a velocidade do vento v_w , tem componentes (v_{wx}, v_{wy}, v_{wz}) . A subtração do vetor velocidade do vento v_w e do vetor velocidade v_b , tem como resultado o vetor velocidade relativa do vento.

A força aerodinâmica que atua sobre o balão, representada pelo vetor F , pode ser decomposta em F_D e F_Y , como representado na Figura 2.1. A componente F_D atua paralelo ao vetor de velocidade relativa do vento e a componente F_Y atua perpendicularmente ao vetor velocidade relativa do vento. Assim,

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_a |v_w - v_b|^2 C_D A_b \quad (2.1)$$

e

$$F_Y = \frac{1}{2} \rho_a |v_w - v_b|^2 C_Y A_b, \quad (2.2)$$

em que A_b é a maior secção perpendicular ao eixo do balão, que varia de acordo com o formato do balão. O termo ρ_a representa a densidade atmosférica. O ângulo de ataque do balão α é definido como o ângulo formado entre o vetor velocidade relativa $v_w - v_b$ e o vetor unitário k . O parâmetro C_D representa o coeficiente de arrasto do balão e C_Y o coeficiente de força lateral. Os termos C_D e C_Y dependem do ângulo de ataque α , do formato do balão e do número de Reynolds Re_b , dado pela equação

$$Re_b = \frac{\rho_a D_b |v_w - v_b|}{\mu_a}, \quad (2.3)$$

em que D_b é o diâmetro do balão e μ_a é o coeficiente de viscosidade do ar.

Se tomarmos o ângulo φ , representado na Figura 2.1, como o ângulo entre o vetor i e a projeção do vetor velocidade relativa $v_w - v_b$ no plano xy , e ainda assumir F_x , F_y e F_z como os componentes do vetor F , que representa a força aerodinâmica no balão, temos:

$$F_x = (F_D \operatorname{sen} \alpha + F_Y \operatorname{cos} \alpha) \operatorname{cos} \varphi, \quad (2.4)$$

$$F_y = (F_D \operatorname{sen} \alpha + F_Y \operatorname{cos} \alpha) \operatorname{sen} \varphi, \quad (2.5)$$

$$F_z = -F_D \operatorname{cos} \alpha + F_Y \operatorname{sen} \alpha. \quad (2.6)$$

Definindo m_b como a massa do balão, m_p como a massa da carga útil, m_c a massa do contrapeso e m_G como a massa bruta do sistema. Assim,

$$m_G = m_b + m_p + m_c. \quad (2.7)$$

Logo, a massa total do sistema é

$$m_t = m_G + m_g, \quad (2.8)$$

em que m_g representa a massa do gás. A massa m_v é igual a soma de m_t e a massa adicional que surge devido à inércia do fluido em torno do corpo em movimento. Seu efeito é proporcional às acelerações do corpo em análise.

$$m_v = m_t + C_m \rho_a V_b, \quad (2.9)$$

em que V_b é o volume do balão. Então, as equações que descrevem o movimento do balão são:

$$m_v \frac{d^2 x_b}{dt^2} = F_x, \quad (2.10)$$

$$m_v \frac{d^2 y_b}{dt^2} = F_y, \quad (2.11)$$

$$m_v \frac{d^2 y_b}{dt^2} = (\rho_a V_b - m_t)g + F_z. \quad (2.12)$$

Assumindo um gás ideal, a densidade atmosférica ρ_a é obtida pela fórmula

$$\rho_a = \frac{M_a p_a}{RT_a}, \quad (2.13)$$

em que p_a é a pressão atmosférica, T_a é a temperatura atmosférica, M_a é a massa molar do ar e R é a constante universal dos gases. Se o gás dentro do balão for considerado ideal, o volume do balão pode ser dado por

$$V_b = \frac{m_g R T_g}{M_g p_g}, \quad (2.14)$$

em que M_g é a massa molar do gás dentro do balão, T_g é a temperatura e p_g é a pressão. Para determinar a temperatura do gás dentro do balão T_g é necessário levar em consideração a troca de calor entre o interior e o exterior do balão. Assumindo q_e como o quantidade de calor que flui para dentro do balão e q_g como a quantidade de calor que flui para o gás dentro do balão, a temperatura da superfície do balão T_e e a temperatura do gás podem ser expressas por:

$$m_e c_e \frac{dT_e}{dT} = q_e, \quad (2.15)$$

$$m_g c_{pg} \frac{dT_g}{dT} = q_g + V_b \frac{dp_g}{dt}, \quad (2.16)$$

em que m_e é a massa do envelope do balão, c_e é o calor específico da superfície do balão, e c_{pg} é o calor específico do gás dentro do balão, a pressão constante. Utilizando a equação (2.14) e a equação que segue

$$dp_a = -\rho_a g dz, \quad (2.17)$$

é possível escrever a relação entre a pressão atmosférica e a densidade. Então, a equação (2.16) pode ser rescrita como

$$m_g \frac{dT_g}{dT} = \frac{q_g}{c_{pg}} - \frac{g M_a m_g T_g}{c_{pg} T_a M_g} \frac{dz_b}{dt}. \quad (2.18)$$

2.1.1 Movimento vertical de balões estratosféricos

A dinâmica vertical de balões de alta altitude pode ser definido por duas situações distintas: flutuação estável e deslocamento na direção vertical. Considerações a respeito de ambas as situações e sobre a taxa de ascensão e *free lift* são apresentadas abaixo.

1) Condição de flutuação estável

Quando um balão está flutuando a uma certa altitude, a equação (2.12) representa o balanço estático.

$$(\rho_a V_b - m_t)g = 0. \quad (2.19)$$

Considerando a atmosfera como um gás ideal, essa equação pode ser reescrita utilizando as equações (2.13) e (2.14), assim:

$$\frac{m_t}{m_g} = \frac{M_a p_a T_g}{M_g p_g T_a}. \quad (2.20)$$

Ainda, é possível definir a razão M entre as massas molares dos gases, a razão P entre a pressão do gás e a pressão atmosférica e a razão T entre a temperatura do gás e a temperatura da atmosfera:

$$\tilde{M} = \frac{M_a}{M_g}, \quad (2.21)$$

$$\tilde{p}_g = \frac{p_g}{p_a}, \quad (2.22)$$

$$\tilde{T}_g = \frac{T_g}{T_a}. \quad (2.23)$$

Pela Equação (2.20) é possível obter a condição geral de flutuação:

$$\frac{m_t}{m_g} = \frac{\tilde{T}_g \tilde{M}}{\tilde{p}_g}. \quad (2.24)$$

2) Deslocamento na direção vertical

A equação de deslocamento na direção vertical (2.12) pode ser reescrita como

$$(m_t + C_m m_g \tilde{M} \frac{\tilde{T}_g}{\tilde{p}_g}) \frac{d^2 z_b}{dt^2} = (m_g \tilde{M} \frac{\tilde{T}_g}{\tilde{p}_g} - m_t)g + F_z. \quad (2.25)$$

3) Taxa de ascensão do balão e *free lift*

Quando um balão sobe a velocidade constante, ou seja, tem *free lift* positivo, a equação (2.25) pode ser reescrita como

$$(m_g \tilde{M} \tilde{T}_g - m_t)g + F_z = 0 \quad (2.26)$$

Utilizando a equação a seguir

$$V_b = m_g \frac{\tilde{M} \tilde{T}_g}{\rho_a}, \quad (2.27)$$

a taxa de ascensão é dada por

$$v_{bz} = \sqrt{2 \frac{m_g \tilde{M} \tilde{T}_g - m_t}{\rho_a C_D A_b} g}. \quad (2.28)$$

Se o formato do balão for aproximado para o formato de uma esfera, a expressão anterior se torna

$$v_{bz}^2 = 4 \left(\frac{2}{9\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{g}{C_D} \left(\frac{m_t}{\rho_a} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{(1 + \tilde{f}) \tilde{T}_g - 1}{(1 + \tilde{f})^{\frac{2}{3}} \tilde{T}_g^{\frac{2}{3}}} \quad (2.29)$$

em que \tilde{f} é a razão entre *free lift* e a aceleração devido a gravidade, de todo o sistema, incluindo a massa do gás. A velocidade quando o balão é lançado, $v_{bz,0}$, pode ser obtida quando $\tilde{T}_g = 1$. Assim,

$$v_{bz,0}^2 = 4 \left(\frac{2}{9\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{g}{C_D} \left(\frac{m_t}{\rho_a} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\tilde{f}_0}{(1 + \tilde{f}_0)^{\frac{2}{3}}} \quad (2.30)$$

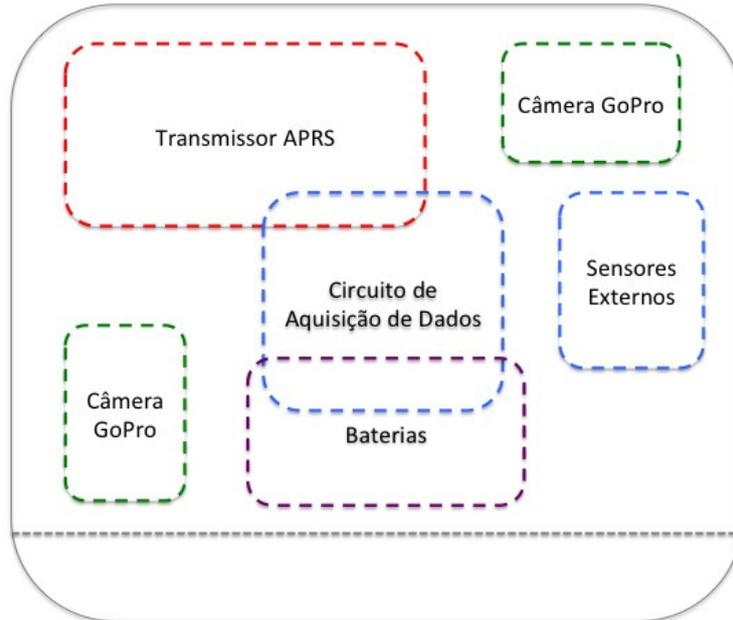


Figura 2.2: Diagrama representando a disposição dos componentes.

2.2 Descrição do *hardware*

A escolha do hardware para a implementação de um projeto, em geral, tem como foco atender os requisitos mínimos, buscando alcançar os objetivos que justificam o financiamento do projeto. Dessa forma, numa fase inicial, devem ser levantados os requisitos necessários para alcançar os objetivos propostos, com o intuito de eliminar ou antecipar problemas. Ainda que o projeto não seja passível de ser completamente definido, e que algumas variáveis ainda possam dificultar o sucesso da missão, é preciso tomar decisões que forneçam margem e flexibilidade na execução do projeto. Portanto, o desenvolvimento de projetos proporciona a experiência necessária para fazer escolhas que contribuam para alcançar o objetivo final.

Desenvolver hardware para aplicações aeroespaciais tem requisitos extras que devem ser considerados na especificação dos componentes. Os experimentos científicos conduzidos ainda no início da exploração espacial mostraram que as condições de temperatura, pressão e os efeitos da radiação variam bastante de acordo com a altitude. O Brasil, em especial, possui grande parte do seu território na região afetada pela Anomalia Magnética do Sul, aumentando consideravelmente os efeitos da radiação em equipamentos operando a uma certa altitude nessa região. Também, a variação de pressão e temperatura devem ser levadas em consideração para a previsão do comportamento térmico dos subsistemas dentro da carga útil. Grande parte do balanço térmico dos aparelhos que são operados no cotidiano é baseado no princípio da condução do calor pelas moléculas de ar. Entretanto, em níveis de pressão quase 100 vezes menores que do nível do mar, o que significa que a quantidade de moléculas presentes no ar é muito pequeno, o princípio da condução, utilizando

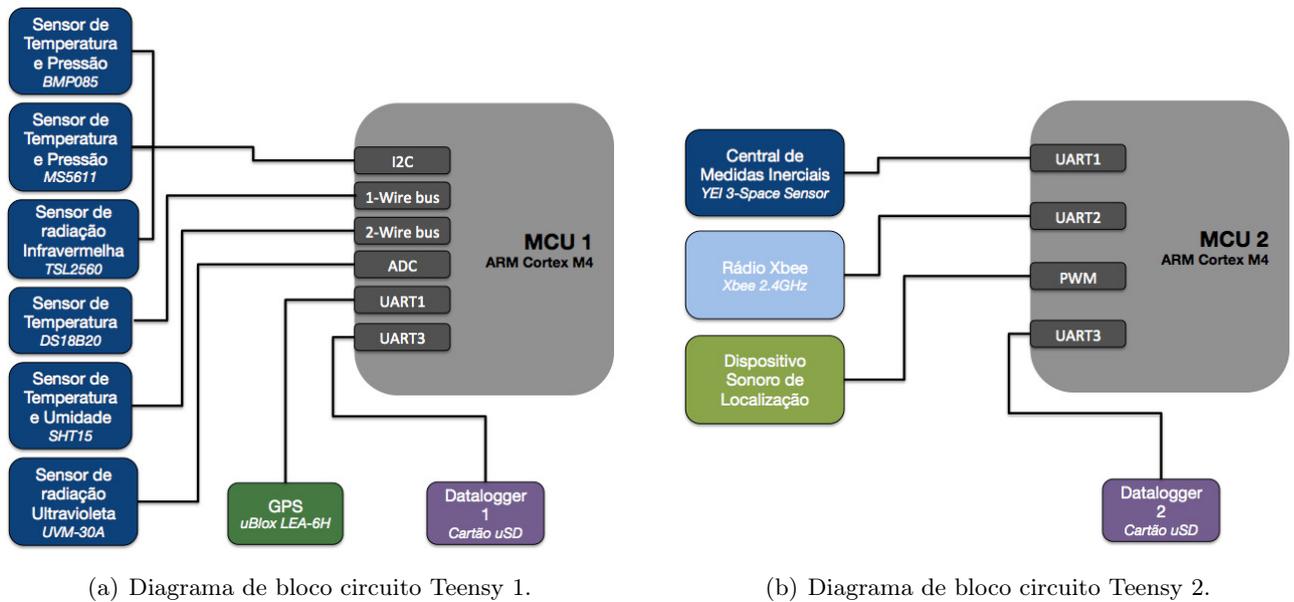


Figura 2.3: Diagramas de bloco apresentando as conexões dos microcontroladores com os demais dispositivos do sistema.

as moléculas de ar, se mostra muito ineficiente. Assim, outros mecanismos de dissipação de calor (*heat pipes*, por exemplo) devem ser implementados, caso o equipamento possua um ou mais componentes que dissipem muito calor. Por outro lado, subsistemas ou componentes que quase não dissipam calor devem ter um isolamento térmico para que não atinjam temperaturas muito baixas, comprometendo seu funcionamento.

De forma geral, o hardware desenvolvido para o projeto LAICAnSat tem como requisitos:

- 1) Manter a temperatura dos componentes eletrônicos entre -5°C e $+50^{\circ}\text{C}$;
- 2) Rastrear o balão em todos os momentos do voo;
- 3) Obter telemetria dos sensores embarcados;
- 4) Taxa de descida igual ou inferior a 5m/s , abaixo de 3km de altitude;
- 5) Massa total inferior a 4000g ;

A Figura 2.2 apresenta a disposição dos subsistemas no *payload*, da maneira como foi realizado nos dois lançamentos. Os subsistemas estão contidos em uma caixa de isopor utilizada como isolante térmico. A partir dos requisitos do sistema, foi implementado o circuito descrito nos diagramas de bloco apresentados na Figura 2.3. Os subsistemas serão apresentados com mais detalhes nas subseções que seguem. O Anexo I e os arquivos disponibilizados no CD contém informações adicionais a respeito dos componentes eletrônicos e do circuito desenvolvido.

2.2.1 Computador de bordo

O computador de voo, ou subsistema *On-board Data Handling* (OBDH), tem como objetivo gerenciar os processos do *balloonsat*. Esses processos podem ser requisição e armazenagem de dados



(a) Bateria *Lithium Iron Phosphate* (LiFePO_4 ou LFP). fonte: <http://turnigy.com/batteries/nano-tech/>



(b) Baterias *Lithium Iron Disulfide* (LiFeS_2). fonte: <http://energizer.com>

Figura 2.4: Baterias utilizadas nos subsistemas do LAICAnSat.

de sensores, sinais para ativação de atuadores, envio e recebimento de mensagens para o TT&C, entre outros. Para desempenhar essa função, foi escolhido um microcontrolador ARM Cortex M4 de 32 bits, com clock de 48MHz, implementado numa plataforma denominada Teensy. Existem muitas opções de microcontroladores para desempenhar a função de computador de bordo e é possível pensar ainda em implementar uma *Field-Programmable Gate Array* (FPGA). Entretanto, alguns pontos contribuíram para a escolha desse microcontrolador. A facilidade de programação (linguagem C/C++), a compatibilidade com o *Integrated Development Environment* (IDE) do Arduino e FreeRTOS foram fatores determinantes para a escolha do Teensy, devido ao tempo de desenvolvimento ser menor, sendo possível utilizar várias bibliotecas disponíveis, e também visando a continuidade do projeto, tendo em vista que a IDE do Arduino é hoje uma das mais utilizadas por estudantes. Além das vantagens já descritas, o Teensy possui outras características importantes, dentre as quais é interessante destacar 14 entradas analógicas de alta resolução, 10 saídas *Pulse Width Modulation* (PWM), 3 portas *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART) e comunicação *Inter-Integrated Circuit* (I2C).

No circuito desenvolvido para o LAICAnSat, foram implementados dois microcontroladores: um dedicado para o subsistema de Controle e Determinação de Atitude (ADCS), e outro responsável pela aquisição dos dados meteorológicos e *housekeeping*. Os dispositivos estão conectados aos microcontroladores de acordo com a disposição apresentada em (a) e (b) na Figura 2.3.

2.2.2 Subsistema de energia

O subsistema de energia, também conhecido como *Electrical Power System* (EPS), é constituído de bateria e circuito de condicionamento de sinal. O LAICAnSat não utiliza painéis solares para a geração de energia, apesar de ser possível adaptar o sistema para essa funcionalidade. Um aspecto importante para o subsistema de energia são as consequências de estresses térmico, mecânico e elétrico da bateria. Nesse aspecto, as baterias de íon de Lítio (Li-Ion ou LIB), muito utilizadas nos equipamentos eletrônicos como celulares, não demonstram ser uma opção viável. As baterias

Tabela 2.1: Informações técnicas da bateria Turnigy nano-tech 2100mAh.

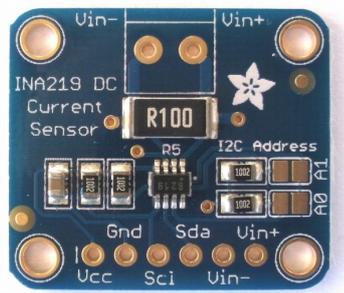
Capacidade	2100 mAh
Tensão	6.6V
Configuração	2S1P
Descarga (regime)	20C
Descarga (transiente)	40C
Peso	103g
Dimensões	80 x 44 x 16mm

de Li-Ion são muito vulneráveis a estresses mecânicos e térmicos, tendo como consequência a denominada *thermal runaway*, fenômeno no qual as células da bateria descarregam instantaneamente toda a energia armazenada. Normalmente, o *thermal runaway* representa uma reação exotérmica, implicando em fogo em determinadas situações. Esse fenômeno já foi observado em algumas ocasiões, mais recentemente na falha do sistema elétrico de um Boeing 787 operado pelas Linhas Aéreas Japonesas.

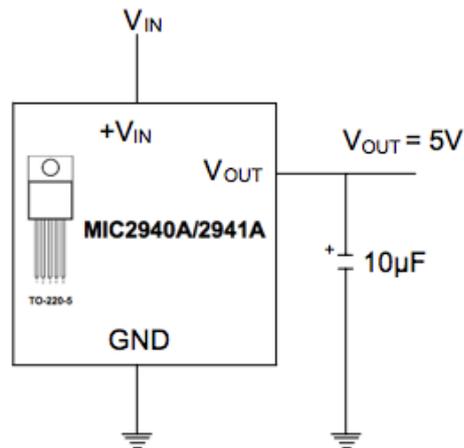
As baterias *Lithium Iron Phosphate* ($LiFePO_4$ ou LFP), apresentadas na Figura 2.4(a), são uma alternativa interessante às baterias de Li-Ion. Apresentam maior estabilidade a estresses térmicos e mecânicos, também devido a ligação $Fe - P - O$ ser mais forte que a ligação $Co - O$, presente nas baterias Li-Ion. Apesar da densidade de energia das baterias LFP ser aproximadamente 14% menor, é possível encontrar muitas aplicações para elas. Além das características já levantadas, a dimensão e a massa também foram levadas em consideração para a escolha da bateria. Depois de comparar alguns modelos de LFP, foi escolhida a Turnigy nano-tech, com capacidade de 2100mAh. Essa bateria possui as características apresentadas na Tabela 2.1.

