II Congresso Aeroespacial Brasileiro
De 16 a 19 de setembro

PROJETO DE UMA SONDA ESTRATOSFÉRICA DIDÁTICA PARA O ESTUDO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

Luis Claudio de Oliveira Silva[a]**; Marcus Vinicius Lopes**[a]**; Allan Kardec Barros**[a]
[a] Universidade Federal do Maranhão *a* Av. dos Portugueses, 1966 - Vila Bacanga, São Luís - MA

Resumo: *Lançar uma sonda estratosférica para efetuar estudos de exploração espacial por parte de estudantes do Curso de Graduação em Engenharia Aeroespacial é um grande desafio, em virtude do alto custo envolvido no lançamento de um foguete, mesmo sendo este de pequeno porte. Deste modo, a utilização de um balão estratosférico e o uso de tecnologias open source tais como o ArduSat facilitam bastante o envio de sondas para a estratosfera. Este trabalho em andamento tem por objetivo apresentar um projeto baseado em padrões abertos para uma sonda que será enviada até a estratosfera usando um balão meteorológico, bem como apresentar os resultados iniciais de sua implementação. São apresentadas as etapas necessárias para a culminância do projeto e alguns detalhes dos materiais envolvidos. Espera-se que a sonda atinja aproximadamente 30 km de altitude e, com o conjunto de sensores embarcados, possa ser efetuada uma série de leituras de dados que poderão ser depois analisados, quando a sonda for recuperada. Além disso, pretende-se contextualizar para os alunos as diversas etapas envolvidas no planejamento, lançamento, recuperação e análise de dados obtidos, bem como as diversas áreas interdisciplinares envolvidas neste experimento.*

Palavras-chave: *Sonda Estratosférica, Nanossatélites, ArduSat, Engenharia Aeroespacial.*

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o projeto e os resultados iniciais do processo de construção de uma sonda estratosférica, que possibilite a introdução aos estudos de exploração espacial junto a alunos de cursos de graduação em Engenharia Aeroespacial e demais cursos relacionados, permitindo aplicações práticas tais como construção de antenas, implementação de filtros, processamento de sinais, utilização de protocolos de comunicação, confecção e montagem de sistemas embarcados e gerenciamento de projetos.

A sonda estratosférica é formada por um balão capaz de atingir grande altitude e transportar uma carga útil acoplada a ele. O balão de grande altitude é um grande balão de látex, inflado com hélio ou hidrogênio, que pode levar uma sonda ou satélite de pequeno porte até o espaço próximo (estratosfera). Na figura 1 (a) é possível observar como a sonda será montada. Após atingir seu apogeu, um paraquedas é utilizado para amortecimento da queda, trazendo a sonda de volta ao solo lentamente após o rompimento do balão. Um refletor de radar também é importante para permitir que o sistema seja visto por aviões, evitando colisões em condições com pouca visibilidade.

Há mais de 30 anos a NASA mantém um programa de envio de balões científicos para a estratosfera com lançadores nos Estados Unidos, cujos voos possuem duração de horas a um dia, Suécia, Nova Zelândia, Austrália e Antártica, cujos voos possuem duração de dias a semanas, para pesquisas científicas e testes de novas tecnologias que contribuem para o entendimento da Terra, do sistema solar e do universo (NASA, 2018).

Um balão serve para levar experimentos científicos para o espaço próximo de maneira similar ao de um satélite, com custos bem mais baixos. Outro benefício dos balões é o fato da carga útil poder ser recuperada e reutilizada em novos lançamentos. A elaboração da sonda no formato de um nanossatélite permitirá que os alunos compreendam o funcionamento e processo de fabricação de um artefato dessa natureza, que possa ser lançado, futuramente, a partir de foguetes.

O desenvolvimento de uma sonda estratosférica permite aos alunos vivenciar todas as etapas de um projeto