Um outro tipo de bateria foi utilizado para o TT&C devido aos requisitos de tensão para transmissão a 5W. Foram utilizadas baterias *Lithium Iron Disulfide* ($LiFeS_2$), que possuem mais massa que as baterias LFP, mas são mais estáveis termicamente. Devido a importância desse subsistema, principalmente nos primeiros lançamentos, foram utilizadas as baterias recomendadas, apresentadas na Figura 2.4(b). Em lançamentos futuros está prevista a substituição das baterias $LiFeS_2$ por baterias LFP. Um ponto que deve ser verificado e testado é a influência do momento da transmissão do rádio na operação dos demais dispositivos do circuito. O rádio, no momento da transmissão, tende a drenar uma quantidade muito maior de corrente instantaneamente, o que faz com que aconteça uma queda de tensão momentânea nas baterias. Caso essa queda de tensão venha a ser considerável, é possível que o sistema reinicie a cada transmissão do rádio, devido aos níveis baixos de tensão atingidos. Caso isso seja confirmado, uma das alternativas é adicionar um capacitor ao circuito de alimentação, com tempo de descarga suficiente para manter a tensão necessária durante a transmissão. Por outro lado, é necessário atenção ao selecionar o capacitor para exercer essa função. Capacitores eletrolíticos perdem suas propriedades muito rapidamente com a queda de temperatura, e alguns podem não suportar a baixa pressão da estratosfera.

Para o monitoramento do subsistema de energia, foram implementados sensores de corrente



(a) Sensor de corrente e tensão INA219. *fonte: <http://adafruit.com>*



(b) Circuito de referência do regulador de tensão MIC2941. *fonte: MIC2941 datasheet*

Figura 2.5: Sensor de corrente e tensão e detalhe do circuito de referência do regulador de tensão utilizado no subsistema de energia.

e tensão. O sensor de potência escolhido foi o INA219, da *Texas Instruments* (Figura 2.5(a)). Esse sensor já possui um conversor Analógico-Digital implementado, assim como uma porta de comunicação I2C. Portanto, a interface com o sensor é realizada de forma digital, diminuindo a chance de interferência nas medidas. O INA219 é capaz de fazer medidas de tensão de 0V a 26V e correntes de 3.2A, consumindo no máximo 1mA. Ainda, sua temperatura de operação varia de -40°C a $+125^{\circ}\text{C}$. Um sensor foi instalado para monitorar a tensão e corrente da bateria, e um segundo sensor foi instalado para monitorar a tensão e corrente de saída do regulador de tensão.

O regulador de tensão, mostrado na Figura 2.5(b) tem como função condicionar a tensão de saída da bateria para o nível de tensão desejado na entrada dos componentes dos subsistemas, nesse caso 5V. Dentre os diversos reguladores de tensão existentes, o MIC2941, da MICREL foi o selecionado. Esse regulador pode fornecer até 1.25A na tensão de saída, tem um bom rendimento, que implica em baixa dissipação de calor, e o mais importante, tem um coeficiente de temperatura muito baixo. Dessa forma, o MIC2941 consegue manter a tensão de saída praticamente constante, mesmo que a temperatura varie consideravelmente. Essa característica, como já foi dito anteriormente, é de extrema importância para o projeto do sistema do LAICAnSat. Caso seja necessário fornecer uma corrente superior a 1.25A, é possível implementar conversores DC-DC no subsistema de energia, mas é preciso verificar o comportamento térmico desses dispositivos.

2.2.3 Sensores

O LAICAnSat possui sensores de temperatura, pressão, umidade, sensores ópticos, sensores de atitude e sensores utilizados para *housekeeping*. Os sensores meteorológicos são responsáveis por coletar os dados ambientais, como temperatura, pressão e umidade. Os sensores ópticos são utilizados para captar as imagens da superfície terrestre. Os sensores de atitude, acelerômetro,

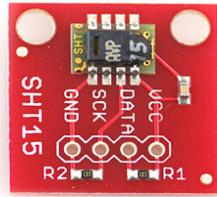
giroscópio e magnetômetro registram dados que permitem reconstruir a atitude da carga útil. Os sensores utilizados para *housekeeping* medem a temperatura de alguns componentes críticos do sistema, como o regulador de tensão e as baterias. Dessa forma é possível ter informações suficientes para detectar e identificar falhas no sistema durante seu funcionamento.

Alguns sensores de temperatura foram utilizados para obter dados durante o voo. Foram escolhidos sensores que utilizassem, de preferência, um ADC dedicado e comunicação digital para a leitura dos dados, com o intuito de minimizar o caminho percorrido por sinais analógicos no circuito. Um dos sensores de temperatura utilizados é o SHT15, da Sensirion, mostrado na Figura 2.6(a). Na verdade, esse sensor fornece informações de temperatura e umidade, utilizando comunicação digital *2-Wire bus*. Algumas características que se destacam nesse sensor são a precisão das medidas e o baixo consumo de energia. Também foi implementado o sensor de temperatura e pressão BMP085, da Bosch, Figura 2.6(b). Esse sensor é um dos mais utilizados no mercado, pelo preço competitivo, dada a precisão e a taxa de leitura. O BMP085 é calibrado pela própria fábrica, e opera, segundo o *datasheet*, na faixa de 30kPa a 110kPa. Ainda, a tecnologia piezo-resistiva utilizada na topologia do sensor permite maior robustez a compatibilidade eletromagnética, mais precisão e linearidade. Esse sensor possui um ADC interno e interface de comunicação digital I2C. Apesar da indicação do *datasheet* de que o sensor realiza medidas apenas na faixa de 30kPa a 110kPa, o que corresponde a altitudes de 9km a -0.5km (abaixo do nível do mar), esse sensor já foi utilizado em diversos projetos de *balloonsats* e, como será apresentado mais adiante, produziu resultados satisfatórios em condições de pressão bem abaixo das recomendadas pelo fabricante.

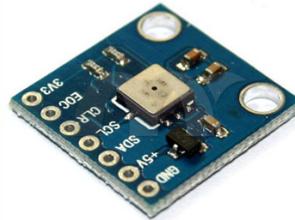
O MS5611, apresentado na Figura 2.7(a), é um sensor de temperatura e pressão de alta precisão, fabricado pela Measurement Specialties. Esse sensor opera na faixa de pressão entre 1kPa e 120kPa. Assim, é possível obter dados de pressão em altitudes que variam de 50km a -4.5km (abaixo do nível do mar). Apesar dessa vantagem, não foram encontrados registros de *balloonsats* utilizando esse sensor em vôos. A comunicação com o sensor pode ser feita por I2C ou por *Serial Peripheral Interface* (SPI). O DS18B20 é um sensor de temperatura com faixa de operação entre -55°C a +125°C, com resolução de até 12 bits. A vantagem desse sensor, exibido na Figura 2.7(b), é a funcionalidade de conectar até 20 dispositivos em série, devido a comunicação digital denominada *1-Wire bus*. Dessa forma, ele é muito utilizado para *housekeeping*, mantendo os registros de temperatura de componentes em todo o circuito.

Outros sensores foram utilizados para fornecer informações a respeito da radiação infravermelho e ultravioleta. A princípio a radiação infravermelha é absorvida pelas moléculas de água presentes na troposfera. Entretanto, a 12km de altitude, mais de 80% do espectro infravermelho já está acessível, justificando, por exemplo, as observações realizadas com o Boeing 747SP, denominado *Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy* (SOFIA). Uma parte da radiação ultravioleta também é absorvida antes de atingir a superfície terrestre. A camada de ozônio, localizada na faixa de 20 a 30km de altitude, filtra por completo a radiação ultravioleta C (100 - 280nm) e grande parte da radiação ultravioleta B (280 - 315nm), mas não filtra a radiação ultravioleta A (315 - 400nm).

O sensor de luminosidade TSL2561, da TAOS, exibido na Figura 2.8(a), contém um fotodiodo



(a) Sensor de temperatura e umidade SHT15. fonte: <http://sparkfun.com>

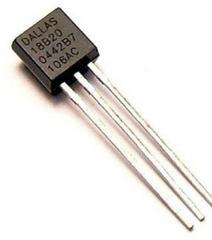


(b) Sensor de temperatura e pressão BMP085. fonte: <http://nyplatform.com>

Figura 2.6: Sensores de temperatura e umidade e temperatura e pressão.



(a) Sensor de temperatura e pressão MS5611. fonte: <http://dx.com>



(b) Sensor de temperatura DS18B20. fonte: <http://kiatronics.com>

Figura 2.7: Sensor de temperatura e pressão e sensor de temperatura.

que é sensível às ondas no espectro visível de luz e no infravermelho, e um fotodiodo que é sensível apenas às ondas no infravermelho. Assim, é possível medir a variação da incidência das ondas no infravermelho com a altitude. A sensibilidade dos fotodiodos está representado na Figura 2.8(b). Esse sensor se comunica com o microcontrolador através do protocolo I2C.

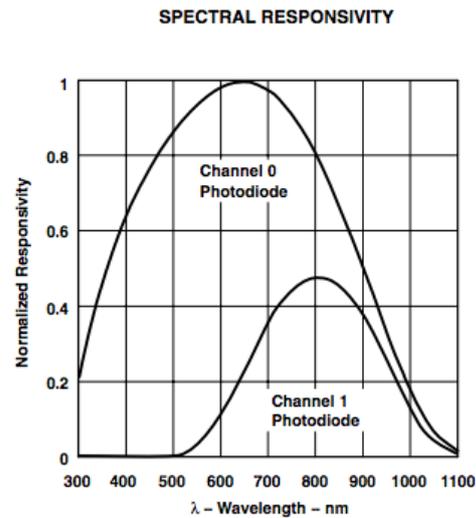
O sensor de ultravioleta utilizado é o UVM-30A, mostrado na Figura 2.9(a). Basicamente, o sensor é um fotodiodo sensível a radiação no comprimento de onda do ultravioleta. A sensibilidade do sensor compreende a faixa de 200 a aproximadamente 370nm. Essa porção do espectro abrange o ultravioleta C, o ultravioleta B e parte do ultravioleta A, como apresentado na Figura 2.9(b). As informações do UVM-30A são obtidas através de um ADC do microcontrolador.

2.2.3.1 Sensor óptico

O sensor óptico utilizado tem a função de imagear a superfície terrestre. A câmera GoPro Hero 3 Black edition, Figura 2.10(a), foi escolhida para desempenhar essa função. Durante a escolha desse sensor não existiu um quesito que foi decisivo, mas uma série de características que foram avaliadas de acordo com as qualidades da câmera. Dessa forma, a massa, volume, duração da bateria e qualidade da imagem foram decisivos para essa decisão. Essa câmera utiliza um sensor CMOS, o IMX117 BSI da Sony. Os elementos individuais do sensor (*pixel*) medem $1.55\mu\text{m}$ e estão



(a) Sensor de radiação Infravermelha TSL2561. fonte: <http://adafruit.com>



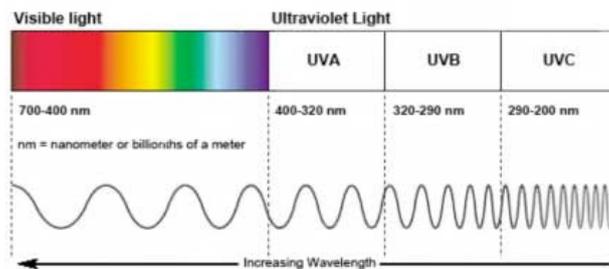
(b) Sensibilidade dos fotodiodos do sensor TSL2561. fonte: *TSL2561 datasheet*

Figura 2.8: Sensor de radiação infravermelha e gráfico mostrando a sensibilidade do sensor para determinados comprimentos de onda.

depositados em um substrato cerâmico iluminado, formando uma matriz de 4024 colunas por 3036 linhas. A maior imagem capaz de ser obtida por esse sensor tem 12 *megapixels* (MP), dependendo das opções selecionadas pelo usuário. Também é possível gravar vídeos com essa câmera, com 120 *frames per second*(fps) em 720p, até 60fps em 1080p. A câmera é ainda impermeável e projetada para operar em condições adversas. Apesar da bateria da GoPro apresentar um tempo de duração superior a 1 hora, no modo vídeo, é necessário adicionar uma bateria externa conectada a porta mini-USB da câmera, para garantir que ela funcionará durante todo o vôo.



(a) Sensor de radiação ultravioleta UVM-30A. fonte: <http://dx.com>

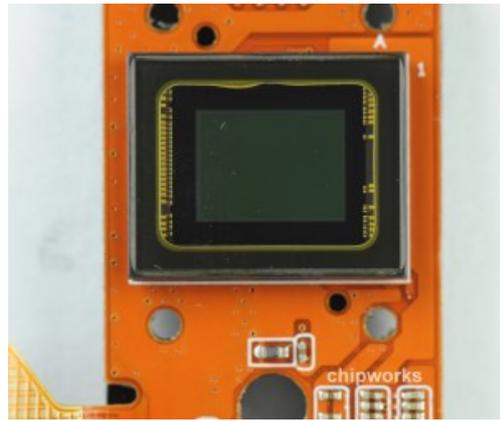


(b) Representação dos tipos de radiação ultravioleta. fonte: <http://skincancer.com>

Figura 2.9: Sensor de radiação ultravioleta e especificação das diferentes faixas de ultravioleta, de acordo com o comprimento de onda.



(a) GoPro Hero 3 Black edition. fonte: <http://vitalmtb.com>



(b) Sensor CMOS IMX117 BSI da Sony. fonte: <http://chipworks.com>

Figura 2.10: Imagem da câmera GoPro e detalhada do sensor CMOS responsável pelas imagens obtidas.

2.2.3.2 Sensores de determinação de atitude

A unidade YEI 3-Space Sensor é uma Central de Medidas Inerciais (CMI) que utiliza um giroscópio de 3 eixos, um acelerômetro de 3 eixos e um magnetômetro de 3 eixos. O microcontrolador presente nessa unidade processa os dados desses sensores e utiliza filtro de Kalman e a representação em quaternions para fornecer uma orientação absoluta da carga útil. Os dados obtidos podem ser fornecidos em quaternions, ângulos de Euler ou matriz de rotação. A comunicação ainda pode ser feita por SPI, USB 2.0 ou UART. Algumas outras características são apresentadas na Tabela 2.2. As informações obtidas por esses sensores podem ser utilizadas para estudar a implementação de mecanismos de controle no futuro.

2.2.4 Comunicação

O *Automatic Packet Reporting System* (APRS) é um sistema rádioamador de geolocalização, inventado pelo rádioamador Bob Bruninga - WB4APR, em 1980. O sistema é composto basicamente de dispositivos transmissores, estações repetidoras (*Digipeaters*) e as estações conectadas na internet (*Igates*). Uma mensagem enviada por um dispositivo transmissor é captada pelas estações que estão no seu alcance. Caso haja algum *Digipeater* dentro da zona de alcance, o *digipeater* retransmite a mensagem, alterando uma *flag* na mensagem, para diferenciá-la da mensagem original. Dessa forma, a mensagem é retransmitida até alcançar uma estação conectada a internet. Assim que um *Igate* recebe a mensagem, ela envia a mensagem para o servidor APRS-IS, que compara com outras mensagens recebidas e descarta mensagens iguais. O sistema possui também diversas outras funcionalidades e é utilizado por uma variedade de usuários: pedestres, caminhões, barcos, navios, aeromodelos, paraquedistas, etc. Vale lembrar que o sistema é exclusivo para uso de radiomadores, pois opera nas frequências que são alocadas para os mesmos. No Brasil, a frequência do sistema APRS em VHF é 145,570 MHz e em UHF é 433,550 MHz. Essas frequências podem ou não ser as mesmas em outros países. Por exemplo, o sistema APRS nos EUA opera em *High*

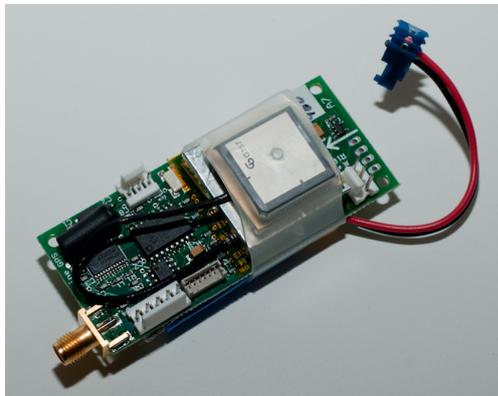
Tabela 2.2: Informações técnicas dos sensores presentes na Central de Medidas Inerciais YEI 3-Space Sensor.

Alcance da orientação	360° ao redor de todos os eixos
Precisão da orientação	±1° para condições dinâmicas
Resolução da orientação	< 0,08°
Escala do Acelerômetro	±2g ±4g ±8g
Resolução do Acelerômetro	14 bits
Densidade de ruído do Acelerômetro	99μg/√Hz
Escala do Giroscópio	±250g/ ±500/ ±2000°/sec
Resolução do Giroscópio	16 bits
Densidade de ruído do Giroscópio	0,03°/sec/√Hz
Escala do Magnetômetro	±1,3Ga até ±8,1Ga
Resolução do Magnetômetro	12 bits
Sensitividade do Magnetômetro	5 mGa/digito

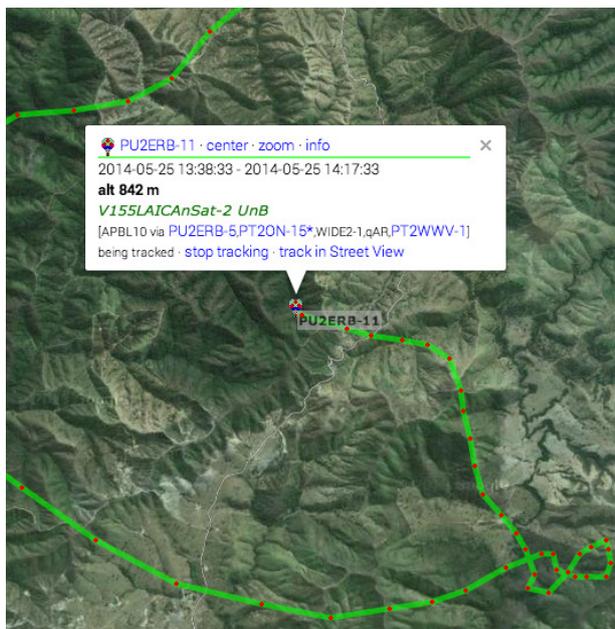
Frequency (HF), na frequência de 10,151 MHz, e em VHF, na frequência de 144,390 MHz.

O LAICAnSat possui um transmissor APRS que opera em VHF, na frequência de 145,570 MHz. Esse dispositivo, que faz a comunicação entre a estação solo e o *balloonsat*, é composto por um módulo GPS, um microcontrolador (nesse contexto também chamado de TNC) e um rádio. O microcontrolador recebe os pacotes do GPS, decodifica as mensagens recebidas e formata as informações do GPS no formato adotado pelo APRS. Dessa forma, um pacote transmitido é repetido por *digipeaters* até ser recebido em um *Igate*. Quando recebido pelo *Igate*, o conteúdo do pacote é enviado ao servidor APRS-IS e então as informações contidas na mensagem são atualizadas no site do sistema. Os dados transmitidos são exibidos no momento em que são recebidos pelo servidor e também ficam armazenados, podendo ser acessados por qualquer pessoa que tenha conhecimento do código de identificação do transmissor, normalmente associado ao código de chamada do radioamador responsável. Na Figura 2.11(b) é possível identificar o LAICAnSat sendo exibido no site do sistema APRS. Não existem no mercado muitas opções de transmissores APRS disponíveis. Os dois transmissores mais utilizados são o Micro-Trak AIO, da BYONICS e o BeeLine GPS, da BigRedBee, exibido na Figura 2.11(a). O transmissor escolhido para o LAICAnSat é o BeeLine GPS, por ser menor que o Micro-Trak AIO e ter mais funcionalidades.

Foi implementado ainda um segundo link de comunicação, de menor alcance, para uma rede local. Um rádio Xbee foi conectado a uma das portas seriais do computador de bordo, para funcionar como link entre o computador de bordo e o transmissor APRS. Dessa forma, o computador de bordo pode enviar dados para serem transmitidos pelo sistema APRS. A princípio, o APRS possui um campo para comentário que pode ser modificado com os dados dos sensores, ou qualquer outra informação que seja necessário transmitir. O rádio Xbee ainda permite comunicação com mais de um rádio. Assim, experimentos diferentes podem ser agregados a mesma plataforma, cada um contendo um rádio Xbee, de tal forma que cada rádio pode se comunicar individualmente com o



(a) Transmissor APRS BeeLine GPS. *fonte:* <http://sapp-family.com>



(b) Representação do LAICAnSat no sistema APRS. *fonte:* <http://aprs.fi>

Figura 2.11: Transmissor APRS utilizado no LAICAnSat e a respectiva posição do *balloonsat* plotada no site do sistema APRS.

rádio Xbee central, instalado no transmissor APRS, em uma espécie de rede local (formada pelos Xbee), com um canal de transmissão a longa distância. Essa arquitetura modular, representada na Figura 2.12, acrescenta mais flexibilidade ao sistema e proporciona novas vertentes de estudo, como, por exemplo, comunicação entre *balloonsats* e formação de rede.

2.3 Descrição do *software*

O *software* desenvolvido para o LAICAnSat foi concebido de acordo com a aplicação. Um programa foi desenvolvido para o microcontrolador que gerencia os sensores e um segundo programa foi desenvolvido para o microcontrolador que é responsável pelo ADCS. Entretanto, devido às necessidades do sistema nos lançamentos realizados, os dois programas realizam praticamente a mesma tarefa, coletam dados dos sensores e registram os dados com *timestamps*, para facilitar o processamento. O programa que foi elaborado para o microcontrolador que requisita os dados dos sensores meteorológicos inicia as portas de comunicação, como I2C e UART, inicia o *datalogger* e espera o GPS indicar *lock*, o que significa que ele possui informações atualizadas e sinal de pelo menos três satélites. Após receber o indicativo de *lock* do GPS, o programa passa a requisitar dados dos sensores em taxas de atualização diferentes. Devido ao tempo de resposta de cada sensor foram estabelecidas taxas de leitura diferentes. O GPS, por exemplo, está ajustado para fornecer dados a uma taxa de 4 Hz. Porém, o sensor de temperatura e umidade SHT15 não consegue responder na mesma taxa que o GPS. Assim, considerando a aplicação do sistema desenvolvido, uma taxa de leitura de temperatura e umidade de 4Hz não é razoável, dada a taxa de ascensão do balloonsat.

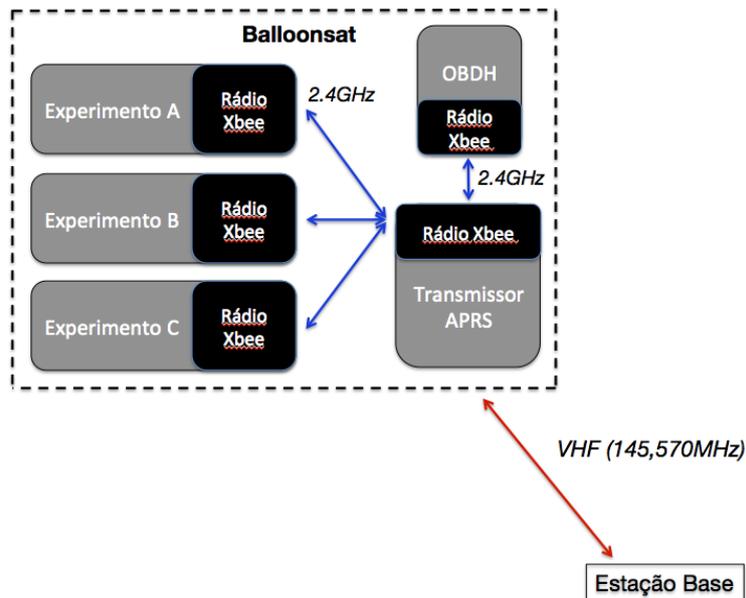


Figura 2.12: Rede de rádios Xbee, uma opção de modularização.

É necessário considerar que os parâmetros medidos não mudam significativamente de forma tão rápida. Assim, o SHT15 é requisitado a cada 20 segundos para fornecer os dados obtidos. Mesmo com essa taxa relativamente baixa, ainda é razoável programar intervalos maiores entre as leituras. O programa que foi elaborado para o microcontrolador responsável pelo ADCS desempenha uma função muito parecida: ler os dados obtidos pela Unidade de Medições Inerciais (UMI). Entretanto, ao contrário do programa do outro microcontrolador, é interessante obter dados a taxas de leitura muito maiores. O programa adquire dados da UMI a aproximadamente 24ms. Com a evolução dos experimentos e o acréscimo de novas tarefas, e o conseqüente aumento de complexidade do sistema, os programas tendem a exigir cada vez mais do microcontrolador. Entretanto, acredita-se que o Teensy tem processamento suficiente para atender às várias demandas do projeto.

Capítulo 3

Resultados Experimentais

Failure is not an option.

Esse capítulo tem como objetivo descrever os experimentos realizados durante o projeto LAICAnSat, a análise dos dados obtidos e expor as conclusões que levaram ao estado atual do projeto. Basicamente serão descritos três experimentos: o teste do sistema em uma aeronave, o primeiro e o segundo lançamentos a partir de um balão-sonda.

3.1 Teste do sistema embarcado em uma aeronave

O primeiro teste com o sistema desenvolvido para o LAICAnSat foi realizado no dia 15 de setembro de 2013, em uma pequena aeronave do grupo de paraquedismo Mergulho no Céu, em Anápolis, GO. Esse teste tinha como objetivo verificar o funcionamento e a aquisição de dados do GPS, de um sensor de temperatura e pressão e também verificar o alcance máximo da comunicação estabelecida entre dois módulos Xbee. Um dos desafios desse projeto, principalmente no início, diz respeito ao sistema de comunicação. Algumas possibilidades foram levantadas e a mais razoável delas foi utilizar dois módulos XBee Pro 900 XSC para fazer a comunicação. Esse módulo tem potência de saída de 100mW e, segundo o fabricante, alcance de 24km *Line-of-Sight* (LOS). Apesar de não cumprir um dos requisitos do *balloonsat*, de ter um canal de comunicação com alcance superior a 50km, esse módulo tinha o maior alcance dentro os pesquisados. Alguns testes simples foram realizados com esse rádio, e os resultados obtidos eram satisfatórios. Entretanto, realizar um teste que verificasse o limite do alcance do módulo se mostrou bastante desafiador, afinal era necessária uma distância próxima a 24km entre o módulo de recepção e o módulo de transmissão com LOS. A solução encontrada foi embarcar o sistema em uma pequena aeronave e enviar os dados do GPS pelo módulo de comunicação. Dessa forma, os pacotes que fossem recebidos pela estação seriam depois processados e, a partir da distância calculada entre a aeronave e a estação base, seria possível saber qual a maior distância percorrida por um pacote. Os dispositivos utilizados para realizar o experimento foram uma antena Yagi 900MHz de 12 elementos e ganho de 14dBi, conectada a um módulo XBee Pro 900 XSC, que por sua vez era conectado à porta USB do computador. O sistema embarcado na aeronave tinha um módulo XBee Pro 900 XSC e uma

antena 900MHz/1800MHz, de ganho 2dBi. Sempre que o Rádio XBee recebia um pacote do sistema, ele exibia o conteúdo do pacote no terminal do computador. Dessa forma era possível saber se o XBee estava dentro do alcance da antena ou não. O sistema com o GPS e sensor de temperatura e pressão foi então colocado dentro da aeronave e dois vôos foram realizados. Além do teste do sistema de comunicação, os dados do GPS e do sensor foram gravados em um cartão microSD, da mesma forma que os dados do sistema atual são registrados.

O teste teve resultados muito relevantes. Mostrou a ineficiência em estabelecer o canal de comunicação, mesmo quando a aeronave estava a distâncias médias, devido a dificuldade em apontar a antena Yagi utilizada. Em certas ocasiões o fato de deslocar levemente a antena já causava a perda dos pacotes. Essa necessidade de um apontamento preciso, quanto maior a distância, vem do próprio diagrama de irradiação da antena Yagi, com lóbulos laterais atenuados e grande parte da potência irradiada concentrada no lóbulo principal. Como é possível ver pela análise da Figura 3.2, a maior distância onde foi possível manter contato com o sistema foi de aproximadamente 10,3 km. Considerando agora a situação de vôo do *balloonsat*, na qual a distância entre o balão e a estação de solo chega a mais de 50km, foi perceptível que o sistema com o XBee não atenderia os requisitos do sistema de comunicação, aumentando as chances de perder a comunicação em algum momento do vôo e consequentemente ter o risco de perder a carga útil. Utilizando os dados do GPS salvos no sistema embarcado, foi possível produzir as imagens com as trajetórias da aeronave nos dois vôos realizados. O GPS também fornece uma estimativa da altitude, como é possível observar nas Figuras 3.1, 3.4a e 3.4b.

Os dados do sensor de temperatura e pressão embarcado, MS5611, também podem ser avaliados nas Figuras 3.5 e 3.6. Analisando os resultados apresentados, é possível notar a queda de pressão e temperatura à medida que a aeronave ganha altitude. Esses resultados são condizentes com os resultados esperados e confirmam o correto funcionamento do sistema. Observando as Figuras 3.7, que apresentam os dados do subsistema de energia, é possível concluir que as fontes de tensão foram capazes de atender às necessidades do sistema, inclusive durante as transmissões do rádio XBee, momento no qual as fontes tem uma demanda maior por corrente.

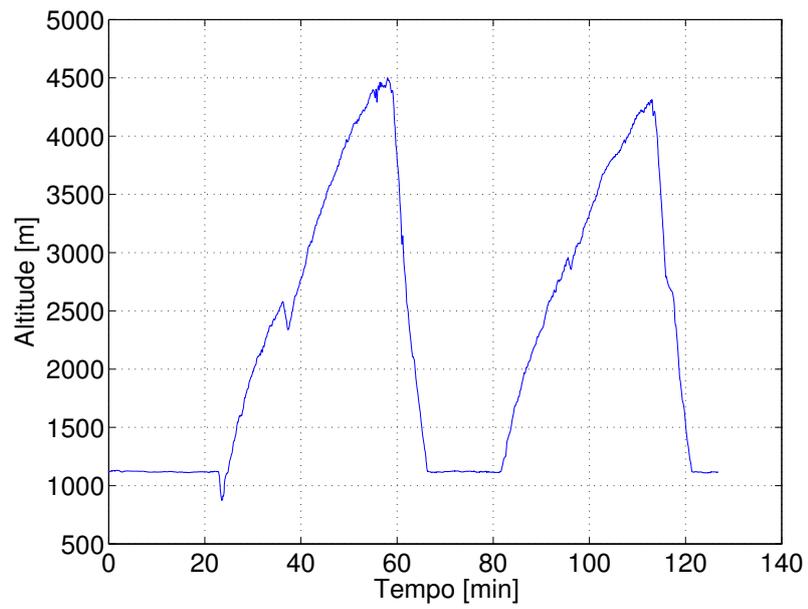


Figura 3.1: Variação da altitude (GPS) durante o vôo.

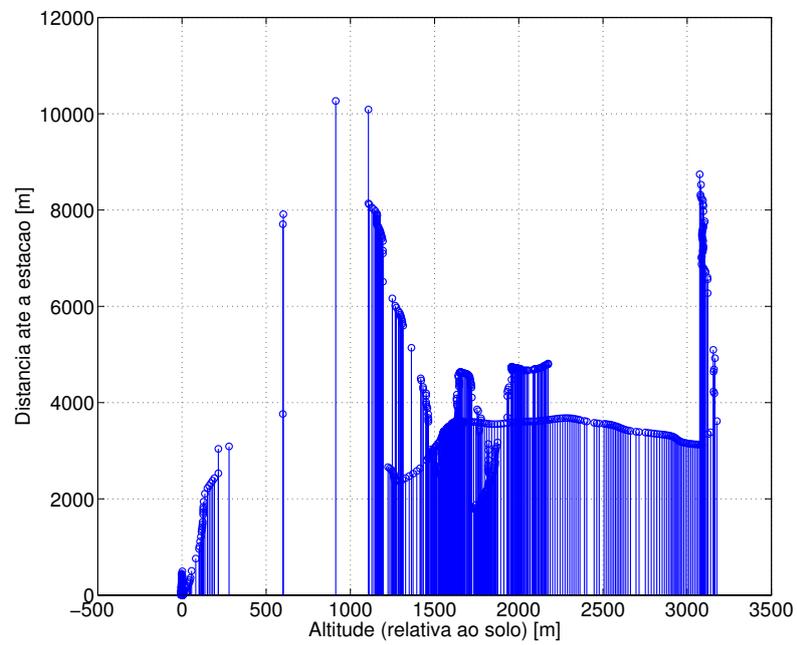


Figura 3.2: Alcance do canal de comunicação do XBee.

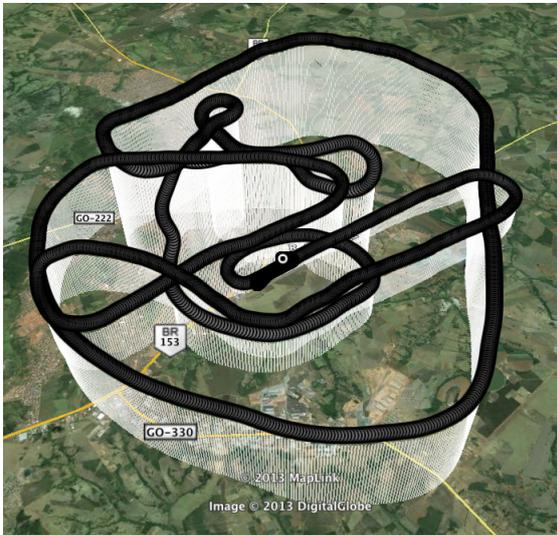


(a) O sistema embarcado posicionado dentro da aeronave, embaixo do banco do piloto



(b) Aeronave se dirigindo a pista de decolagem.

Figura 3.3: Imagens do teste do sistema em uma aeronave.



(a) Percurso da aeronave no vôo 1. *fonte: Google Earth*



(b) Percurso da aeronave no vôo 2. *fonte: Google Earth*

Figura 3.4: Percurso dos vôos realizados na aeronave.

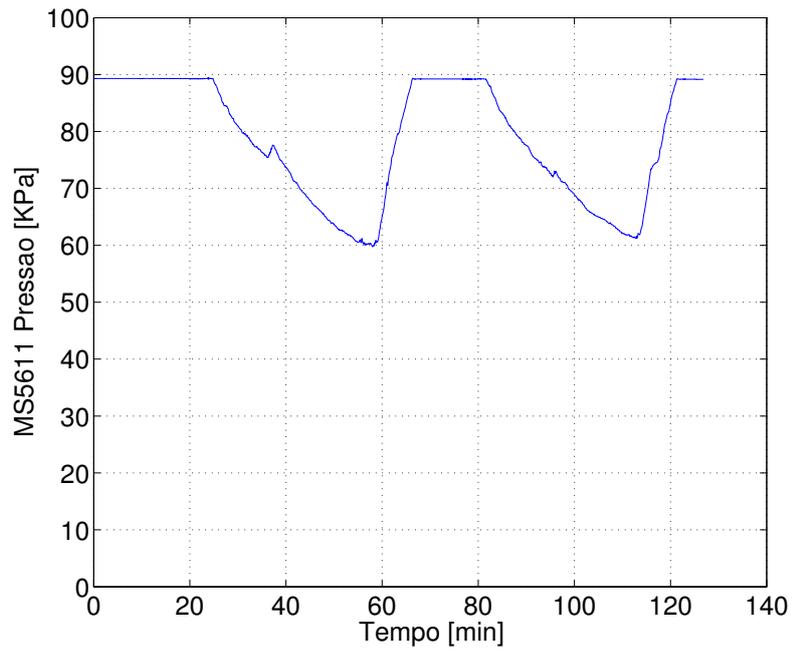


Figura 3.5: Variação da pressão interna da aeronave durante os dois vôos.

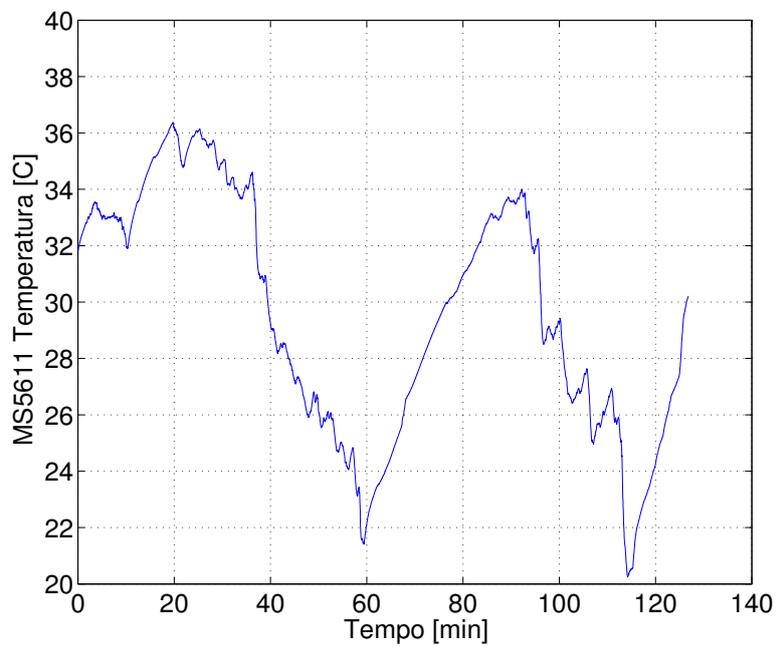
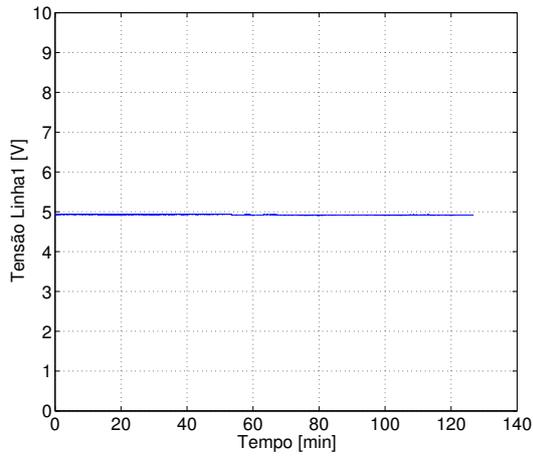
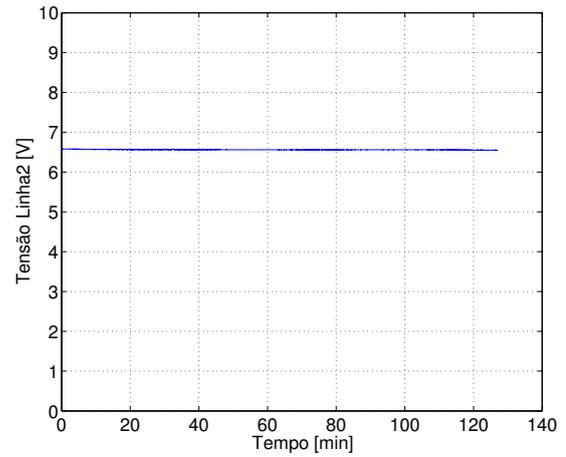


Figura 3.6: Variação da temperatura interna da aeronave durante os dois vôos.