Marcus Vinicius Lopes: marcus_vix@ymail.com

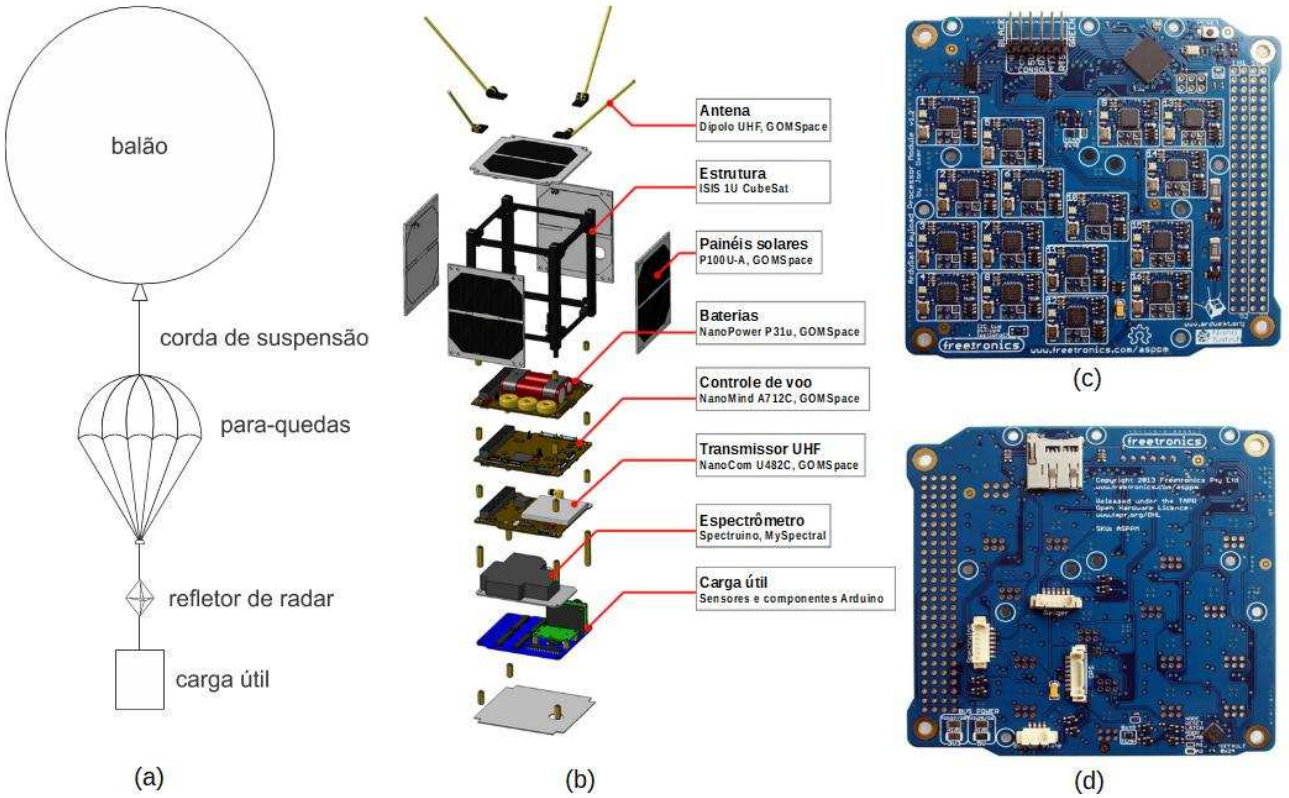


Figura 1: Visão geral do projeto: (a) Balão estratosférico. (b) Componentes do ArduSat (ArduSat, 2019). Placa ArduSat Payload Processor Module (ASPPM), (c) visão frontal e (d) visão posterior (Freetronics, 2019).

espacial, aprendendo a importância de cada uma delas: escolher os componentes, projetar, fazer a integração dos componentes, testar todo o sistema e preparar o lançamento, e finalmente analisar os dados científicos obtidos. Aplicando os conceitos de planejamento e gerenciamento de um projeto e a importância do trabalho em equipe, a relevância do papel de cada membro para conseguir os objetivos e cumprir as metas, respeitando prazos e custos, é de vital importância para o sucesso do projeto. O projeto ainda serve de inspiração, criando entusiasmo nos alunos ingressantes nos cursos de Engenharia, bem como divulgação de atividades espaciais ao público em geral, estimulando o interesse pela área científica e carreiras relacionadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo a proposta da pesquisa espacial como ponto de partida, pretende-se despertar o interesse dos estudantes de engenharia pela área espacial e pela ciência, a partir de um projeto multidisciplinar, que permita a aplicação de algumas técnicas de aprendizagem ativa. Objetivando a efetividade do trabalho aqui proposto, pensou-se em aplicar o modelo de aprendizagem baseada em projetos (Project-Based Learning, PBL). Segundo Toyohara *et al.* (2010), a PBL é uma proposta de ensino-aprendizagem baseada na concepção central e nos princípios de uma tarefa, capaz de envolver o aluno na investigação de soluções para os problemas e em outros objetivos significativos. Dessa forma, o aluno pode trabalhar de forma autônoma na construção do seu próprio conhecimento.

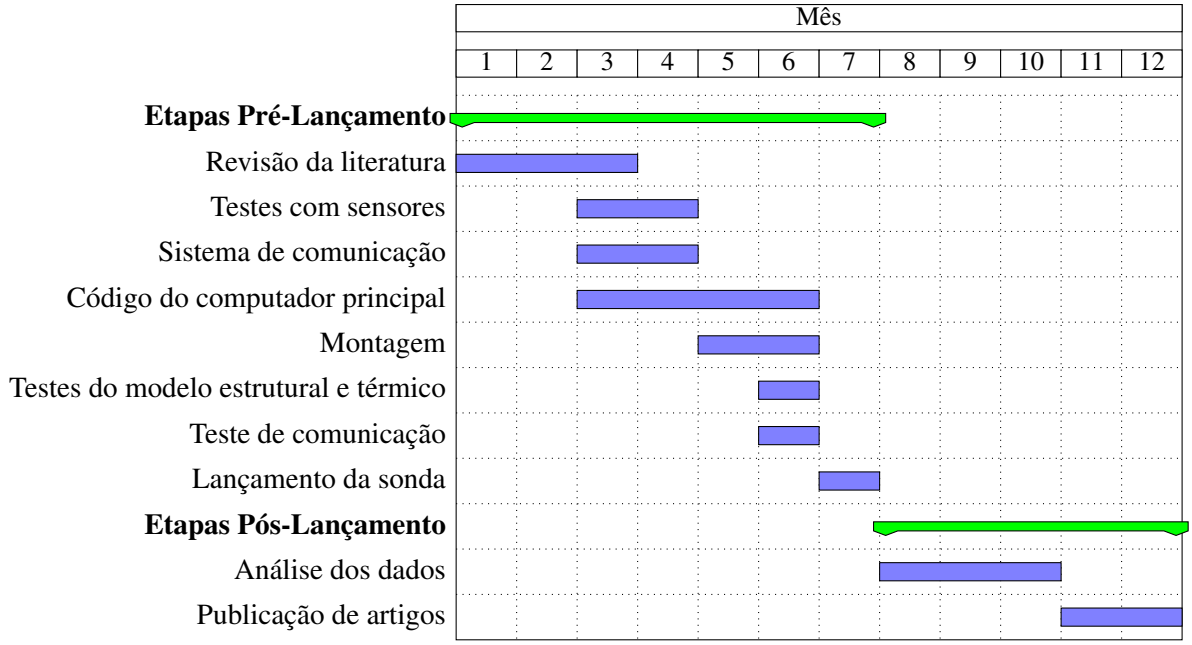
Para Masson *et al.* (2012), a PBL vêm sendo aplicada como ferramenta de aprendizagem ativa, permitindo práticas inovadoras no ensino das engenharias. Ela exige que o professor adote a postura de treinador de aprendizagem, enquanto os alunos se responsabilizam mais por sua aprendizagem, com a prerrogativa de que o conhecimento adquirido com seu esforço pessoal será mais duradouro, do que aquele obtido apenas por reprodução de informações de terceiros.

Através do projeto, os alunos vão desenvolver competências necessárias para o trabalho em grupo de forma sistematizada, entendendo como deve ser um gerenciamento de projeto com prazos e metas a serem cumpridas, etapas dependentes de outras etapas, bem como uma etapa final onde as diversas partes construídas devem ser

encaixadas para ser obtido o produto.

Para fins didáticos, todo o experimento foi dividido em duas etapas maiores: pré-lançamento e pós-lançamento, como se pode ver na figura 2. Temos inicialmente uma etapa de pré-lançamento, onde o objetivo desta atividade é fornecer todo o conhecimento necessário para a construção da sonda bem como o seu lançamento. Inicialmente será feita uma pesquisa bibliográfica para a identificação das tecnologias e técnicas utilizadas atualmente. Seguindo essa etapa, serão escolhidos todos os componentes eletrônicos utilizados.