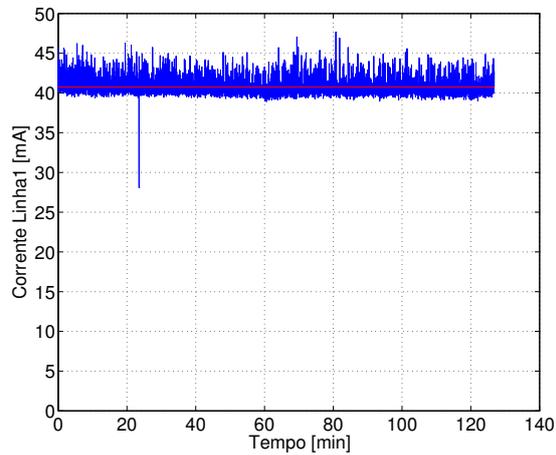


(a) Tensão na linha de alimentação 1 (saída do regulador de tensão).

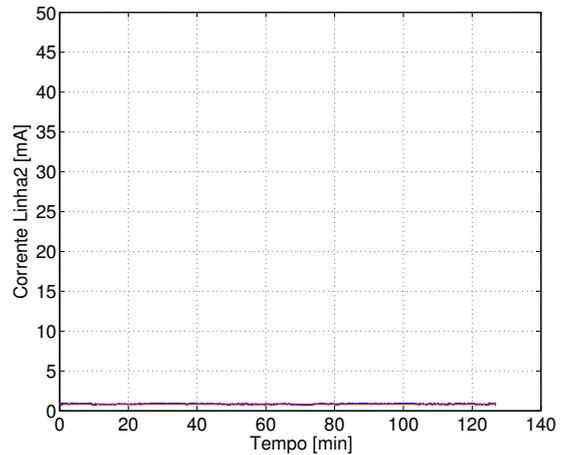


(b) Tensão na linha de alimentação 2 (saída da bateria).

Figura 3.7: Gráficos de dados obtidos no teste do sistema em uma aeronave.



(a) Corrente na linha de alimentação 1 (saída do regulador de tensão).



(b) Corrente na linha de alimentação 2 (saída da bateria).

Figura 3.8: Gráficos de dados obtidos no teste do sistema em uma aeronave.

3.2 Primeiro Lançamento - 02 de Maio de 2014

O lançamento do LAICAnSat-1 foi realizado nas proximidades da cidade de Padre Bernardo, GO, no dia 02 de maio de 2014. Esse local foi escolhido seguindo a orientação dos oficiais do 1º Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA I) com relação ao tráfego de aeronaves nas imediações do Distrito Federal. A grande dificuldade de realizar lançamentos dentro do Distrito Federal deve-se ao volume de tráfego aéreo na região, com um aumento de tráfego observado nos últimos meses. O CINDACTA I é o responsável pela emissão do *Notice to Airmen* (NOTAM), documento indispensável para a realização dos experimentos, contendo os detalhes da operação de lançamento. A região próxima a Padre Bernardo também foi escolhida pela boa cobertura de *digipeaters*, em especial estações próximas de Barro Alto, GO (PP2MTM-15), Brazlândia, DF (PT2ON-15), Lago Sul, DF (PT2WWV-15) e Samambaia (PT2AP-15). Além dessas estações, um carro foi equipado para ser utilizado como *digipeater* (PU2ERB-15), retransmitindo, com maior potência, as mensagens que recebia do balloonsat (PU2ERB-11). Além desses *digipeaters*, um *Igate* está instalado no Lago Sul, DF. Os pacotes repetidos pelos *digipeaters* chegam a esse *Igate* e são atualizados no servidor APRS.

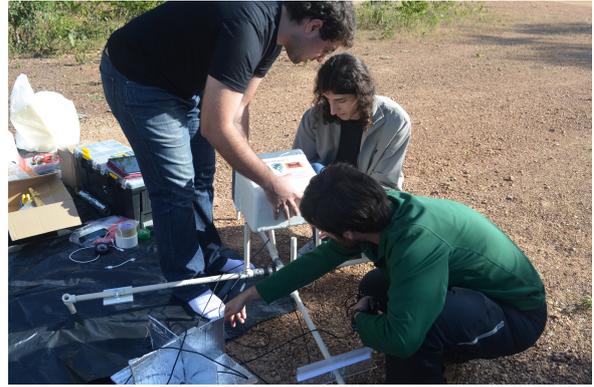
Os testes realizados demonstraram que as estações de Brazlândia e Lago Sul são as mais utilizadas como repetidoras até o *balloonsat* atingir 5000m. Depois dessa altitude, os *digipeaters* próximos às cidades goianas de Anápolis, Morrinhos, Cristalina, Itumbiara, Uberlândia, Catalão são as mais utilizadas. Nesse primeiro lançamento, quando o balão estava a mais de 26000m, os pacotes foram recebidos diretamente por estações em Belo Horizonte. Radioamadores do Grupo MUTUM de rádio expedição auxiliaram a equipe no lançamento, rastreamento e recuperação do *balloonsat*. Como foi previsto pelos radioamadores, o problema de cobertura não ocorre quando o balão está em altas altitudes, mas sim quando encontra-se mais próximo do solo, devido aos obstáculos presentes. Esse problema foi resolvido equipando o carro com um rádio e configurando-o para funcionar como *digipeater*. Portanto, os pacotes transmitidos pelo *balloonsat* a 5W são retransmitidos a 50W pelo rádio no carro, um Kenwood TM710A.

O transmissor APRS do *balloonsat* foi programado para enviar um pacote a cada 30 segundos, à potência máxima de 5W. Assim, obtém-se informações atualizadas sobre a localização do LAICAnSat e é respeitado o código de ética operacional existente entre os usuários do sistema APRS. Nessa configuração de intervalo entre as transmissões de pacotes e potência, o rádio consegue operar por mais de 24h. No primeiro lançamento foi utilizada uma antena dipolo, com os filamentos produzidos em um arame flexível especial. Como grande parte das antenas dos *digipeaters* e *Igate* estão na posição vertical, a antena do *balloonsat* também foi posicionada na vertical. Caso a antena estivesse posicionada na horizontal, a potência do sinal recebido pelas estações seria atenuado em pelo menos 3dB, ou seja, a metade da potência transmitida.

A Relação de Ondas Estacionárias (ROE) da antena que foi utilizada durante o vôo também foi medida, com o intuito de garantir que grande parte da potência de saída do transmissor seria efetivamente transmitida. Essa medição é importante pois representa o casamento da impedância do transmissor com a impedância da antena. Um casamento mal feito pode significar que grande parte da potência gerada pelo transmissor é refletida e apenas uma pequena parcela é efetivamente



(a) Equipe durante os preparativos para o lançamento.



(b) Equipe montando a carga útil.

Figura 3.9: Imagens do primeiro lançamento.

transmitida pela antena. Em equipamentos onde o nível de potência é alto, essa reflexão pode causar danos e mal funcionamento. Um equipamento denominado analisador de espectro foi utilizado para realizar a medição da ROE. Previamente calibrado, a antena foi conectada ao analisador de espectro e a frequência central foi ajustada, nesse caso para 145.570MHz. O equipamento faz uma varredura, baseado na frequência central e exibe o valor da ROE medido para cada frequência. Um valor de ROE de 1:1,8 é, normalmente, o limite do aceitável. Idealmente, uma ROE de 1:1,0 significa que toda a potência de saída do transmissor é transmitida pela antena. A ROE obtida para a antena utilizada nesse lançamento foi, inicialmente, de 1:2,3, valor longe do aceitável. As soldas da antena foram refeitas e assim foi possível obter uma ROE de 1:1,4, um valor considerado bom.

A preparação para o lançamento começou várias semanas antes. Alguns testes com o sistema embarcado foram realizados para garantir que estava funcionando como esperado e o arquivo de *log* era gerado com a formatação correta. A estrutura onde as cordas são fixadas e que sustenta a carga útil foi montada e testada, as cordas de sustentação dimensionadas corretamente. O refletor de radar, utilizado por recomendação do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DCEA), foi construído utilizando-se papel rígido e folhas de alumínio. Esse dispositivo, segundo a *Federal Aviation Administration* (FAA) deve ser detectável por radares operando em frequências de 200 MHz a 2.700 MHz. Foram elaborados os procedimentos para a verificação do equipamento, antes de deixar o laboratório, para a chegada no local do lançamento e para a preparação do balão. Vale destacar a importância desses procedimentos para o sucesso do lançamento, pois o não cumprimento desses passos podem implicar no adiamento ou cancelamento da operação.

A estrutura concebida para o LAICAnSat utiliza tubos de Policloreto de Vinila (PVC). Inicialmente, a proposta era fabricar grande parte da estrutura em impressoras 3D. Porém, alguns trabalhos realizados mostraram que o processo de fabricação comum, em materiais como Poliacido Láctico (PLA) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), não produz peças de boa qualidade do ponto de vista estrutural, devido a baixa pressão e o decorrente processo de *outgassing*, fragilizando os objetos fabricados. Outros materiais e processos podem ser utilizados para fabricar peças 3D mais recomendadas para ambientes de baixa pressão, porém não era conveniente realizar essa



(a) Estrutura da carga útil montada antes do lançamento.



(b) Equipe após a recuperação da carga útil.

Figura 3.10: Imagens do primeiro lançamento.

aquisição, tendo em vista que o PVC se adequa muito bem ao projeto. Assim, uma estrutura tubular foi montada, em formato de cruz. No centro da cruz existe um local para a caixa de isopor contendo o sistema embarcado ser posicionada. Ainda, quatro ramificações se projetam para fora da estrutura, cada uma com um contrapeso. Essas ramificações tinham como objetivo estabilizar a carga útil, tentando melhorar a qualidade das imagens obtidas da superfície terrestre, buscando eliminar movimentos que prejudicassem as imagens. Porém, como será mostrado mais a frente, as ramificações da estrutura tiveram que ser removidas pois representavam uma parcela significativa (1.6kg) da massa do *balloonsat*, impossibilitando o lançamento com o modelo de balão disponível (1200g) e a altitude máxima desejada (28.000m).

Fundamental para o sucesso do lançamento, a verificação das condições climáticas e a simulação do vôo também influenciam diretamente o resultado do experimento. A equipe do projeto acompanhou as condições climáticas da região durante a semana do lançamento. Felizmente, a região tem um período não chuvoso bastante estável. Uma outra ferramenta importante utilizada nas semanas de preparação para o lançamento é o *CUSF Landing Predictor*. Essa ferramenta foi elaborada pela *Cambridge University* e está disponível gratuitamente na internet¹. Esse site utiliza informações do *Global Forecast System*, um modelo de previsão do tempo elaborado pelo *National Center for Environmental Prediction*, EUA. A simulação do vôo tem precisão maior se for feita a partir de 180 horas antes do lançamento, mas é possível realizar simulações previamente. O simulador utiliza informações como altitude do lançamento, taxa de ascensão, altitude máxima, taxa de descida, peso da carga útil e o modelo do balão utilizado. Esses dados são utilizados como parâmetros de entrada, e junto das informações dos modelos climáticos, fornecem a provável trajetória do balão, desde o lançamento e ascensão, até a queda. O ideal é realizar as simulações prevendo que o balão caia em um local de fácil acesso, para facilitar o resgate. Alguns dias antes do lançamento, o simulador previa que as duas melhores regiões para o lançamento eram dadas pelas coordenadas²

¹ *CUSF Landing Predictor*: <http://predict.habhub.org/>

² Vale destacar que nesse trabalho foi convencionada a representação de coordenadas geográficas em décimos de

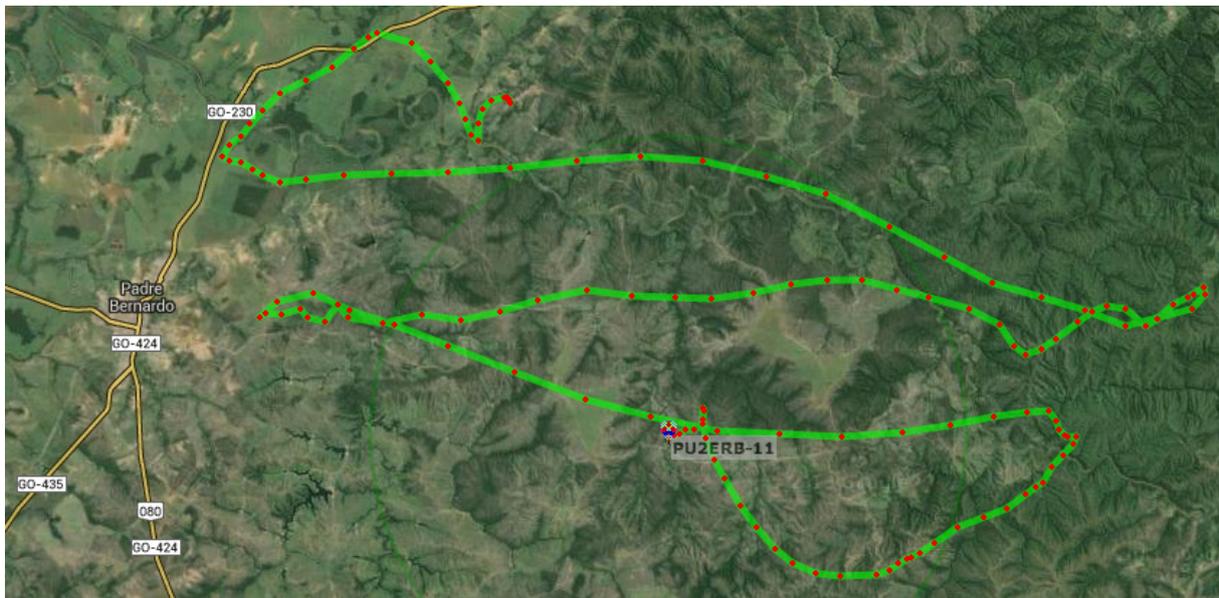


Figura 3.11: Trajetória do *balloonsat* dada pelo sistema APRS. fonte: <http://aprs.fi>

-15.115864°, -48.196545° e -15.109197°, -48.203481°. Apesar das tentativas do simulador de fazer previsões corretas, as melhores previsões são realizadas momentos antes do lançamento. Devido a questões logísticas e a condição dos ventos de superfície nas primeiras horas do dia, a equipe optou por seguir para o local do lançamento bem cedo e lançar o balão por volta das 9h da manhã. Nas simulações realizadas horas antes do lançamento, foi escolhido o local definido pelas coordenadas -15.115864°, -48.196545°.

Chegando ao local do lançamento, a primeira ação foi retirar a lona de um dos carros e cobrir a área onde o balão foi inflado. As dimensões mínimas recomendadas para a lona são de 5x5 m. O local onde a lona é estendida também deve ser observado, de preferência um local plano e sem reentrâncias. O próximo passo foi descarregar o cilindro de hélio de 8 m³. O cilindro foi posicionado na horizontal, em uma extremidade da lona, liberando um espaço maior para a execução de outras atividades. Em seguida foram colocadas luvas de algodão pelos membros que iriam manipular o balão. O balão de látex foi então aberto e cuidadosamente desenrolado, deixando a abertura do balão voltada para a saída de ar do cilindro. Uma mangueira foi conectada ao cilindro e à abertura do balão, e fixada por meio de abraçadeiras na abertura do balão. Depois de aberto o cilindro de gás Hélio, foi necessário 1h para inflar o balão, um Hwoyee de 1200 gramas. Durante esse tempo foram realizados procedimentos de montagem da estrutura da carga útil e inicialização do sistema embarcado. Vale destacar que o simulador fornece, a partir de alguns parâmetros, um coeficiente denominado *neck lift*, que é simplesmente quanto deve pesar o contrapeso para garantir que o balão tenha uma taxa de ascensão satisfatória. O contrapeso utilizado no primeiro lançamento foi um galão de água de 5 litros. Nesse lançamento, devido a falta de experiência, a estrutura foi projetada em um formato que permitia maior estabilidade, mas era comprometedor na variável peso. A estrutura com a carga útil acoplada pesava aproximadamente 4200g. Depois do balão estar inflado, o paraquedas é amarrado por um barbante encerado ao balão. É importante que a

graus, na disposição <latitude>, <longitude>.

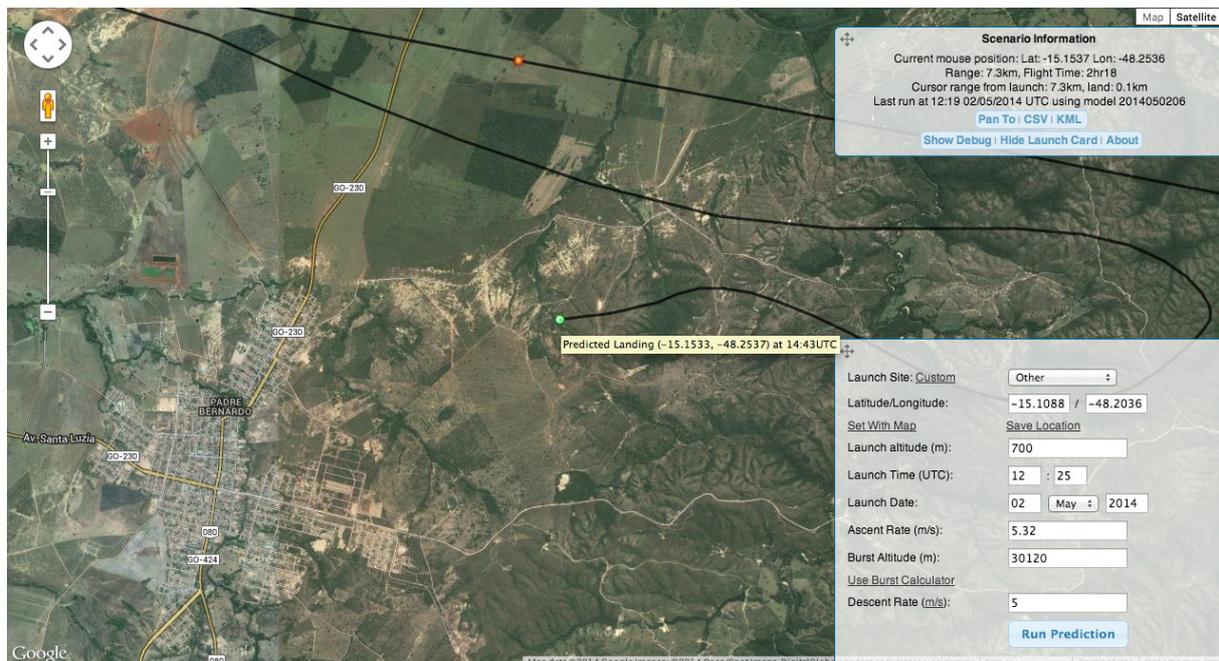


Figura 3.12: Simulação do lançamento e local de pouso previsto. fonte: <http://predict.habhub.org>

distância entre o balão e o paraquedas seja de no mínimo 5 metros. Quanto menor o comprimento do barbante, maior a chance de rotações descontroladas da carga útil durante todo o voo. Além disso, para evitar que a carga útil permaneça em constante rotação, é fundamental um *swivel* entre as linhas que conectam a carga útil e o paraquedas. Esse dispositivo, composto de 2 argolas rotatórias, desacopla a rotação do balão da rotação da carga útil. Uma das argolas do dispositivo é conectado às cordas que suportam a carga útil e a outra argola ao paraquedas.

Após contato e coordenação com o CINDACTA-I, o LAICAnSat-1 foi lançado às 8h45 da manhã (11h45 UTC). Entretanto, devido ao excesso de peso da estrutura, a força empuxo praticamente equilibrou-se com a força peso, fazendo com que o balão entrasse em condição de flutuação, como demonstrado na equação (2.24). Dessa forma, o *balloonsat* subiu alguns metros, flutuou durante segundos e retornou ao solo, ficando preso em uma árvore. Depois de 30 minutos foi possível capturar o *balloonsat*, retirar as partes da estrutura que tentavam balancear a carga útil e lançá-lo de novo, dessa vez com sucesso, às 9h15 (12h15 UTC). O voo durou cerca de 3h20 minutos e o *balloonsat* pousou no local de coordenadas -15.192875° , -48.157846° , a cerca de 9.5km de distância do local de lançamento. Durante esse tempo a equipe monitorou o balão pelo sistema APRS. Nesse lançamento, o sistema embarcado coletou imagens da superfície terrestre, dados de pressão e temperatura, dados do GPS e da Unidade de Medidas Inerciais. As Figuras 3.9 e 3.10 mostram os preparativos para o lançamento e a recuperação da carga útil, no local de pouso. Quanto aos dados obtidos pelo sistema de rastreamento, é possível observar a Figura 3.11 gerada pelo sistema APRS, onde a trajetória verde é o caminho percorrido pelo *balloonsat* nesse primeiro lançamento. Os dados obtidos pelo sistema APRS estão disponíveis online e podem ser acessados por qualquer pessoa. A Figura 3.13 mostra o percurso do *balloonsat* baseado nos dados obtidos pelo GPS embarcado. Como é possível perceber, na parte final do voo o GPS parou de funcionar devido a um conector que,

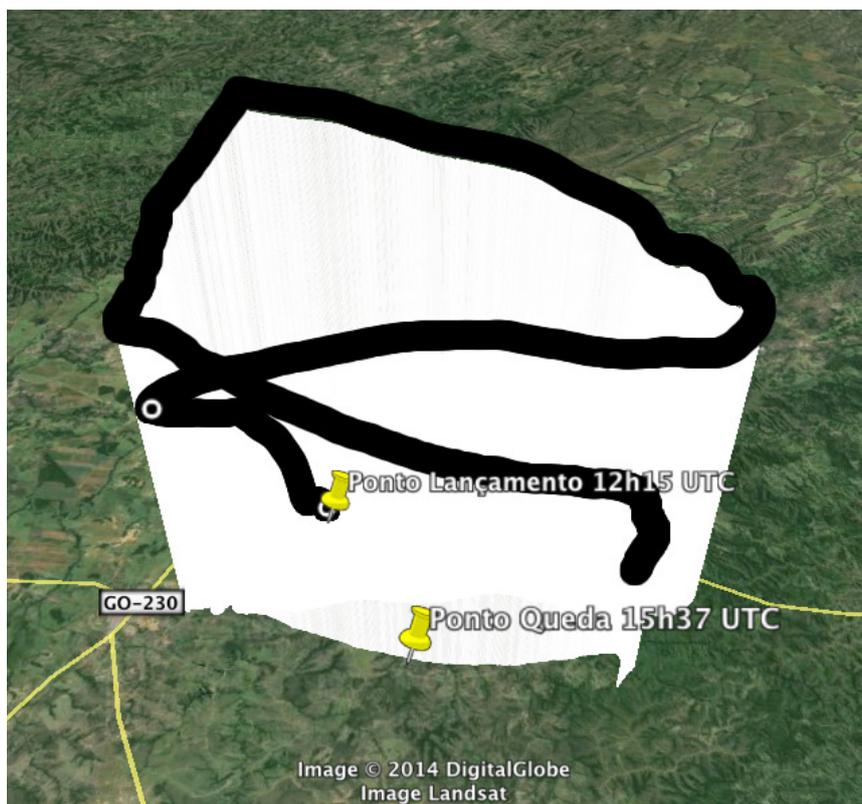


Figura 3.13: Trajetória do *balloonsat* pelos dados do GPS embarcado. *fonte: Google Earth*

com a pressão da caixa, rompeu a conexão de um fio. Para o segundo lançamento esse problema foi resolvido. As Figuras 3.12 e 3.14 mostra o comparativo entre o local do pouso simulado e o local do pouso real. Nesse lançamento, a distância entre esses pontos foi de pouco mais de 11km. Esse erro está associado à dificuldade de fornecer dados corretos ao simulador, principalmente no que diz respeito ao volume de gás Hélio dentro do balão. Na Figura 3.13 é perceptível o momento em que o GPS pára de operar. Observando o ponto onde o *balloonsat* caiu e o último dado de posição salvo pelo GPS, é possível perceber que eles não são coincidentes, como o ponto de lançamento. As Figuras 3.15, 3.17 e 3.18 mostram um ruído constante em alguns momentos do voo, começando pouco antes do minuto 80. Apesar disso, ainda é possível identificar os valores reais medidos fornecidos pelos sensores. Não foi possível detectar a razão da ocorrência desse fenômeno, que se repetiu no segundo lançamento, em alguns momentos. O primeiro lançamento foi realizado com dois sensores de temperatura e pressão dentro do recipiente de isopor que isolava termicamente o sistema. Os dados obtidos podem ser vistos nas Figuras 3.13, 3.15, 3.17 e 3.18. O objetivo desse experimento era testar a funcionalidade do isolamento térmico do LAICAnSat-1. Os dados de temperatura obtidos foram bem semelhantes e indicam uma diminuição da temperatura interna com o aumento da altitude. Os gráficos de pressão também são bem semelhantes e indicam diminuição da pressão com o aumento de altitude. Essas informações são coerentes com a variação de temperatura e pressão com a altitude. A Figura 3.20 é uma imagem obtida pela câmera durante o voo. A partir dessa imagem é possível identificar a cidade de Padre Bernardo e o Rio Maranhão, que circunda a região. Imagens como essa são interessantes para muitas aplicações.

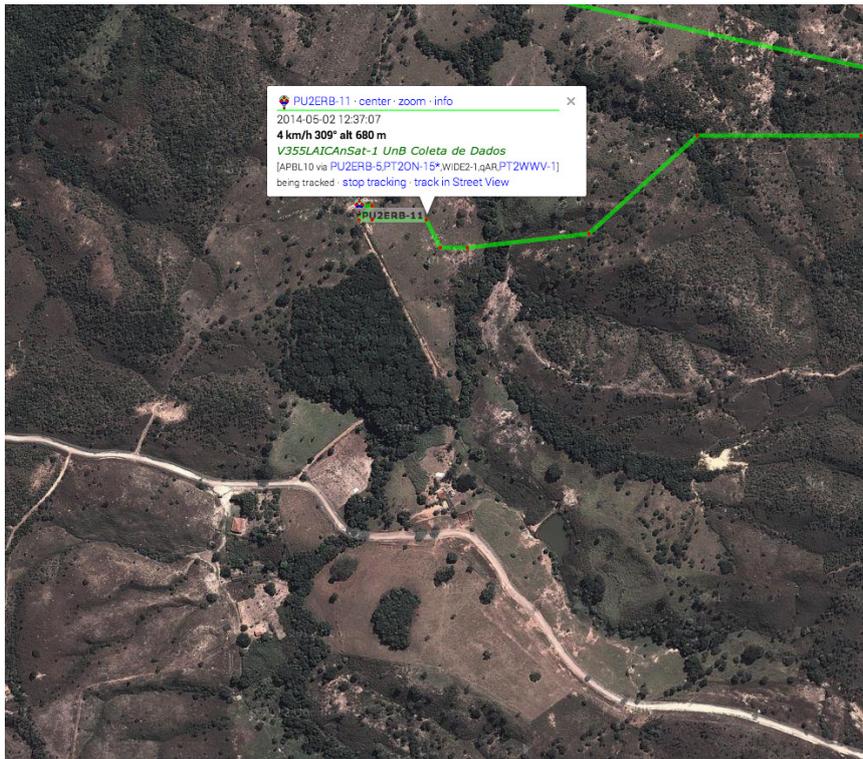
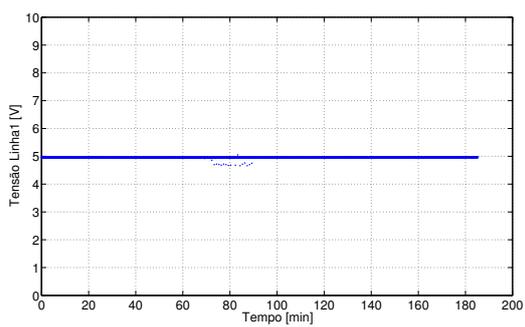
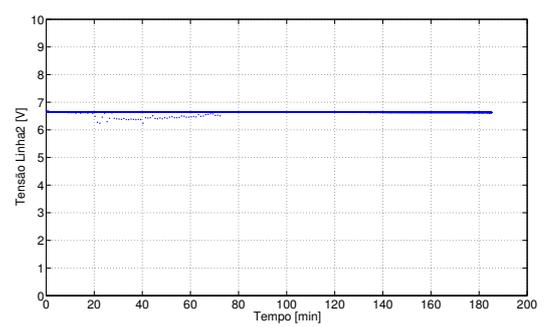


Figura 3.14: Local do pouso real. *fonte: <http://aprs.fi>*



(a) Tensão na linha de alimentação 1 (saída do regulador de tensão).



(b) Tensão na linha de alimentação 2 (saída da bateria).

Figura 3.15: Gráficos de dados obtidos no primeiro lançamento.

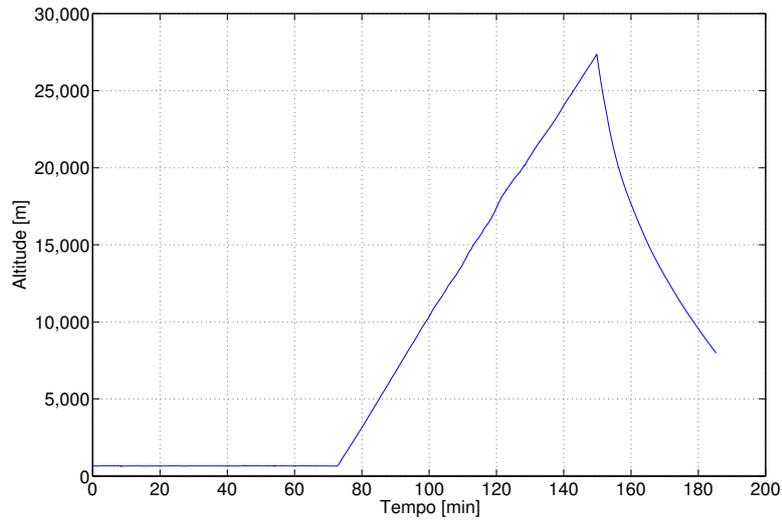
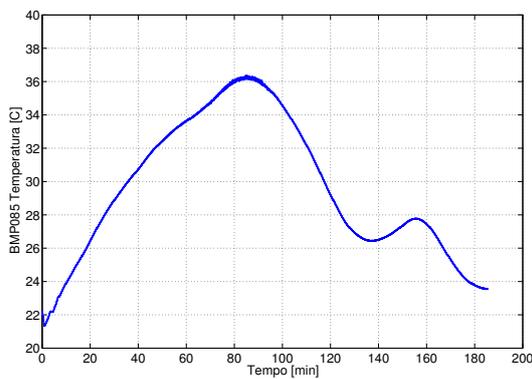
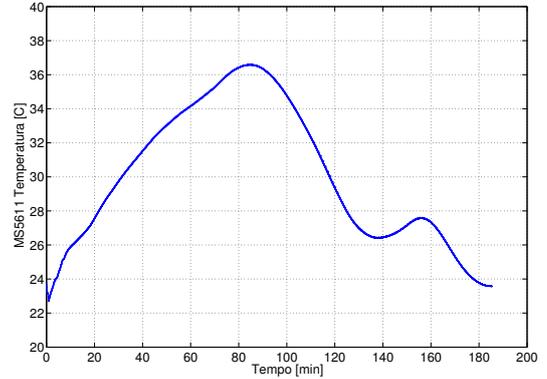


Figura 3.16: Variação da altitude (GPS) durante o vôo.

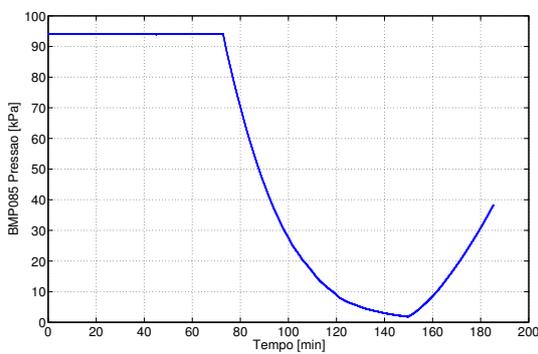


(a) Variação de temperatura no sensor BMP085.

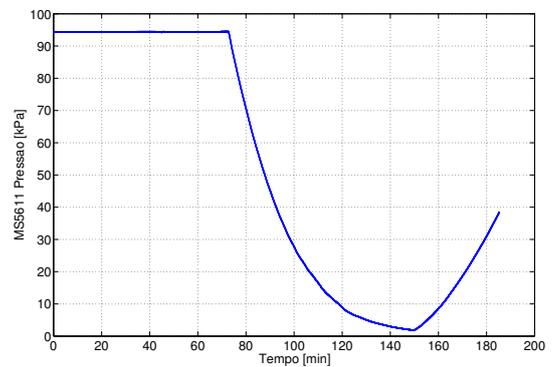


(b) Variação de temperatura no sensor MS5611.

Figura 3.17: Dados de temperatura obtidos no primeiro lançamento.



(a) Variação de pressão no sensor BMP085.



(b) Variação de pressão no sensor MS5611.

Figura 3.18: Dados de pressão obtidos no primeiro lançamento.



Figura 3.19: Imagem da superfície terrestre durante vôo do LAICAnSat-1.



Figura 3.20: Imagem da superfície terrestre durante vôo do LAICAnSat-1.

3.3 Segundo Lançamento - 24 de Maio de 2014

O lançamento do LAICAnSat-2 foi realizado também nas proximidades da cidade de Padre Bernardo, no dia 24 de maio de 2014. O segundo lançamento foi utilizado para testar novos sensores implementados, em especial os sensores de infravermelho, temperatura externa e umidade, revisar os procedimentos de lançamento e preparação, e também realizar um experimento simples, observar a expansão do ar, com a diminuição da pressão externa, dentro de uma bola de futebol murcha. Da mesma forma que no primeiro lançamento, foram realizadas simulações para a definição do local. Foram escolhidos como prováveis pontos de lançamento os locais determinados pelas coordenadas: -15.049843° , -48.267602° ; -15.048647° , -48.295686° e -15.063394° , -48.284533° . Nas simulações realizadas horas antes do lançamento, foi definido o local de coordenadas -15.048647° , -48.295686° para o lançamento. Entretanto, ao chegar nesse local, foi identificada uma plantação, o que alterou o local do lançamento para o local de coordenadas -15.056061° , -48.297911° .

Foram iniciados os preparativos, da mesma forma como relatado no primeiro lançamento e às 10h46 da manhã (13h46 UTC), após contato e coordenação com o CINDACTA-I, o LAICAnSat-2 foi lançado. Nesse segundo lançamento, devido a assimetria na estrutura do balão introduzida pela bola de futebol, foi adicionado um contrapeso para tentar reestabelecer o centro de gravidade do balão no mesmo local do centro de massa. Entretanto, no lançamento, a situação do primeiro lançamento voltou a se repetir. O balão subiu alguns metros, entrou em flutuação e retornou ao solo instantes depois. A experiência do primeiro lançamento deixou a equipe alerta sobre essa possibilidade e assim que o balão tocou o solo foi possível recuperá-lo, retirar o contrapeso e lançá-lo novamente. Entretanto, devido ao peso da bola de futebol, a taxa de ascensão do balão foi baixa, variando de 1m/s a 3m/s, dependendo das correntes de ar. Esse fato foi determinante para o tempo total de vôo de 5h. Apesar de não ter sido planejado, a taxa de ascensão baixa permitiu testar melhor o sistema embarcado, pois permitia uma exposição mais prolongada às situações atmosféricas. A equipe acompanhou toda a trajetória do balão pelo site³ do sistema APRS. Já nos momentos finais da queda da carga útil, parte da equipe se deslocou em direção

³Site do sistema APRS: <http://aprs.fi>

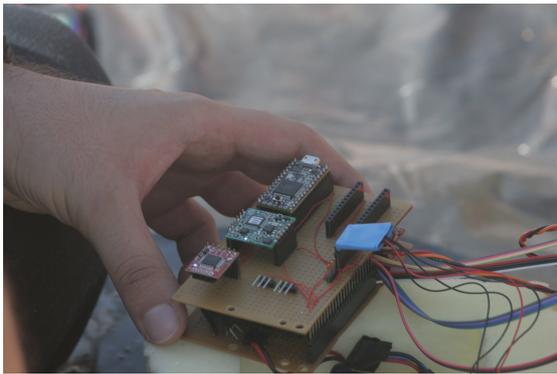


(a) Equipe trabalhando nos preparativos para o lançamento.



(b) Equipe finalizando o procedimento para inflar o balão.

Figura 3.21: Imagens do segundo lançamento.



(a) Sistema de aquisição de dados desenvolvido.



(b) Subsistemas sendo acomodados dentro da carga útil.

Figura 3.22: Imagens do segundo lançamento.

ao município de Água Fria, próximo do local da queda. Entretanto, devido a hora avançada e a dificuldade de acesso ao local, restaram poucos minutos para chegar até a carga útil, antes de escurecer. Além disso, algumas informações do mapa *online* que foi utilizado para realizar as buscas estavam desatualizadas. Assim, foi decidido que a equipe retornaria ao local no dia seguinte, com a ajuda de alguns rádioamadores do Grupo MUTUM de rádio expedição, que estavam auxiliando no rastreamento do balão em Brasília. A segunda tentativa de resgate, no dia 25/05, foi abortada, após quase 3h de tentativas. A região da queda da carga útil contava com subidas e descidas acentuadas e mata fechada, segundo relato dos membros da equipe de resgate. O principal agravante na missão de resgate foi a falta de mapas de relevo (topográfico) da região, devido a mata fechada.

De volta a Brasília, a equipe fez contato com a 10^a Companhia Independente Bombeiro Militar, de Planaltina de Goiás, GO, e diante da solicitação da Universidade de Brasília, os bombeiros se dispuseram a realizar o resgate da carga útil, acompanhando a equipe do projeto e auxiliando com os instrumentos especializados. Então, no dia 31/05, a equipe conseguiu recuperar a carga útil com a ajuda dos bombeiros. Os dados dos cartões microSD foram processados e as imagens das câmeras recuperadas.

As Figuras 3.21 e 3.22 mostram os momentos de preparação para o lançamento. Na Figura 3.24 é possível observar o trajeto percorrido pelo *balloonsat*, a partir dos dados do sistema APRS, e na Figura 3.23 é possível analisar o percurso de acordo com os dados do GPS embarcado. A Figura 3.25 mostra a simulação do lançamento e o ponto de queda previsto e a Figura 3.26 mostra o ponto de queda real da carga útil. A distância entre esses dois pontos é de mais de 17km. Novamente, a dificuldade de ter, com precisão, os dados para a simulação fez com que a distância entre os locais previsto e real fosse considerável. Com os dados do GPS foi possível gerar a Figura 3.29 que mostra a variação de altitude do *balloonsat* com o tempo. Devido a recuperação da carga útil uma semana depois do lançamento, a bateria que alimentava o sistema foi drenada até a perda completa de carga, que aconteceu 2h após a queda do *balloonsat*. Esse fato pode ser observado na Figura 3.27. Inicialmente a tensão da bateria não varia muito. Entretanto, depois de um determinado valor de tensão, a queda tornou-se cada vez mais brusca, desligando o sistema. O uso de baterias dessa forma não é recomendado pois danifica permanentemente a bateria. Foi possível observar os danos



Figura 3.23: Trajetória do *balloonsat* pelos dados do GPS embarcado. *fonte: Google Earth*

a bateria de forma visual pois a bateria drenada até o fim de sua carga encontrava-se estufada, devido a liberação de gases na parte interna.

As Figuras 3.30 e 3.31, mostram a variação da temperatura com o tempo. Vale lembrar que os sensores de temperatura BMP085, DS18B20 e SHT15 se encontravam no exterior da carga útil e o sensor MS5611 no interior, protegido pelo isolamento térmico. A variação de temperatura, por volta do minuto 200 de voo, caracteriza a existência da tropopausa na atmosfera. Também, a queda de temperatura por volta do minuto 280 é sinal da queda da carga útil. Uma das explicações para essa queda de temperatura são as mudanças de posição derivadas da queda rápida da carga útil, devido a atmosfera não oferecer resistência suficiente para inflar o paraquedas e diminuir a velocidade. Observando as Figuras 3.30 e 3.31, é perceptível que existe um atraso na resposta aos estímulos externos que modificam a temperatura, entre os sensores posicionados do lado de fora e os sensores posicionados do lado de dentro da caixa. Esse atraso pode ser determinado pelo isolamento térmico da caixa de isopor. De acordo com os dados apresentados, é possível perceber que as variações de temperatura dentro da caixa de isopor são menores que a variação de temperatura externa. A Figura 3.28 representa os dados de umidade relativa durante o voo, enquanto as Figuras 3.32 e 3.33 apresentam os dados de pressão obtidos.

Os sensores de radiação infravermelha e ultravioleta não apresentaram resultados, de tal forma que não é possível realizar qualquer interpretação dos dados desses sensores. Provavelmente faz-se necessário procurar outro modelo de sensor para a medição desses parâmetros.