Figura 2: Cronograma de atividades a serem executadas



Fonte: O autor (2019).

Para a validação dos sistemas embarcados, além dos testes de todos os sistemas desenvolvidos, é importante que sejam efetuados testes térmicos e de vibração. Os testes de vibração objetivam estudar a forma como a sonda reagirá quando for submetida a vibrações, sejam elas aleatórias ou não. O teste térmico objetiva estudar a resistência a fadiga térmica dos elementos da sonda, de forma a garantir que eles não falhem devido a temperatura. Tais testes, também denominados de testes do modelo estrutural e térmico (Structural-Thermal Model, STM) serão conduzidos por meio de um estudo teórico e numérico. Segundo Corpino *et al.* (2015), tais testes possuem o objetivo de avaliar as condições térmicas e a faixa de temperaturas operatórias encontradas por um nanossatélite em órbita, bem como situações de vibração, usando ferramentas computacionais que englobam análises de dinâmica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD) e método de elementos finitos (Finite Elements Method, MEF).

O sistema de comunicação será implementado, sendo feitos todos os testes para que a telemetria da sonda seja realizada adequadamente. Com todos os subsistemas implementados, o código final do sistema embarcado principal será finalizado e será feita a montagem da sonda completa, com estrutura confeccionada em impressora 3D.

Em seguida, serão feitos os testes finais com a sonda pronta para ajuste do sistema de comunicação, ocorrendo a verificação de eventuais problemas estruturais e proteção térmica. Ao fim desta etapa, a equipe estará pronta para o lançamento da sonda estratosférica.

Temos então a etapa pós-lançamento, com objetivo de documentar o conhecimento adquirido com o envio da sonda, permitindo a correção de erros para lançamentos futuros e produzindo artigos científicos com os dados coletados. A recuperação da sonda, por meio do seu rastreamento através do sistema de telemetria, propicia a coleta dos dados medidos e posterior análise. Uma vez que os dados sejam obtidos, estes serão pré-processados, afim de extrair *outliers*, para então serem analisados, e comparados com valores da literatura. Será então feito um relatório contendo toda a documentação da sonda, problemas enfrentados e desafios futuros. Ao fim desta etapa, a equipe terá material para escrita de artigos científicos.

Desenvolver software, inclusive para sistemas embarcados, é um trabalho complexo por natureza. Uma das razões para esta afirmação é o fato de não haver uma única solução para cada cenário de desenvolvimento. Neste contexto, os processos são um conjunto de atividades bem definidas com seus respectivos executores, ferramentas de apoio e artefatos produzidos. A Engenharia de Requisitos é um processo que engloba todas as atividades que contribuem para a produção de um documento de requisitos, sendo uma atividade base para as demais tarefas associadas ao desenvolvimento do software. Durante o planejamento e execução deste trabalho, serão levantados os requisitos funcionais e não-funcionais, para descrever as funcionalidades do sistema e suas qualidades, tais como desempenho, disponibilidade, eficiência, interoperabilidade, confiabilidade e robustez. Os requisitos levantados serão descritos em Linguagem de Modelagem Unificada (Unified Modeling Language, UML). Além destes documentos, também serão produzidos planos de montagem, integração e testes (Assembly, Integration and Test, AIT) da sonda, baseado nas atividades de AIT em satélites do INPE (Campos, 2011).

3. SISTEMA EXPERIMENTAL DE COLETA DE DADOS ESPACIAIS BASEADO EM ARDUINO

Para a montagem dos sistemas embarcados necessários para coleta de dados estratosféricos a partir de sensores, assim como para demais tarefas de controle tais como acionamento de servomotores, optou-se nesse projeto por utilizar tecnologias *open source*. Dentre essas tecnologias, destaca-se o ArduSat Geeroms *et al.* (2015). ArduSat é um projeto *open source* de Nanossatélite, desenvolvido para o padrão de satélites CubeSat NASA (2019). Seu principal objetivo é permitir que estudantes possam equipar um nanossatélite com uma placa de sensores para obtenção de dados orbitais ArduSat (2019).

Os sensores que o projeto ArduSat pode utilizar incluem sensor de temperatura, sensor de pressão, câmera, GPS, espectrômetro, magnetômetro, dentre outros Louis (2016). O diferencial deste projeto é a possibilidade de utilizar tecnologias comuns para os estudantes de graduação, tais como Arduino, em aplicações espaciais. Além de informações obtidas dos sensores, podem ser levados experimentos científicos diversos, cujos dados podem ser armazenados em cartões de memória para posterior análise. Pulschen *et al.* (2018) propôs um conjunto de técnicas e procedimentos para estudar os efeitos da exposição de biomoléculas em ambientes espaciais, através de um CubeSat. A ideia é que projetos semelhantes possam ser desenvolvidos, utilizando plataformas livres de prototipagem, porém voltadas para a exploração espacial. Na figura 1 (a) é possível ver o esquema geral do experimento que será realizado neste projeto. Na figura 1 (b) é possível observar o esquema de montagem de um ArduSat.

De acordo com Geeroms *et al.* (2015), O cérebro do ArduSat é o ArduSat Payload Processor Module (ASPPM), baseado no processador ATmega2561 juntamente com 16 processadores ATmega328P. O processador ATmega2561 é o mesmo utilizado no Arduino Mega, enquanto que o processador ATmega328P é o mesmo do Arduino UNO. A ideia de acrescentar 16 processadores ATmega328P é permitir que se crie módulos isolados de sensores que podem se comunicar com o processador supervisor, o ATmega2561, de forma a não sobrecarregar o sistema. A comunicação entre os processadores e o processador supervisor é feita utilizando o protocolo de comunicação serial I^2C. Nas figuras 1 (c) e 1 (d), é possivel ver o módulo ASPPM, nas visões frontal e posterior.