As Figuras 3.34 a 3.39 foram obtidas com a câmera embarcada na carga útil. Considerando que uma das aplicações do LAICAnSat é sensoriamento remoto, imagens do *Google Maps* foram

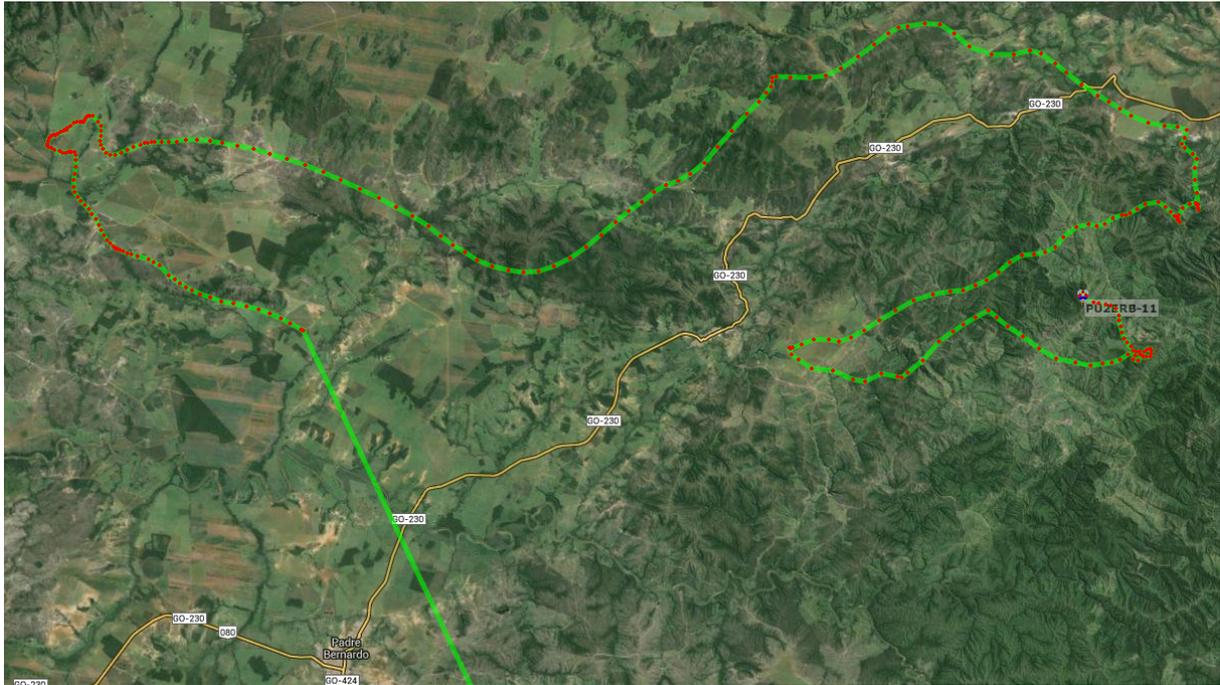


Figura 3.24: Trajetória do balloonsat dada pelo sistema APRS. fonte: <http://aprs.fi>

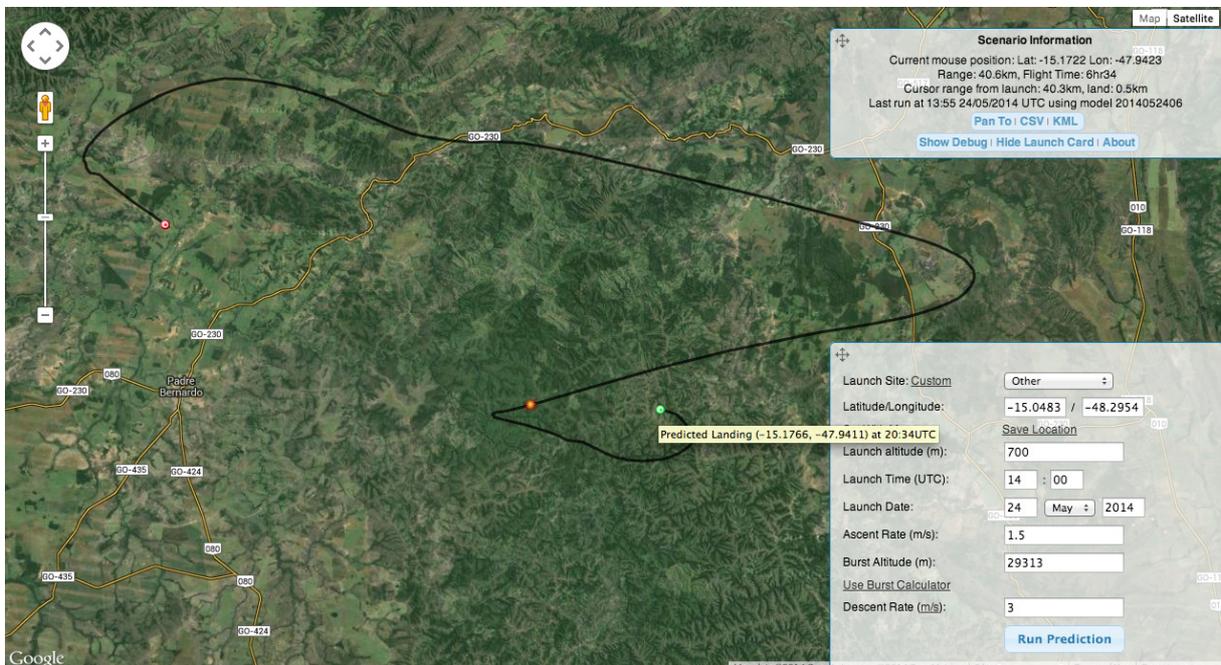


Figura 3.25: Simulação do lançamento e local de pouso previsto. fonte: <http://predict.habhub.org>

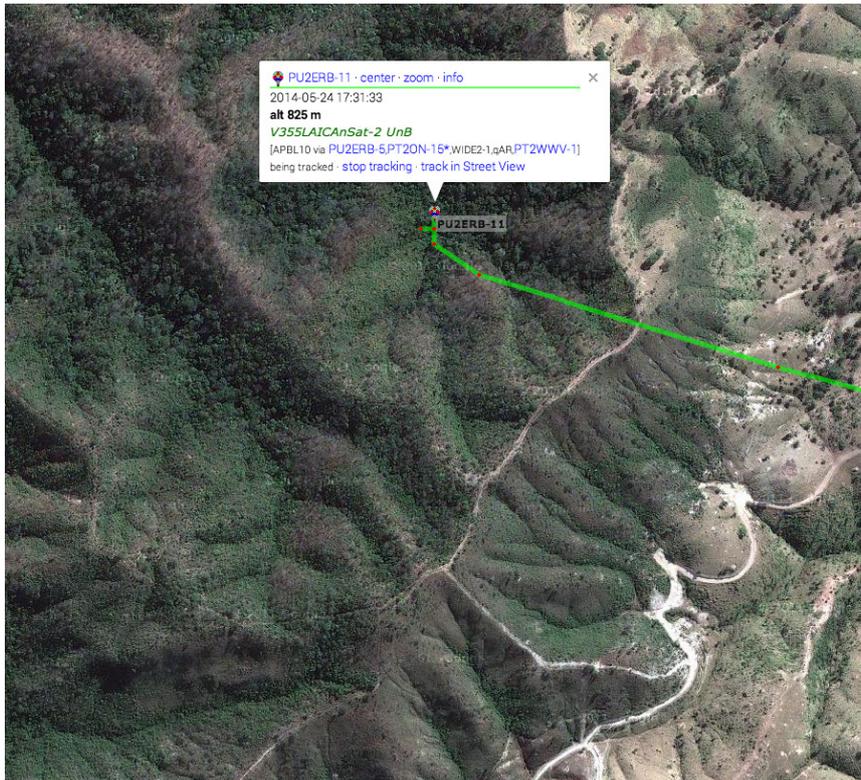


Figura 3.26: Local do pouso real. *fonte: <http://aprs.fi>*

comparadas com as imagens obtidas durante o voo. Observando as imagens em questão, em especial as Figuras 3.34, 3.36 e 3.38, é possível identificar localidades que mudaram consideravelmente, com a adição de casas e outras instalações, ou até mesmo obter informações sobre o plantio de culturas. Diferentemente das imagens obtidas por satélite, as imagens obtidas pelo LAICAnSat são mais atuais, tornando possível acompanhar o desenvolvimento de atividades, como o desmatamento de uma região. Algumas atividades, porém, necessitam câmeras e sensores que operam fora da faixa de luz visível. A instalação desse equipamento também é possível, dependendo dos requisitos de potência e características de massa e volume.

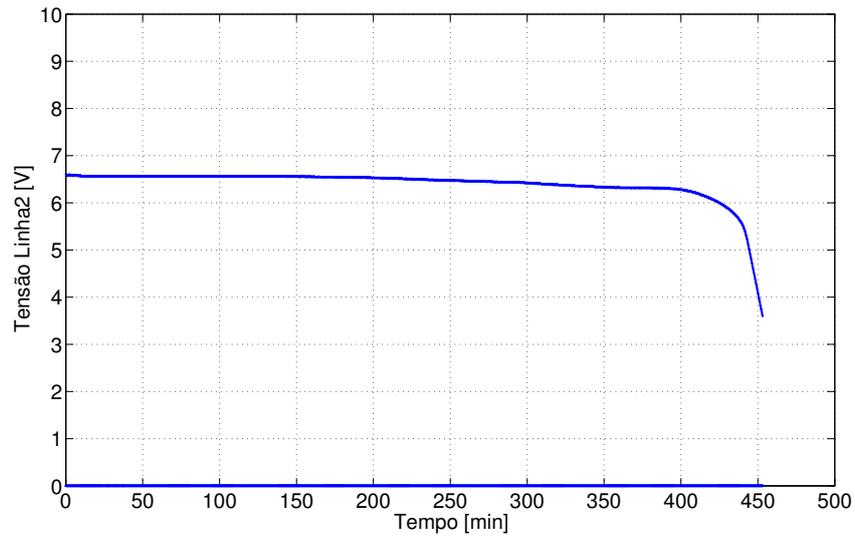


Figura 3.27: Tensão na saída da bateria.

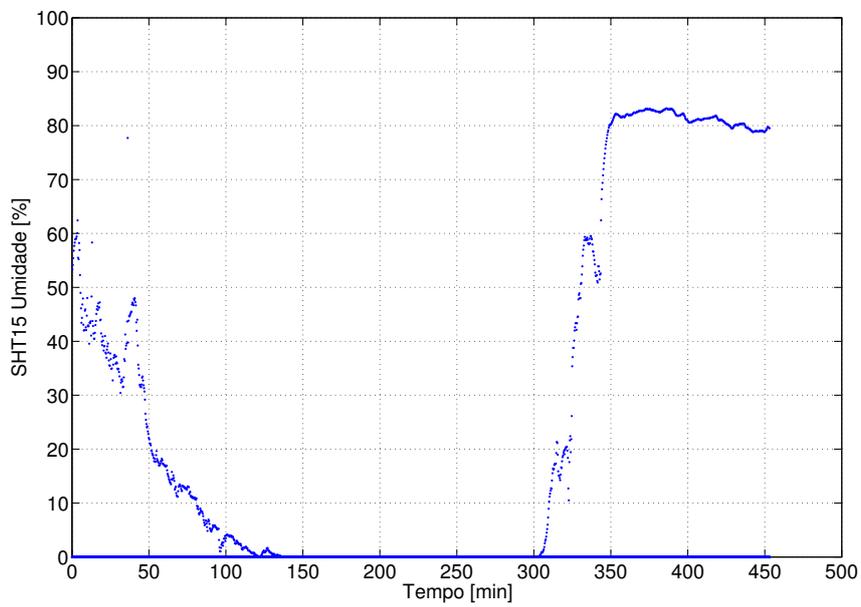


Figura 3.28: Dados da umidade relativa do ar durante o voo.

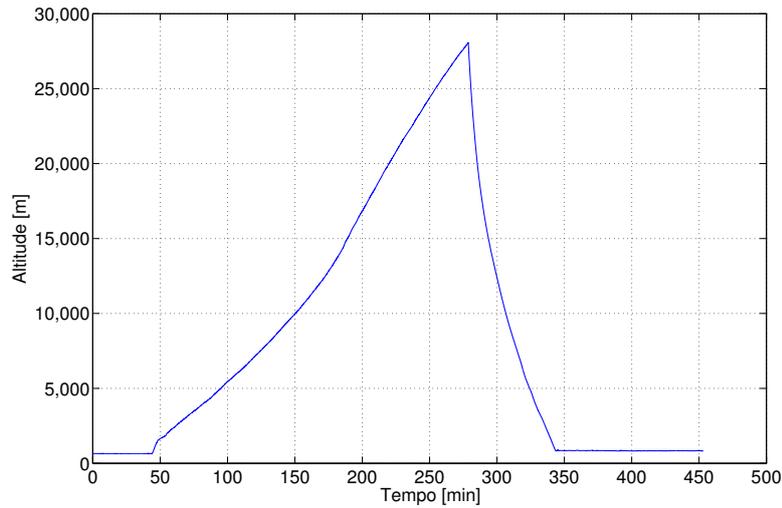
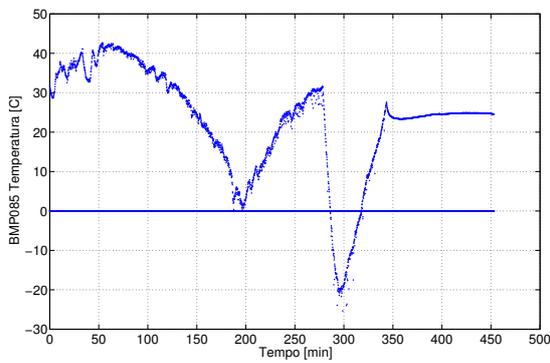
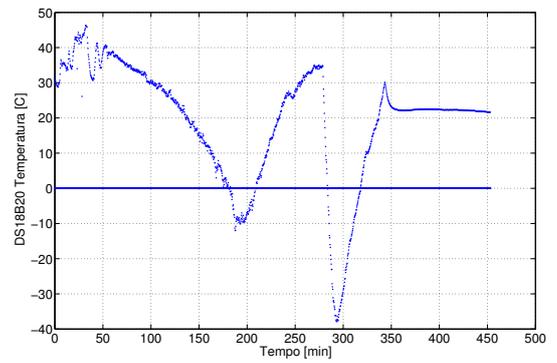


Figura 3.29: Variação da altitude (GPS) durante o voo.

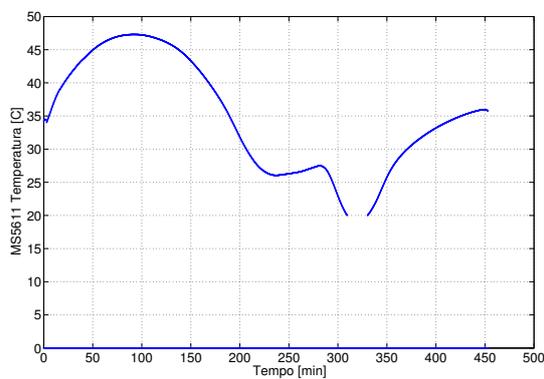


(a) Variação de temperatura no sensor BMP085.

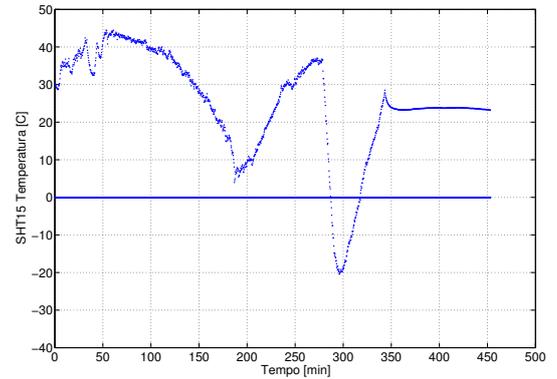


(b) Variação de temperatura no sensor DS18B20.

Figura 3.30: Dados obtidos no segundo lançamento.



(a) Variação de temperatura no sensor MS5611.



(b) Variação de temperatura no sensor SHT15.

Figura 3.31: Dados obtidos no segundo lançamento.

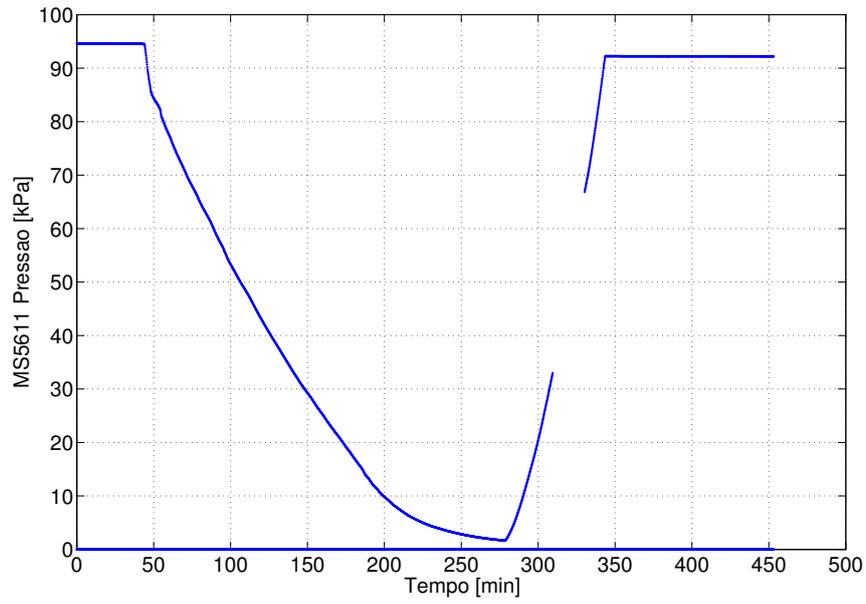


Figura 3.32: Variação de pressão no sensor MS5611.

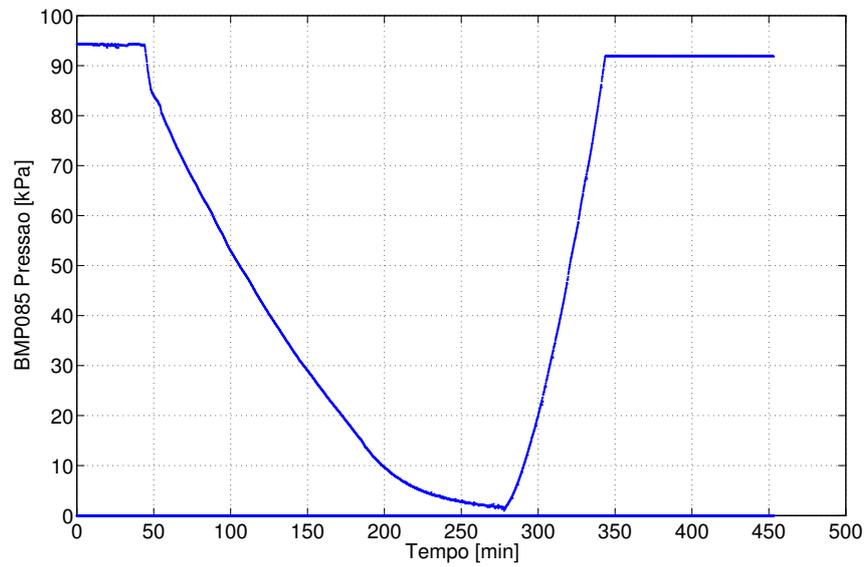


Figura 3.33: Variação de pressão no sensor BMP085.



Figura 3.34: Imagem da superfície terrestre durante vôo do LAICAnSat-2.



Figura 3.35: Imagem do local mostrado na Figura 3.34. *fonte: Google Maps*



Figura 3.36: Imagem da superfície terrestre durante vôo do LAICAnSat-2.