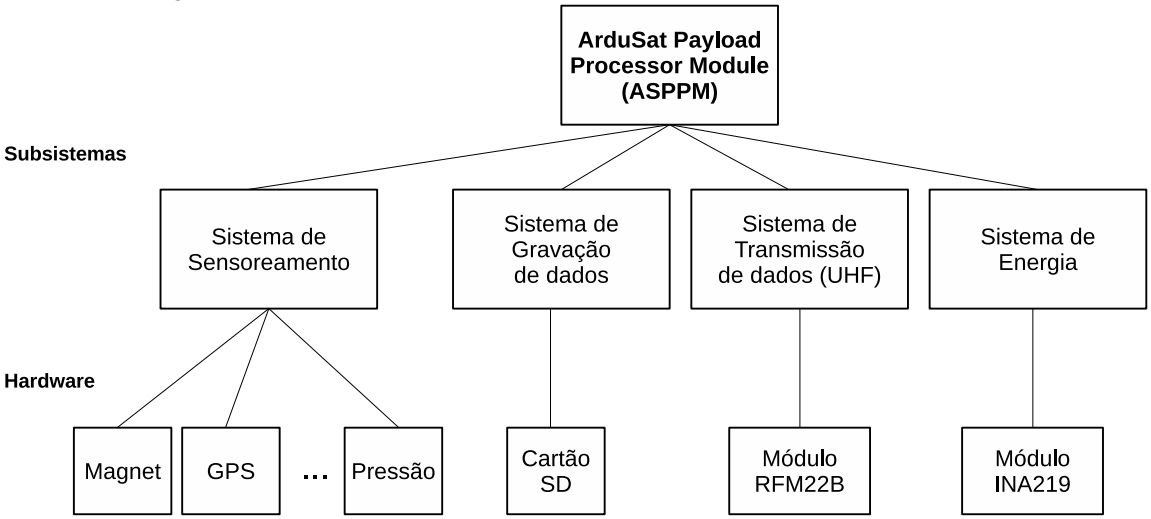
Como se pode observar, as possibilidades são inúmeras, dependendo apenas da criatividade e disponibilidade de recursos para aquisição do módulo e demais componentes que podem compor um ArduSat. Em relação a outras plataformas proprietárias ou projetos embarcados criados pelos próprios autores, acredita-se que a utilização de tecnologias *open source* baseadas em Arduino pode proporcionar um aprendizado mais fácil por parte dos estudantes.

Queiroz *et al.* (2018) apresenta uma solução de sistema embarcado baseado em FPGA, para atender a um projeto de nanossatélites chamado CONASAT (Constelação de Nanossatélites Ambientais). de Camargo e dos Santos (2017) propõe um sistema embarcado baseado na plataforma STM32, que usa um processador ARM Cortex M7, para integrar o computador de bordo do nanossatélite Alpha, usado no programa CTEE (Capacitação Tecnológica em Engenharia Espacial). Ambos utilizam tecnologias que requerem um certo grau de conhecimento para implementação dos sistemas embarcados. Fong *et al.* (2014) propôs o uso da plataforma Arduino Payload Instrument Module para compor o sistema embarcado do picossatélite YAMASAT, desenvolvido pelo National Space Program Office's (NSPO), Taiwan. Desse modo, a escolha do projeto ArduSat é a

mais indicada para estudantes iniciantes em atividades de exploração espacial.

Na figura 3 é possível visualizar os sistemas e subsistemas da sonda estratosférica proposta nesse projeto. A princípio, imaginou-se a divisão do sistema completo em 4 componentes: sistema de sensoreamento, sistema de gravação de dados, sistema de transmissão de dados e sistema de energia. Todos estes, coordenados pelo ASPPM.

Figura 3: Sistemas e subsistemas da sonda estratosférica e seus módulos



Fonte: O autor (2019).

4. SOFTWARE EMBARCADO

Em virtude do sistema de software embarcado ter que atender a funcionalidades peculiares de sistemas espaciais, considerados críticos em termos de confiabilidade, optou-se por utilizar uma arquitetura de software que cumprisse esses requisitos. O sistema operacional escolhido foi o FreeRTOS, por vários motivos: comunidade ativa de desenvolvedores, parceiros com larga experiência em fabricação de microcontroladores, vasta documentação, baixo consumo de memória, código fonte livre, além de ser projetado para sistemas de tempo real.

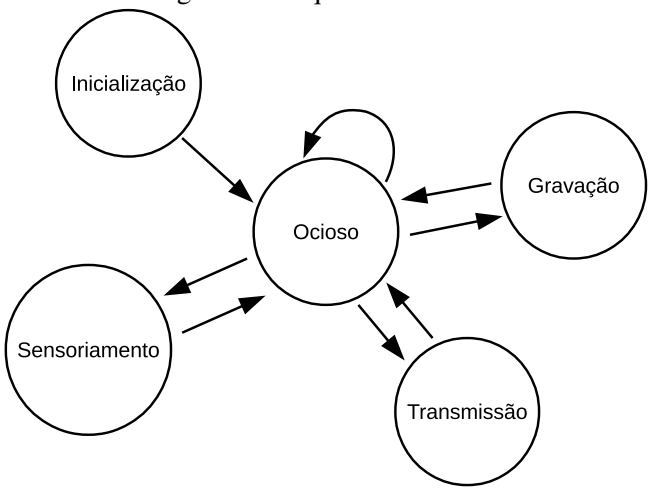
O FreeRTOS é dotado de uma Interface de Programação de Aplicativos, em inglês, Application Programming Interface (API), que possibilita a criação e execução de várias tarefas de forma colaborativa, contando com mecanismos de comunicação entre elas. Além disso, o FreeRTOS inclui, semáforos, temporizadores, tratamento de interrupções, e a possibilidade de configurar as tarefas com prioridades, durante o desenvolvimento do software.

Sistemas embarcados são, geralmente, reativos. Isso quer dizer que eles respondem continuamente a estímulos externos e internos, podendo ainda possuir limitações temporais. Ao modelar sistemas desse tipo, o projetista do software deve determinar o comportamento do sistema, além do fluxo de controle. Os métodos usados na modelagem de sistemas embarcados devem expressar tal comportamento de maneira formal e intuitiva. Um dos métodos mais usados é denominado Máquina de Estados Finitos, ou simplesmente, Máquina de Estados.

No projeto proposto, foram definidos os seguintes estados: Inicialização, Ocioso, Transmissão, Gravação, Sensoreamento. A figura 4 apresenta uma representação da máquina de estados do sistema proposto com os cinco estados básicos.

- Inicialização: ponto de entrada do sistema embarcado, é nesse estado que as tarefas são criadas, os sensores são inicializados e a comunicação com os demais módulos é testada.
- Ocioso: a máquina fica aguardando dados dos sensores.
- Transmissão: os dados obtidos e gravados são empacotados para serem transmitidos para a estação terrestre.