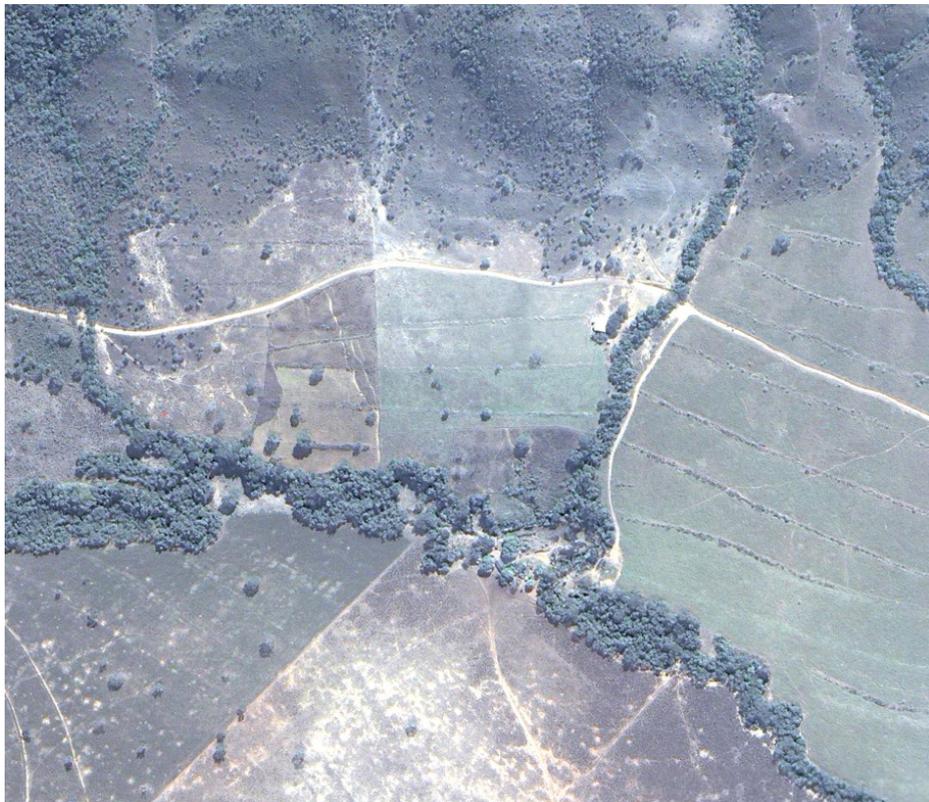


Figura 3.37: Imagem do local mostrado na Figura 3.36. *fonte: Google Maps*



Figura 3.38: Imagem da superfície terrestre durante vôo do LAICAnSat-2.



Figura 3.39: Imagem do local mostrado na Figura 3.38. *fonte: Google Maps*

Capítulo 4

Conclusões e Perspectivas Futuras

Focus on the journey, not on arriving at a certain destination.

Chris Hadfield

Esse trabalho apresentou o desenvolvimento de uma plataforma de alta altitude para meteorologia e sensoriamento remoto. Inicialmente foi apresentado um breve histórico de balões estratosféricos, resumindo os principais acontecimentos na área de balões de alta altitude. Foram ainda apresentados os principais acontecimentos nessa área no Brasil, desde o final da década de 60 até os dias atuais, comentando os principais experimentos, grupos de pesquisa atuantes, localidades onde aconteceram lançamentos. Em seguida, foram comentados aspectos técnicos de balões de alta altitude, buscando diferenciar as três categorias existentes: balão de pressão zero, *balloonsat* e balão-sonda. Os *balloonsats* foram descritos e classificados de acordo com parâmetros; e projetos de destaque desenvolvidos utilizando essa plataforma foram descritos. Mais adiante foi apresentado uma modelagem de um balão estratosférico. A partir das equações gerais descritas para balões de alta altitude, o caso do balão-sonda foi derivado fazendo considerações a respeito de determinadas variáveis.

Considerações a respeito da escolha de *hardware* para projetos foram expostas, assim como as especificidades para projetos de equipamentos aeroespaciais, levando em consideração o ambiente onde irão operar. O *hardware* desenvolvido para o LAICAnSat foi apresentado e cada sensor e subsistema descrito, comentando as escolhas realizadas, bem como sugerindo ainda outras alternativas que podem ser necessárias para os passos futuros do projeto. A escolha do hardware foi complicada em algumas situações devido às dificuldades em encontrar componentes e materiais no Brasil. Além disso, o tempo de entrega de alguns produtos importados pode ser bem maior do que o esperado. Assim, é importante que seja seguido um planejamento a respeito da aquisição de novos componentes e materiais.

Os testes e experimentos com o sistema desenvolvido foram apresentados, buscando destacar as considerações mais importantes para sustentar as conclusões alcançadas. O teste com a aeronave foi um fato importante para as decisões a respeito do subsistema de comunicação do *balloonsat*, pois a partir das limitações demonstradas nesse teste a equipe buscou a alternativa de utilizar frequências de radioamador, em especial o sistema APRS. Os dois lançamentos realizados mostraram que essa

decisão foi correta, pois em nenhum momento o *balloonsat* apresentou problemas de comunicação. O primeiro lançamento foi importante para avaliar a proposta de logística do lançamento e realizar algumas correções no projeto, que só foram detectadas após o teste realizado com a aeronave. Além disso, nesse lançamento o subsistema de comunicação foi testado pela primeira vez. O segundo lançamento foi também importante pois foram implementados mais sensores no sistema. Apesar de não ter sido proposital, o voo mais longo, com aproximadamente 5h de duração, permitiu testar melhor o sistema embarcado.

Perspectivas futuras

Esses primeiros passos do projeto LAICAnSat foram necessários para superar alguns desafios iniciais do desenvolvimento de projetos de alta altitude. Superados esses desafios, novas perspectivas se abrem para desenvolvimento de projetos mais elaborados, com outras dificuldades. A pesquisa bibliográfica realizada indica que efetivamente os balões estratosféricos são uma plataforma interessante para pesquisa e que cada vez mais estudantes vem utilizando essa plataforma, dentro do contexto do *balloonsat*, para desenvolver habilidades específicas de engenharia. Dessa forma, como trabalhos futuros, propõe-se:

- Desenvolvimento de mecanismos de controle de altitude e flutuação através da adaptação de uma válvula para controle do volume de gás no balão de látex;
- Desenvolvimento de mecanismos para controle de apontamento de câmeras;
- Desenvolvimento de um computador de bordo, utilizando o padrão PC104;
- Desenvolvimento de um subsistema de energia, utilizando o padrão PC104;
- Desenvolvimento de um subsistema de comunicação, utilizando o padrão PC104;

Com o constante aprimoramento da plataforma, pretende-se futuramente disponibilizar espaço para outros grupos de pesquisa embarcarem experimentos científico, ou cooperarem no desenvolvimento de *hardware* e *software*, estabelecendo parcerias para pesquisa em alta altitude. Atualmente, a equipe do LAICAnSat está em contato com um pesquisador da Unidade de Astrobiologia do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, em Campinas, SP, investigando a possibilidade de embarcar um experimento com células vivas em lançamentos futuros, e também com o Departamento de Química e Bioquímica da *Montana State University*, EUA, analisando possibilidades de cooperação em missões que envolvam fases de flutuação em alta altitude. Além disso, a equipe iniciou contatos com a Google nos EUA, com objetivo de verificar a possibilidade de cooperar com os testes do Projeto Loon realizados no Brasil, como por exemplo no estudo de enlaces de comunicação entre balões estratosféricos.

Publicações

No período de desenvolvimento do projeto, uma publicação [28] foi realizada na *Aerospace Conference 2014*, do *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*. O abstract do artigo publicado é apresentado a seguir:

This work presents the first advanced level CanSat developed by the University of Brasilia, the LAICAnSat-1. The main objective is to design, build and launch an experimental high altitude balloon CanSat with meteorology and remote sensing applications. Both the scientific need for a self retrievable radiosonde, with precise and high quality sensors, and a high altitude low-cost remote sensing experimental platform inspired the team on the concept of LAICAnSat-1. This platform has a broad sensor suite that provides information about temperature, pressure, humidity and UV light level. It also has a modular design, based on stacks, allowing other sensors to be easily embedded to the main module. The remote sensing sensor is a small high performance camera, constantly imaging the Earth surface. Those images can be used for several applications, including emergency and quick solutions for monitoring the Amazon forest, Pantanal, and other important biomes, supporting and complementing research projects on remote areas. The control system has four sensors to determine the payload attitude and position. Furthermore, this platform could potentially be exploited by the industry, representing a safe and inexpensive way to test components and circuits in high altitudes, as for instance to certify Commercial Off-The-Shelf electronic components with respect to their behavior under low temperature and pressure. The LAICAnSat-1 represents a preliminary step in the development of complex aerospace projects and is also an important first experience for engineering students.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] YAJIMA, N. *Scientific Ballooning: Technology and Applications of Exploration Balloons Floating in the Stratosphere and the Atmosphere of Other Planets*. [S.l.]: Springer, 2009.
- [2] HERRELL, L.; ZHOU, X. Access to space for technology validation missions: Exploring possibilities of suborbital flight. In: . [S.l.: s.n.], 2006.
- [3] WINTER, O. C.; PRADO, A. (Ed.). *A conquista do Espaço: do Sputnik à Missão Centenário*. 1. ed. [S.l.]: Livraria da Física, 2007.
- [4] SMITH, M. S.; ALLISON, G. The return of the balloon as an aerospace test platform. In: *AIAA International Balloon Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 1999.
- [5] JONES, W. V. Evolution of scientific ballooning and its impact on astrophysics research. In: *Advances in Space Research*. [S.l.]: Elsevier, 2014. v. 53, p. 1405 – 1414.
- [6] GUZIK, T. G.; WEFEL, J. P. The high altitude student platform (HASP) for student-built payloads. In: *Advances in Space Research*. [S.l.]: Elsevier, 2006. v. 37, p. 2125 – 2131.
- [7] KOEHLER, C. Balloonsat: Missions to the edge of space. In: *16th Annual/USU Conference on Small Satellites*. [S.l.: s.n.], 2004.
- [8] MINICHELLO, A. COTS in space: Developing and environmental control system for balloon-borne air-cooled electronics. In: *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, 2006. IThERM '06. The Tenth Intersociety Conference on*. [S.l.]: IEEE, 2006. p. 1390 – 1399.
- [9] ELLISON, B. et al. The louisiana aces student-built balloonsat program. In: *Advances in Space Research*. [S.l.]: Elsevier, 2006. v. 38, p. 2253–2258.
- [10] BRASILEIRA, A. E. Plano nacional de atividades espaciais. In: . [S.l.]: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2012.
- [11] DEPUTADOS, C. de Altos Estudos e Avaliação Tecnológica Câmara dos. Caderno de altos estudos. In: CÂMARA, E. (Ed.). *A Política Espacial Brasileira*. [S.l.]: Edições Câmara, 2009. Parte I, n. 07.
- [12] DEPUTADOS, C. dos. Caderno de altos estudos. In: CÂMARA, E. (Ed.). *A Política Espacial Brasileira*. [S.l.]: Edições Câmara, 2010. Parte II - Análises Técnicas, n. 07.

- [13] BREISKY, B. *On Its Centenary, Celebrating a Ride That Advanced Physics*. 08 2012. Disponível em: <<http://www.nytimes.com/2012/08/07/science/space/when-victor-hess-discovered-cosmic-rays-in-a-hydrogen-balloon.html>>.
- [14] SAVAGE, B. *Martin Schwarzschild's diffraction limited imagery from the stratosphere*.
- [15] CORLISS, W. *NASA Sounding Rockets, 1958-1968*. [S.l.], 1971.
- [16] DETHLOFF, H. *Exploring Near Space: Scientific Ballooning and the Columbia Scientific Balloon Facility*. [S.l.: s.n.], 2012.
- [17] AEROSTAR, R. *Aerospace Platforms*. Disponível em: <<http://ravenaerostar.com/solutions/aerospace/product-overview>>.
- [18] OFFICE, N. B. P. *Scientific Balloons*. Disponível em: <<http://sites.wff.nasa.gov/code820/>>.
- [19] CORREA, R. et al. Scientific ballooning in Brazil. In: *Advances in Space Research*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 30, p. 1111 – 1115.
- [20] RINKE, E.; FERNANDES, J. O. Scientific ballooning in Brazil. In: *38th COSPAR Scientific Assembly*. [S.l.: s.n.], 2010. (COSPAR Meeting, v. 38), p. 4053.
- [21] PACHECO, L. *Stratospheric balloons launch bases and sites*. Disponível em: <<http://stratocat.com.ar/bases/balloons-brazil.htm>>.
- [22] VILLELA, T.; TEAM, M. The first flight of the MASCO telescope. In: *36th COSPAR Scientific Assembly*. [S.l.: s.n.], 2006. (COSPAR Meeting, v. 36), p. 2551.
- [23] VILLELA, T. et al. An overview of the MASCO balloon-borne gamma-ray experiment. In: *Advances in Space Research*. [S.l.]: Elsevier Science, 2002. v. 30, n. 5, p. 1333 – 1342.
- [24] VILLELA, T. et al. Preflight tests of the MASCO telescope. In: *Advances in Space Research*. [S.l.]: Elsevier, 2000. Scientific Ballooning, p. 1411 – 1414.
- [25] HOMEPAGE Projeto Loon. Disponível em: <<http://www.google.com/intl/pt-BR/loon/>>.
- [26] ELLISON, B. et al. The Louisiana ACES student-built balloonsat program. In: *Advances in Space Research*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 38, p. 2253 – 2258.
- [27] RED Bull Stratos. 2012. Disponível em: <<http://www.redbullstratos.com/technology/parachute/>>.
- [28] NEHME, P. H. D. et al. Development of a meteorology and remote sensing experimental platform: The LAICAnSat-1. In: *Aerospace Conference, 2014 IEEE*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1 – 7.

ANEXOS

I. DIAGRAMAS ESQUEMÁTICOS

II. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

O CD, em anexo, possui uma cópia digital do relatório, além de pastas com arquivos utilizados durante a execução do trabalho.

- **Dados** contém os dados obtidos durante os experimentos realizados;
- **Datasheets** contém os datasheets dos componentes eletrônicos utilizados no trabalho;
- **Hardware** contém os esquemáticos utilizados nesse trabalho;
- **Programas** contém os programas em C e os códigos em MATLAB utilizados para a aquisição e processamento de dados;
- **Referências** contém artigos e apresentações de projetos de Balões de Alta Altitude.

III. LEGISLAÇÃO

RBHA 101

OPERAÇÃO NO BRASIL DE BALÕES CATIVOS, FOGUETES NÃO TRIPULADOS E BALÕES LIVRES NÃO TRIPULADOS

ESTE ARQUIVO CONTÉM O TEXTO DO RBHA 101, APROVADO PELA PORTARIA Nº 626/DGAC DE 19 DE DEZEMBRO DE 1994, PUBLICADA NO DOU Nº 4, DE 15 DE JANEIRO DE 1995, INCLUINDO AS ALTERAÇÕES INTRODUZIDAS PELA SEGUINTE PORTARIA:

- Portaria DAC 200/STE de 05/04/1999, DOU 76, de 23/04/99; cancela as regras referentes à operação de celulares aéreos.

ÍNDICE

Portaria de Aprovação
Prefácio

SUBPARTE A - GERAL

101.1 - APLICABILIDADE
101.3 - AUTORIZAÇÃO DE DESVIOS
101.5 - OPERAÇÃO EM ÁREAS RESTRITAS OU PROIBIDAS
101.7 - OPERAÇÕES PERIGOSAS

SUBPARTE B - BALÕES CATIVOS

101.11 - APLICABILIDADE
101.13 - LIMITAÇÕES OPERACIONAIS
101.17 - REQUISITO DE ILUMINAÇÃO E DE MARCAS
101.19 - DISPOSITIVO DE DEFLAÇÃO RÁPIDA

SUBPARTE C - FOGUETES NÃO TRIPULADOS

101.21 - APLICABILIDADE
101.23 - LIMITAÇÕES OPERACIONAIS
101.25 - NOTIFICAÇÕES SOBRE OPERAÇÃO

SUBPARTE D - BALÕES LIVRES NÃO TRIPULADOS

101.31 - APLICABILIDADE
101.33 - LIMITAÇÕES OPERACIONAIS
101.35 - REQUISITOS DE EQUIPAMENTOS E MARCAS
101.37 - NOTIFICAÇÕES SOBRE OPERAÇÃO
101.39 - MENSAGENS DE POSIÇÃO DO BALÃO

BIBLIOGRAFIA

Portaria nº 626 /DGAC de 19 de dezembro de 1994.

Aprova a Norma que estabelece regras para operação no Brasil de Balões Cativos, Celulares Aéreos, Foguetes não Tripulados e Balões Livres não Tripulados.

O DIRETOR-GERAL DO DEPARTAMENTO DE AVIAÇÃO CIVIL, tendo em vista o disposto no item 5 do artigo 5º da Portaria nº 453/GM5, de 02 de agosto de 1991, resolve:

Art. 1º - Aprovar a NSMA 58-101 - "Operação no Brasil de Balões Cativos, Celulares Aéreos, Foguetes não Tripulados e Balões Livres não Tripulados.

Art. 2º - Esta Portaria entrará em vigor na data de sua publicação no Diário Oficial da União, revogadas as disposições em contrário.

Ten Brig-do-Ar - MAURO JOSÉ MIRANDA GANDRA
Diretor Geral

PREFÁCIO

Em cumprimento ao determinado no Código Brasileiro de Aeronáutica, Lei nº 7565, de 19 de dezembro de 1986, em seu capítulo IV, artigo 66, parágrafo 1º, e pela Portaria nº 453/GM5, de 02 de agosto de 1991, artigo 5º, item 5, que dispõe sobre o Sistema de Segurança de Vôo da Aviação Civil, o Regulamento Brasileiro de Homologação Aeronáutica 101 - RBHA 101 - "Balões Cativos, Celulares Aéreos, Foguetes não Tripulados, e Balões Livres não Tripulados estabelece regras para suas operações no Brasil com o objetivo de esporte e lazer ou para fins comerciais.

Foi adotado como texto de referência do RBHA 101 o do "FAR PART 101", da FAA dos Estados Unidos da América.

REGULAMENTO 101 - SUBPARTE A
OPERAÇÃO DE BALÕES CATIVOS, FOGUETES NÃO
TRIPULADOS E BALÕES LIVRES NÃO TRIPULADOS
GERAL

101.1 - APLICABILIDADE

(a) Exceto como estabelecido no parágrafo (c) desta seção este regulamento estabelece regras para a operação no Brasil, com o objetivo de esporte e lazer ou para fins comerciais, de:

(1) Qualquer balão que possua um diâmetro superior a 1,85 m ou que comporte uma quantidade de gás superior a 4,5 m³ e que seja amarrado à superfície de terra, ou a um objeto estático sobre essa superfície, por um fio ou cabo;

(2) [Cancelado]

(3) Qualquer foguete não tripulado, exceto:

(i) Foguetes para espetáculos pirotécnicos;

(ii) Modelos de foguetes:

(A) Usando não mais que 0,125 kg de propelente;

(B) Feitos de papel, madeira ou plástico quebrável, contendo quantidade não substancial de partes metálicas e pesando não mais que 0,5 kg, incluído o peso do combustível; e

(4) Qualquer balão livre não tripulado que:

(i) Transporte um pacote com carga pesando mais do que 3 kg;

(ii) Transporte uma carga composta por 2 ou mais pacotes com peso total superior a 5,5 kg; ou

(iii) Utilize para dependurar a carga (de qualquer peso ou volume) uma corda ou cabo que requeira uma força de impacto superior a 23 kg para ser rompido, separando a carga do balão.

(b) [Cancelado]

(c) Este regulamento não se aplica às operações de balões cativos, foguetes não tripulados e balões livres não tripulados conduzidas pelas Forças Armadas do País.

(d) O não cumprimento das normas deste regulamento na operação de balões cativos, foguetes não tripulados e balões livres não tripulados é base para invalidar a autorização emitida para tal operação e para a aplicação das sanções previstas no Código Brasileiro de Aeronáutica. Por outro lado, em operações comerciais abrangidas por este regulamento, o cumprimento do aqui disposto não isenta o operador do cumprimento de outras leis, normas e regulamentos federais, estaduais ou municipais (legislação trabalhista, tributária, comercial, etc, por exemplo).

(Port. DAC 200/STE, 05/04/1999, DOU)

101.3 - AUTORIZAÇÃO DE DESVIOS

Ninguém pode conduzir operações que requeiram desvios deste regulamento, exceto se possuir uma autorização específica emitida pelo DAC.