Figura 4: Máquina de estados



Fonte: O autor (2019).

- Gravação: os dados dos sensores, bem como estado da bateria e demais informações importantes sobre o funcionamento da sonda são gravados no cartão SD.
- Sensoreamento: são coletados os dados dos sensores.

5. SISTEMA DE SENSOREAMENTO

Com o objetivo de simplificar o desenvolvimento do projeto optou-se por utilizar uma placa de sensores baseados na tecnologia ArduSat ArduSat (2019). Esta placa de sensores reúne vários sensores específicos para aplicações espaciais, cada um com possibilidade de comunicação utilizando o protocolo I^2C. Na figura 5, pode-se ver a placa que será usada nos experimentos deste projeto, com os respectivos sensores.

Figura 5: Placa de sensores ArduSat



Fonte: ArduSat (2019)

De acordo com Geeroms *et al.* (2015), a placa de sensores ArduSat contém os sensores e suas respectivas referências, de acordo com o exposto na tabela 1.

Essa placa de sensores não conta com GPS embutido. Desta forma, faz-se necessário a inclusão de um GPS para a geolocalização da sonda, bem como determinação de altitude alcançada. Neste projeto, escolhemos o módulo GPS Ublox Neo-6m NXP Semiconductors (2011), por facilmente integrável em projetos com Arduino, além de possuir dimensões reduzidas, o que o torna ideal para este projeto.

6. SISTEMA DE GRAVAÇÃO DE DADOS

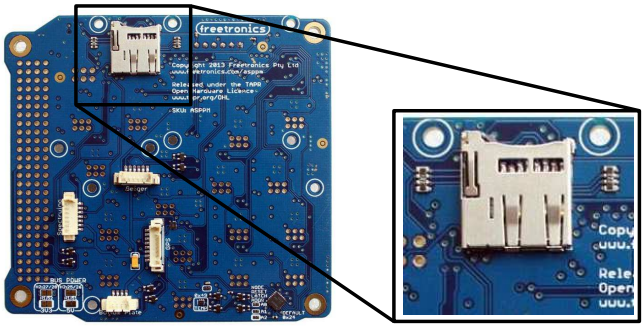
Mohi *et al.* (2015) propôs um período de comunicação entre o CubeSat e a estação terrestre, limitado a

Tabela 1: Sensores disponíveis na placa de sensores ArduSat

Sensor	Aplicação
TSL2561	Sensor de luminosidade
LSM303D	Acelerômetro de três eixos e magnetômetro
L3GD20	Giroscópio digital de três eixos
MLX90614	Sensor digital de temperatura infravermelho
TMP102	Sensor de temperatura ambiente
ISL29125	Sensor RGB
Si1132	Sensor ultravioleta

uma janela de aproximadamente 5 minuto. Nesse período, entre uma transmissão e outra, os dados foram armazenados em um cartão SD. Dessa forma, é garantida a persistência dos dados obtidos a partir dos sensores até a próxima transmissão. Neste trabalho, será usada esse mesma estratégia para gravação dos dados dos sensores, dados do GPS, além do monitoramento do estado da bateria, temperatura da placa de sistema embarcado e registro das atividades de transmissão. No entanto, usaremos uma janela de 1 minuto para o período de transmissão. Na figura 6 é possível ver o local do módulo Cartão SD para gravação de dados no módulo ASPPM.

Figura 6: Módulo Cartão SD da ASPPM



Fonte: Freetronics (2019)

Segundo a documentação do módulo ASPPM Freetronics (2019), o processador supervisor é capaz de fornecer armazenamento de dados no cartão SD para todos os demais processadores. Assim, cada uma das unidades de processamento auxiliares pode, por intermédio do supervisor, gravar informações em arquivos de dados utilizando um sistema de arquivos.

7. SISTEMA DE TRANSMISSÃO DOS DADOS

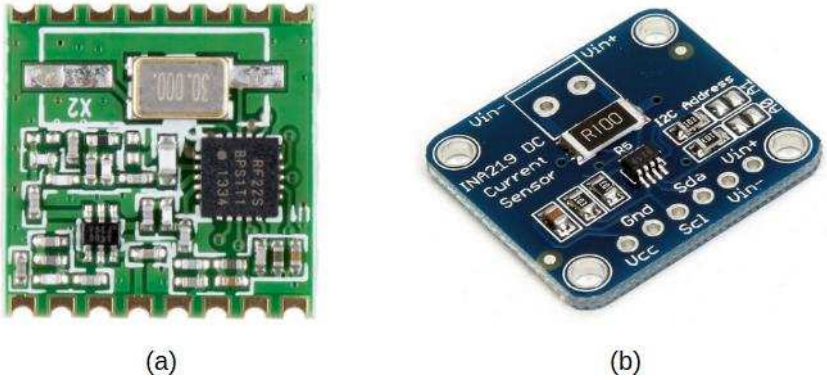
O sistema de comunicação da sonda proposta neste trabalho será responsável por enviar dados para a estação terrestre. Em se tratando de CubeSats, o sistema de comunicação pode, além de transmitir, receber dados da estação terrestre. Além disso, o sistema de comunicação pode ainda atuar como repetidor para outros satélites em órbita Quiros-Jimenez e d'Hemecourt (2018).

O sistema de comunicação deverá interagir com o ASPPM, recebendo os dados para serem enviados para a estação terrestre. Essa interação será obtida através de comunicação serial entre o microcontrolador do ASPPM e o microcontrolador do sistema de comunicação. Serão avaliados os protocolos mais usuais, tais como UART, I^2C e SPI, para verificar qual protocolo se adequa aos requisitos necessários para essa aplicação. Além disso, este sistema deve ser capaz de modular e transmitir os sinais a serem enviados.

O módulo RFM22B foi escolhido para integrar o sistema de comunicação. Trata-se de um módulo transceptor por rádio frequência, capaz de operar na banda ISM (Industrial, Scientific & Medical), de baixo custo e altamente integrado, reduzindo os gastos e encurtando o ciclo de desenvolvimento do projeto. Além de características que o faz ideal para projetos de baixo custo, tais como tensão de operação entre 1.8 V e 3.6 V, consumo de 18.5 mA durante recepção e 85 mA durante transmissão, dimensões de 16x16x2 mm, possui interface serial

SPI, o que permite a conexão com o ASPPM. Pode-se ver o módulo na figura 7 (a).

Figura 7: (a) Módulo de transmissão de dados RFM22B. (b) Módulo INA219 usado no monitoramento da tensão e corrente em uso na sonda



(a) (b)

Fonte: Hoperf Eletronic (2019), Eletrodex (2019)

As bandas ISM são reservadas internacionalmente para o uso de radiofrequência com fins industriais, científicos e médicos que não sejam de operadoras de telecomunicações. Dessa forma, o sinal emitido pelo transmissor da sonda não irá gerar interferência em sinais de rádio ou telefonia, bem como não haverá a necessidade de licenciamento de utilização de frequência dentro desse espectro. Neste trabalho, será utilizada a banda de frequencia de 433 MHz, cuja faixa de trabalho varia de 413 MHz a 453 Mhz.

Para que a transmissão seja efetuada, é necessário inserir as informações que serão transmitidas em um sinal de radiofrequência, denominada onda portadora, que funcionará como um veículo de transporte da informação, da sonda até a estação de recepção. As formas de inserção do sinal na onda portadora são chamadas de modulação. O módulo RFM22B pode operar com as modulações por chaveamento de frequência (Frequency Shift keying, FSK) e chaveamento de frequência gaussiano (Gaussian Frequency Shift Keying, GFSK).

Além da definição da faixa de frequência de operação e da modulação utilizada para transmitir o sinal da sonda para a estação de recepção terrestre, é necessário definir o protocolo de comunicação a ser utilizado. É o protocolo que define as regras de codificação, permitindo que os dados obtidos dos sensores possam ser transformados em sinais elétricos, modulados em uma onda portadora, transmitidos para a estação terrestre e, finalmente, decodificados. A escolha do protocolo está diretamente ligada ao módulo transmissor utilizado. Neste trabalho, será adotado o protocolo AX.25, um padrão aberto desenvolvido para o radioamadorismo a partir do protocolo X.25, bastante usado em CubeSats. Dessa forma, é possível que haja cooperação de outros grupos e da comunidade de radioamadores na recepção dos sinais.

8. SISTEMA DE ENERGIA

A temperatura afeta diretamente a bateria. Em baixas temperaturas a resistência interna da bateria aumenta, diminuindo sua tensão fornecida. As baterias de íons de lítio (Li-ion) são resistentes à queda de temperatura devido à sua resistência interna extremamente baixa. Também apresentam alta concentração de energia, sendo escolhidas para o projeto. Outro componente para esse subsistema é o regulador de tensão. Serão testados os lineares e os chaveados. Reguladores lineares necessitam de uma tensão bem mais alta que a sua saída para fornecerem uma tensão regulada, sendo também bastante ineficientes. Reguladores chaveados podem fornecer uma tensão maior ou menor que sua tensão de entrada, sendo recomendados para sistemas de baterias, somente com o inconveniente de gerar bastante ruído na alimentação do circuito.

No desenvolvimento deste projeto, percebeu-se a necessidade de medir a tensão e a corrente consumida pelos demais componentes do projeto. Para compor o sistema de gerenciamento de energia, foi selecionado o módulo INA219, baseado no circuito integrado INA219, da Texas Instruments. Este módulo possui protocolo comunicação I^2C e fácil integração com dispositivos Arduino. Além disso, permite o monitoramento de linhas com alimentação de 0 a 26 volts DC e conversor ADC interno de 12 bits. Dessa forma, será necessário um dos processadores do ASPPM para, através do módulo INA219, fazer a medição das tensões e correntes em intervalos de tempo regulares, além de enviar esses dados para o sistema de gravação de dados, afim de se

manter um registro de todos os eventos relacionados à energia consumida pela sonda. Este processador irá colocar os demais sistemas em baixo consumo de energia, quando estiverem ociosos, afim de prolongar a carga das baterias presentes dentro da sonda. Na figura 7 (b) é possível ver o módulo INA219 que será utilizado neste projeto.

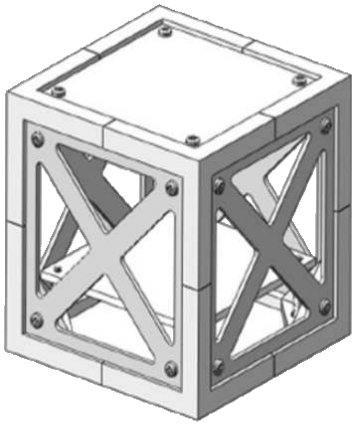
9. ESTRUTURA CUBESAT BASEADA EM TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D

O desenvolvimento da estrutura da sonda estratosférica proposta neste trabalho segue os padrões de um CubeSat. A grande maioria dos CubeSats enviados para o espaço possuem estrutura desenvolvida a partir de chapas metálicas. Tal escolha se dá pelo fato das condições às quais os CubeSats são submetidos no espaço e durante o lançamento. Radiação, calor extremo, baixa pressão e boa resistência ao impacto e vibração requerem características que os façam resistir ao ambiente de trabalho no espaço Zosimovych e Chen (2018).

No entanto, para sondas estratosféricas que precisam subir a altitudes de aproximadamente 30 km, torna-se possível serem utilizados materiais alternativos, com resistência menor, porém mais viáveis economicamente. Neste trabalho, propõe-se a utilização de impressão 3D para o desenvolvimento da estrutura da sonda estratosférica. A impressão 3D possui várias vantagens. Dentre elas, podemos citar: realização rápida, alta precisão, baixo custo, além de permitir a produção de formas geométricas complexas com mais facilidade do que usando os processos tradicionais de fabricação com chapas metálicas.

Com relação ao tamanho, várias universidades foram pioneiras no desenvolvimento de satélites do tipo nano e pico. Jordi Puig-Suari, do Instituto Politécnico da Califórnia, e Robert Twiggs, da Universidade Stanford, introduziram a especificação CubeSat, um cubo com 10 cm de aresta e massa menor que 1 kg Woellert *et al.* (2011). Pode-se encontrar na Internet vários *templates* para impressão 3D da estrutura de CubeSats. Neste trabalho foram utilizado os modelos disponibilizados pela Universidade Politécnica do estado da California Cal Poly (2019) e pela NASA NASA (2019). Foram realizadas algumas adaptações, até ser desenvolvido o modelo apresentado na figura 8.