101.5 - OPERAÇÃO EM ÁREAS RESTRITAS OU PROIBIDAS

Nenhuma pessoa pode operar um balão cativo, um foguete não tripulado ou um balão livre não tripulado em área restrita ou proibida, a menos que possua permissão emitida pela entidade que utiliza ou controla a área, como apropriado.

101.7 - OPERAÇÕES PERIGOSAS

(a) Ninguém pode operar qualquer balão cativo, foguete não tripulado ou balão livre não tripulado de modo a criar riscos para si, outras pessoas ou suas propriedades.

(b) Ninguém, quando operando um balão cativo pode permitir que qualquer coisa seja lançada do mesmo de modo a criar riscos para si, outras pessoas ou suas propriedades.

(c) Ninguém, quando operando um foguete não tripulado ou um balão livre não tripulado pode permitir que qualquer coisa seja lançada do mesmo sem autorização prévia da autoridade aeronáutica e de modo a criar riscos para si, outras pessoas ou suas propriedades.

REGULAMENTO 101 - SUBPARTE B

BALÕES CATIVOS

101.11 - APLICABILIDADE

Esta subparte aplica-se à operação de Balões Cativos.

101.13 - LIMITAÇÕES OPERACIONAIS

(a) Exceto como previsto no parágrafo(b) desta seção, ninguém pode operar um balão cativo:

- (1) A menos de 500 pés abaixo da base de qualquer nuvem;
- (2) A mais de 500 pés acima de superfície de terra;
- (3) Em uma área onde a visibilidade no solo for menor do que 4.500 m, ou
- (4) A uma distância que comprometa a operação de qualquer aeródromo.

(b) O parágrafo (a) desta seção não se aplica à operação de um balão abaixo do topo de uma estrutura e a uma distância não superior a 75 metros da mesma, desde que o balão não prejudique a visibilidade dessa estrutura. Essa operação é denominada "operação protegida".

101.15 - NOTIFICAÇÃO SOBRE OPERAÇÃO

Nenhuma pessoa pode operar um balão cativo em operações não protegidas, a mais de 150 pés acima de superfície da terra, a menos que, pelo menos 24 horas antes do início da operação, essa pessoa apresente ao SERAC com jurisdição sobre a área as seguintes informações:

- (a) Nome e endereço dos proprietários e operadores do balão;
- (b) O tamanho do balão;
- (c) A localização do evento;
- (d) A altura acima de superfície da terra na qual o balão será operado; e
- (e) A data, hora e a duração do evento.

101.17 - REQUISITO DE ILUMINAÇÃO E DE MARCAS

(a) Ninguém pode operar um balão cativo entre o pôr e o nascer do sol, a menos que o balão, assim como seu cabo de ligação à terra, estejam iluminados de modo a prover um aviso visual similar ao requerido para obstruções à navegação aérea.

(b) Ninguém pode operar um balão cativo entre o pôr e o nascer do sol, a menos que seu cabo de ligação à terra possua galhardetes ou faixas coloridas presas ao mesmo, em intervalos não inferiores a 50 pés, iniciando-se 180 pés acima da superfície da terra e visíveis a, pelo menos, 1.500 m de distância.

101.19 - DISPOSITIVO DE DEFLAÇÃO RÁPIDA

Nenhuma pessoa pode operar um balão cativo a menos que ele possua um dispositivo que, automática e rapidamente, esvazie-o no caso de ruptura do cabo de ligação à terra. Se o dispositivo não funcionar apropriadamente, o operador deverá imediatamente notificar a ocorrência ao controle de tráfego aéreo com jurisdição sobre a área, informando a hora do escape e a trajetória estimada do balão.

REGULAMENTO 101 - SUBPARTE C
FOGUETES NÃO TRIPULADOS

101.21 - APLICABILIDADE

Esta subparte aplica-se à operação de foguetes não tripulados.

101.23 - LIMITAÇÕES OPERACIONAIS

Ninguém pode operar um foguete não tripulado:

- (a) De modo a criar risco de colisão com aeronaves;
- (b) Em espaço aéreo controlado;
- (c) A uma distância que comprometa a operação de qualquer aeródromo;
- (d) Em qualquer altitude onde nuvens ou fenômenos de opacidade similar apresentarem cobertura superior a cinco décimos;
- (e) Em qualquer altitude onde a visibilidade horizontal for menor do que 5000 metros;
- (f) Dentro de qualquer nuvem; e
- (g) A menos de 500 metros de qualquer pessoa ou propriedade que não esteja associada à operação;
e
- (h) Entre o pôr e o nascer do sol.

101.25 - NOTIFICAÇÃO SOBRE OPERAÇÃO

Ninguém pode operar um foguete não tripulado a menos que tenha recebido autorização do SERAC com jurisdição sobre a área, devendo apresentar a esse serviço as seguintes informações:

- (a) Nome e endereço dos operadores;
- (b) Quantidade de foguetes a serem lançados;
- (c) Tamanho e peso de cada foguete;
- (d) Altitude máxima a ser atingida por cada foguete;
- (e) Local da operação;
- (f) Dia, horário e duração da operação; e
- (g) Quaisquer outras informações pertinentes requeridas pelo SERAC.

REGULAMENTO 101 - SUBPARTE D
BALÕES LIVRES NÃO TRIPULADOS

101.31 - APLICABILIDADE

Esta subparte aplica-se à operação de balões livres não tripulados.

101.33 - LIMITAÇÕES OPERACIONAIS

Ninguém pode operar um balão livre não tripulado:

- (a) A menos que autorizado pelo SERAC com jurisdição sobre a área;
- (b) Em qualquer altitude onde nuvens ou fenômenos de opacidade similar apresentem cobertura superior a cinco décimos;
- (c) Em qualquer altitude abaixo de 60.000 pés de altitude pressão onde a visibilidade horizontal for menor do que 8Km;
- (d) Durante os primeiros 1.000 pés da subida, sobre área densamente povoada de cidade, vila ou vilarejo ou sobre um conjunto de pessoas reunidas ao ar livre e não associadas à operação do balão; ou
- (e) De uma maneira que o impacto do balão ou de parte do mesmo, incluindo sua carga, contra o solo possa criar riscos a pessoas e propriedades não associadas à operação.

101.35 - REQUISITOS DE EQUIPAMENTOS E MARCAS

(a) Ninguém pode operar um balão livre não tripulado a menos que:

(1) Ele seja equipado com, pelo menos, dois sistemas ou dispositivos de alijamento da carga-paga que operem independentemente um do outro;

(2) Existam pelo menos dois métodos, sistemas, dispositivos ou combinações dos mesmos, que funcionem independentemente um do outro, empregados para interromper o vôo do envelope do balão; e

(3) O envelope do balão seja equipado com dispositivo(s) refletor(es) de radar ou seja confeccionado com material que apresente eco radar na faixa de frequências indo de 200 MHz a 2.700 MHz.

(4) O operador deve acionar o apropriado dispositivo previsto nos parágrafos (a)(1) ou (a)(2) desta seção quando as condições meteorológicas forem inferiores àquelas previstas por esta subparte para a operação ou se um mau funcionamento ou qualquer outro motivo tornar a continuação da operação um risco para o tráfego aéreo ou para pessoas e propriedades na superfície.

(b) Ninguém pode operar um balão livre não tripulado, que seja equipado com uma antena de arrasto que requeira uma força de impacto superior a 23 Kg para romper-se em qualquer ponto, a menos que a antena possua galhardetes ou fitas coloridas fixadas a intervalos não inferiores a 50 pés e que sejam visíveis de uma distância de, pelo menos, 1.500 metros.

101.37 - NOTIFICAÇÕES SOBRE OPERAÇÃO

(a) Informações antes do lançamento. Exceto como previsto no parágrafo (b) desta seção, ninguém pode operar um balão livre não tripulado a menos que autorizado pelo SERAC com jurisdição sobre a área, devendo prestar a esse serviço as seguintes informações:

- (1) A identificação do balão;
- (2) A data e a hora estimada do lançamento;

(3) A localização do sítio de lançamento;

(4) A altitude de cruzeiro;

(5) A trajetória prevista e o tempo estimado para atingir altitude de cruzeiro ou 60.000 pés de altitude pressão, o que for menor;

(6) O comprimento e o diâmetro do balão, o comprimento do cordame, o peso da carga-paga e o comprimento de antena de arrasto;

(7) A duração prevista do vôo;

(8) O local e a hora prevista do impacto com a superfície da terra;

(b) Informação de cancelamento. Se a operação for cancelada a pessoa responsável pela mesma deve imediatamente informar ao SERAC ou ao controle de tráfego aéreo envolvido.

(c) Informação de lançamento. Cada pessoa operando um balão livre não tripulado deve informar ao controle de tráfego aéreo envolvido o horário do lançamento tão logo ele se efetue.

101.39 - MENSAGENS DE POSIÇÃO DO BALÃO

(a) Cada pessoa operando um balão livre não tripulado deve:

(1) A menos que o controle de tráfego aéreo requeira de outra maneira, acompanhar a trajetória do balão e informar sua posição a cada duas horas, no mínimo; e

(2) Encaminhar todas as posições do balão requeridas pelo controle de tráfego aéreo.

(b) Uma hora antes de ser iniciada a descida, cada pessoa operando um balão livre não tripulado deve enviar ao órgão de controle de tráfego aéreo mais próximo as seguintes informações referentes ao balão:

(1) A atual posição geográfica;

(2) A altitude;

(3) O tempo estimado para penetração na altitude pressão de 60.000 pés (se aplicável);

(4) A trajetória estimada em vôo estável; e

(5) O horário e o local estimado de impacto com a superfície da Terra.

(c) Se a posição do balão não for registrada em qualquer período de 2 horas de vôo, a pessoa operadora do balão livre não tripulado deve informar a ocorrência para o órgão de controle de tráfego aéreo mais próximo. A informação deve incluir a última posição conhecida e qualquer possível modificação na trajetória prevista. O controle de tráfego aéreo deve ser imediatamente informado se for restabelecido contato com o balão.

(d) Cada pessoa operando um balão livre não tripulado deve notificar ao controle de tráfego aéreo mais próximo o fim da operação.

IV. NOTAM



CINDACTA I

Primeiro Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo



FORMULÁRIO DE SOLICITAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DE INFORMAÇÃO AERONÁUTICA PARA REALIZAÇÃO DE EVENTO AERODESPORTIVO E AFINS

ANEXO AO DOC. _____

DADOS DO SOLICITANTE			
01	UNIDADE/ENTIDADE/ÓRGÃO/EMPRESA: UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – LABORATÓRIO DE AUTOMAÇÃO E ROBÓTICA (LARA)		
02	DATA DA SOLICITAÇÃO: 24/04/2014		
03	FAC-SÍMILE: (61) 3107-5590		
04	TELEFONE DE CONTATO: (61) 8262-0152 / (61) 9246-2386 / (61) 3107-5556 / FAX: (61) 3107-5590		
05	RESPONSÁVEL PELO EVENTO: PROF. DR. RENATO ALVES BORGES		
06	E.MAIL: RABORGES@ENE.UNB.BR		
07	RESPONSÁVEL PELA AUTORIZAÇÃO DA ÁREA:		
08	TELEFONE DO RESPONSÁVEL PELA AUTORIZAÇÃO DA ÁREA:		
DADOS DA SOLICITAÇÃO			
01	TIPO DE EVENTO: LANÇAMENTO DE BALÃO DE ALTA ALTITUDE		
02	CIDADE/MUNICÍPIO: MATO SECO	03	UF: GO
04	INDICADOR DE LOCALIDADE: S14° 58' 27.5" W48° 01' 16.1"		
05	LIMITES HORIZONTAIS		
	5.1 CIRCULAR (COORD. DO PONTO CENTRAL): S14° 58' 27.5" W48° 01' 16.1"		RAIO: 25km
	5.2 POLIGONAL		
	5.2.1 - PONTOS DE COORDENADAS:		
	5.2.2 - COORDENADA DO PONTO CENTRAL:		
	5.2.3 - RAIOS DO CÍRCULO DE ABRANGÊNCIA DA ÁREA DE INFLUÊNCIA:		
06	(HORÁRIOS-UTC) INÍCIO: 1000UTC	TÉRMINO: 1800UTC	
07	MÊS(ES), DIAS E HORÁRIOS (UTC) (JANELAS): ESTÃO PREVISTOS 2 LANÇAMENTOS PARA O MÊS DE MAIO, UM NO DIA 02/05 E OUTRO NO DIA 24/05. OS LANÇAMENTOS DEPENDEM DE CONDIÇÕES CLIMÁTICAS FAVORÁVEIS E OCORRERÃO SEMPRE ENTRE 1000UTC E 1800UTC. OBS: A POSIÇÃO DO BALÃO PODERÁ SER ACOMPANHADA PELA INTERNET, ACESSANDO O SITE HTTP://APRS.FI . NO CANTO SUPERIOR DIREITO DA TELA, NO CAMPO "TRACK CALLSIGN" DIGITE PU2ERB-11 E CLIQUE EM "SEARCH".		
08	LIMITE VERTICAL (ALTITUDE): 32 KM		
TERMO DE RESPONSABILIDADE			
<p>Declaro estar ciente de que a divulgação do evento em tela, pelo Órgão Regional, tem como finalidade exclusiva garantir a coordenação e o Controle do Tráfego Aéreo, bem como a segurança de voo, não estando implícita qualquer autorização relacionada com registro, homologação, fiscalização e outras relacionadas com a atividade técnica específica da operação.</p> <p>Declaro, ainda, que as informações acima prestadas são verdadeiras e que serão cumpridas as exigências e restrições legais previstas em normas e legislações vigentes da Autoridade de Aviação Civil, (ANAC), sobre o evento acima. Portanto, possuo autorização do responsável pela área a ser utilizada durante a operação e tanto a(s) aeronave(s) quanto o(s) envolvidos, diretamente, estão com as documentações em dia e em ordem.</p>			

Brasília

LOCAL

- DE, 24, 04, 2014

Assinatura



Brasília, 24 de Abril de 2014.

Exmo. Sr. Brig Ar Carlos Minelli de Sá

A Universidade de Brasília (UnB), através do Laboratório de Automação e Robótica, realizará, no mês de Maio de 2014, o lançamento de um balão atmosférico, com aplicações em meteorologia e sensoriamento remoto. O projeto LAICAnSat-1 é o primeiro projeto de balão atmosférico realizado pela Universidade de Brasília, sendo conduzido por uma equipe constituída por pessoas experientes na área, contando com o apoio de rádio amadores no segmento solo que darão suporte nas atividades de rastreamento e busca. O responsável pelo projeto é o Prof. Dr. Renato Alves Borges, rádio amador Classe C, indicativo de chamada PU2ERB.

O modo de operação do balão é muito semelhante ao modo de operação das sondas meteorológicas, lançadas diariamente do CINDACTA-1. Um balão de 1200 gramas será inflado com gás Hélio e lançado de um local no interior do círculo com centro definido pela coordenada S14° 58' 27.5", W48° 01' 16.1" e raio de 25km, no município de Mato Seco, no estado de Goiás. O balão estará carregando uma carga útil de aproximadamente 2kg. A taxa de ascensão do balão será de aproximadamente 6.5 m/s (1280 ft/min). Depois de 72 minutos, a 30 km de altitude (98,5 kft), o balão deve estourar e a carga útil ser liberada. Um paraquedas então se abre, diminuindo a velocidade de queda para aproximadamente 5 m/s. Durante todo o voo a carga útil grava os dados de sensores de temperatura, pressão, umidade, nível UV, posição e atitude. Uma pequena câmera de alta performance também vai embarcada ao sistema e tira fotos do solo em intervalos constantes. O tempo estimado de descida é de 108 minutos.

Estão previstos 2 (dois) lançamentos para o mês de maio de 2014, sendo as prováveis datas o dia 02 de Maio e o dia 24 de Maio, a depender de condições climáticas favoráveis. A equipe entrará em contato com o CINDACTA-1 pelo menos 24 horas antes do lançamento ser realizado para que este tome as devidas providências. Para a efetivação dessa missão científica solicitamos de Vossa Excelência encaminhar o **pedido para obtenção da indispensável autorização para o lançamento (NOTAM)** de:

1) 1 balão atmosférico (1200g) de curta duração, durante o período de 01 a 31 de Maio de 2014, com as especificações de voo acima.

As características do balão e da carga útil são:

Peso da carga útil: 2 kg

Dimensões da carga útil: 16 cm x 16 cm x 30 cm

Balão: 1 balão de látex de 1200g

Volume de Hélio: 5 m³

Altitude máxima prevista: 30km (98.5 kft)

Velocidade de subida: 6.5 m/s (1280 ft/m)

Velocidade de descida: 5 m/s (985 ft/m)

Duração da fase ascendente: 72-90 min

Duração da fase descendente: 70 min

Duração total do voo: 140-160 min

Balão rastreado em tempo real por APRS durante todas as etapas do voo.

O balão será equipado com um dispositivo que transmite sua posição na faixa de 2 metros utilizada por rádio amadores no Brasil, na frequência de 145.570MHz exclusiva para APRS segundo Resolução nº 452 de 11 de dezembro de 2006 da ANATEL. Na área do Distrito Federal existe um número satisfatório de repetidoras garantindo uma boa cobertura para o sistema APRS. Vale ressaltar que esse equipamento já foi utilizado previamente em diversos projetos de balões atmosféricos, transmitindo com sucesso de altitudes de até 40km.

Todo o voo do balão poderá ser acompanhado pela internet, através do site do sistema APRS (<http://aprs.fi>). Para obter as informações do balão, como longitude, latitude e altitude, é necessário seguir o procedimento:

1. Entrar no site <http://aprs.fi>;
2. No canto superior direito da tela, no campo "*Track callsign*", digitar o indicativo de chamada utilizado no balão PU2ERB-11 e clicar no botão "*Search*";
3. O balão deve então aparecer no mapa;
4. Para rastrear o balão, clique em "*Start Tracking*";
5. As informações atualizadas do balão serão mostradas em tempo real.

Com o objetivo de facilitar o contato com a equipe que estará realizando o lançamento, disponibilizamos aqui os telefones de 3 integrantes da equipe:

1. Renato Alves Borges (coordenador do projeto):

Cel: [REDACTED]

Email: raborges@ene.unb.br

2. Rafael Resende Dias:

Cel: [REDACTED]

Email: rafarrd@gmail.com

3. Pedro Henrique Dória Nehme

Cel: [REDACTED]

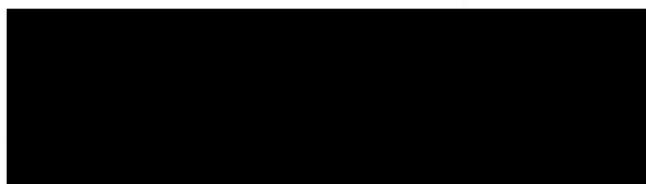
Email: pedro.nehme@gmail.com

Comunicação via rádio entre as equipes de solo de rádio amadores deverá acontecer na faixa de 2m, frequência de 147.330MHz. O lançamento será efetuado no período matutino, por volta de 10:00 UTC.

Considerados o valor científico da campanha e a repercussão do evento, estamos certos da compreensão e breve manifestação favorável da Vossa Excelência, que desde já agradecemos.

Nesta oportunidade, registramos nossa elevada estima e consideração.

Respeitosamente,



Prof. Dr. Renato Alves Borges
Investigador Principal do Projeto LAICAnSat-1



Excelentíssimo Senhor
Brig Ar Carlos Minelli de Sá
CINDACTA-1
Brasília, DF - Brasil

RELATÓRIO DE NOTAM ESPECÍFICO
NOF: SBBR | SERIE: F | NUMERAÇÃO: 1324 A 1324 | ANO: 2014
GERADO EM 25/04/2014 ÀS 23:08:00 UTC

SBBR F1324/2014 NOTAMN

Q) SBBS/WLLW/IV/M /W /000/999/1458S04801W001

A) SBBS - /FIR BRASILIA,

B) 02/05/14 10:00 - C) 24/05/14 18:00

D) MAY 02 24 1000/1800

E) ASCENSAO DE BALAO LIVRE (ESTRATOSFERICOS) ACONTECERA
CENTRO COORD 145827S/0480116W (MATO SECO/GO) RAI0 25KM DNG

F) SFC G)UNL)

DT EXPED: 25/04/14 20:24

STATUS: IN FORCE

ORIGEM: SBBRZXBN