Figura 8: Estrutura CubeSat proposta neste projeto



Fonte: Cal Poly (2019)

Para minimizar qualquer tipo de acidente durante a queda, após o estouro do balão, haverá um paraquedas cuja função é reduzir a velocidade de descida a um valor suficientemente pequeno. Outro componente de segurança acoplado é o refletor de radar, quer permite que a sonda seja visualizada continuamente pelo controle de tráfego aéreo. Após a impressão da estrutura e montagem de todos os componentes internos da sonda, serão determinadas as medidas necessárias para que o paraquedas funcione efetivamente. Os alunos irão efetuar pesquisas para definir as dimensões apropriadas do paraquedas, evitando que a sonda sofra danos no processo de descida. O balão meteorológico que será usado neste projeto é do tipo grande altitude 800g, capaz de atingir uma altitude de aproximadamente entre 26.000 e 32.000 metros, antes de estourar. Serão necessários, de acordo com especificações dos fabricantes deste tipo de balão, cerca de 6 metros cúbicos de gás hélio para levantar o balão e a carga.

10. ESTAÇÃO TERRESTRE DE RECEPÇÃO DE DADOS

A estação terrestre é de grande importância para o projeto, pois devido ao seu funcionamento correto é possível garantir o armazenamento dos dados coletados pela sonda, caso ela não seja recuperada. Na figura 9 (a), pode-se visualizar um modelo dos dispositivos envolvidos na estação terrestre de recepção de dados desenvolvida para este projeto.

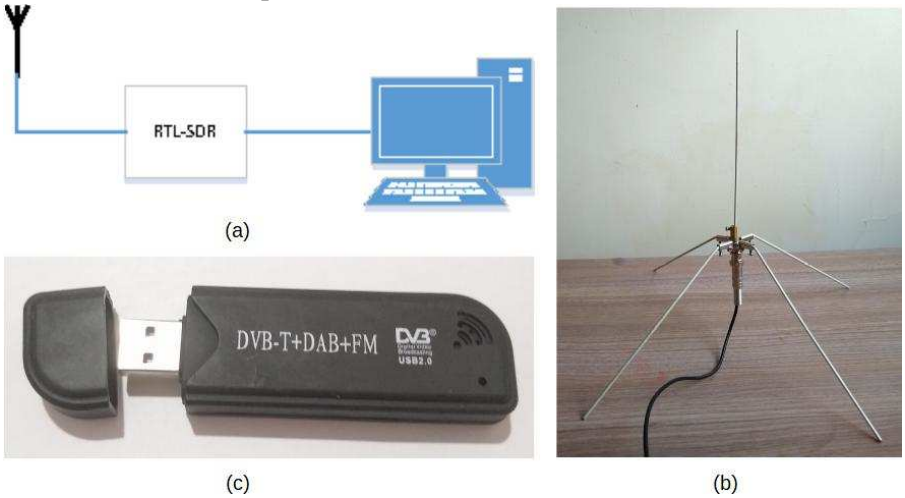
O desenvolvimento desta estação permite uma grande gama de conhecimento para os alunos, envolvendo processamento digital de sinais, análise de taxa de erro, implementação de protocolos de comunicação, elaboração de filtros e decodificação de sinais.

Será montada uma estação na Universidade Federal do Maranhão, que será utilizada pelos alunos como fonte aprendizado e treinamento. Esta estação possibilitará o rastreamento de sondas meteorológicas enviadas diariamente e até de alguns satélites LEO (Low Earth Orbit, do inglês: Órbita Terrestre Baixa). Um obstáculo inicial para a recepção nessa localização é uma rádio comercial da universidade, já levando os alunos à implementação de um filtro rejeita-faixa. Este desafio será então o primeiro laboratório para projeto de circuitos e implementação da placa de circuito impresso.

As estruturas básicas da estação de recepção são: antena, RTL-SDR e computador. Inicialmente será montada uma antena plano terra 1/4 de onda na frequência de 403 MHz. A utilização de uma antena omnidirecional evita de início a necessidade de rotores para apontamento, com um ganho modesto. Posteriormente podem ser sugeridos trabalhos para a utilização de antenas direcionais com ganhos maiores e construção de estruturas para apontamento automático. Na figura 9 (b), pode-se ver a antena montada para os experimentos realizados neste projeto, para testar a capacidade de recepção dos sinais emitidos por sondas meteorológicas.

O RTL-SDR é um Rádio Definido por Software (Software Defined Radio, SDR) de baixo custo, aproximadamente menos que US$ 20, baseado no chip RTL2832U. Fabricado inicialmente para recepção de sinal de TV digital, passou a ser usado por radioamadores pelo fácil acesso e faixa de recepção que varia entre 24 MHz e 1766 MHz, atendendo perfeitamente aos propósitos deste projeto. Na figura 9 (c), pode-se ver o RTL-SDR, que pode ser conectado na porta USB, e tem uma saída de antena do lado inverso. Este RTL-SDR foi utilizado nos experimentos para teste da antena confeccionada neste trabalho.

Figura 9: (a) Modelo da estação terrestre. (b) Antena da estação terrestre de recepção de dados. (c) Rádio Definido por Software utilizado nos experimentos realizados



Fonte: O autor (2019).

O computador, onde será processado o sinal recebido pelo RTL-SDR pode usar os diversos softwares disponíveis. Para este trabalho, foi escolhido o SDRSharp (Airspy, 2019), um projeto *open source* que apresenta grandes benefícios educacionais, permitindo aos alunos verificar os códigos e até implementar novas soluções.

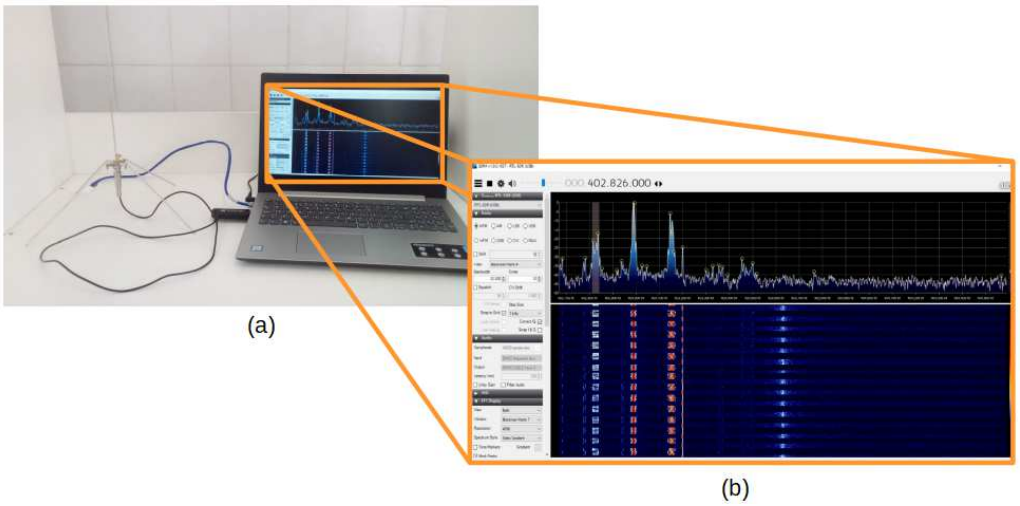
11. RESULTADOS OBTIDOS

Das atividades propostas neste trabalho, apresentadas na figura 2, algumas etapas já foram cumpridas. São elas, a revisão de literatura, o desenvolvimento do sistema de comunicação na estação terrestre e a impressão da estrutura CubeSat para a sonda.

Além da estação montada na Universidade Federal do Maranhão, estarão disponíveis ainda mais outras duas instaladas em São Luís-MA, permitindo a redundância do sistema de recepção.

O teste com uma das estações terrestres foi efetuado através do monitoramento de radiossondas lançadas por meio de balões inflados com gás hidrogênio pelo Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). Através destas radiossondas, o CLA coleta os dados meteorológicos relativos a pressão atmosférica, bem como temperatura e umidade relativa do ar superior. O rastreamento da radiossonda é feito utilizando-se GPS, a partir do qual são obtidas a direção e velocidade do vento para diferentes níveis de altura. Uma radiossondagem típica pode alcançar cerca de 25-30 km de altitude e seu lançamento é realizado às 12:00 h UTC. Os dados coletados são armazenados no banco de dados do CLA e, posteriormente, podem ser utilizados para estudos climatológicos de ar superior Queiroz e Souza Corrêa (2015). O teste foi realizado no dia 24/06/2019, às 11:51 UTC. Na figura 10 (a) é possível visualizar a estação terrestre montada e configurada, e na figura 10 (b) pode-se ver a recepção dos dados da radiossonda no software SDRSharp.

Figura 10: (a) Estação terrestre montada e configurada para receber os dados de uma radiossonda meteorológica. (b) Dados recebidos a partir da radiossonda meteorológica no software SDRSharp, na frequencia 402.826 MHz



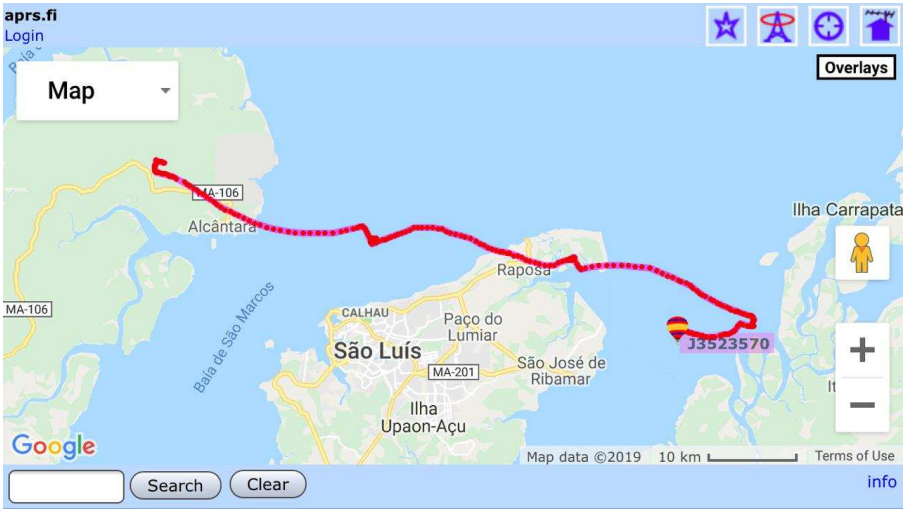
Fonte: O autor (2019).

Foram configuradas as frequências de operação e modulação de sinal adequadas no software SDRSharp. Os dados foram captados pela antena e decodificados. A partir do conjunto de dados obtidos da radiossonda, foram extraídas as coordenadas do GPS, além da altitude. Estes dados foram importados no Google Earth, para que a trajetória da radiossonda pudesse ser visualizada. Na figura 11, é possível observar a trajetória da sonda no mapa.

Na figura 12 é possível observar a mesma trajetória, porém em perspectiva. Nessa visão é possível visualizar a variação da altitude da radiossonda, bem como sua direção. Verificou-se que a altitude máxima alcançada foi de 24.996,65 m.

A estrutura da sonda proposta neste projeto foi impressa utilizando filamento do tipo Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), um polímero bastante utilizado para esse tipo de tarefa por conta de sua resistência mecânica. Após impressos os modelos e montada, pesou-se a estrutura usando uma balança de precisão e observou-se que a mesma apresentava 60,6679 gramas. Na figura 13, pode-se ver a estrutura CubSat impressa e montada.

Figura 11: Trajeto do balão atmosférico lançado pelo CLA e monitorado pela estação terrestre de recepção de dados - Google Maps



Fonte: O autor (2019).

Figura 12: Trajeto em perspectiva do balão atmosférico lançado pelo CLA e monitorado pela estação terrestre de recepção de dados - Google Maps



Fonte: O autor (2019).

Figura 13: Estrutura CubSat impressa e montada para os experimentos



Fonte: O autor (2019).

12. RESULTADOS ESPERADOS

Ao fim da execução deste projeto, espera-se que a sonda estratosférica chegue a uma altitude em torno de 30 km, ocasião em que o balão estoura e inicia sua queda. Com a abertura do paraquedas, a sonda cairá lentamente e o monitoramento através de GPS possibilitará a recuperação da carga útil. A telemetria no período de voo vai fornecer dados, a partir da superfície até a estratosfera, permitindo uma análise do espaço próximo sem a influência de alguns fatores atmosféricos. Dessa forma, espera-se iniciar o campo de Engenharia e Pesquisa Espacial no Maranhão, motivando os alunos a desenvolverem atividades multidisciplinares, onde a parcela do trabalho de cada um será importante para o projeto final.

A vivência das etapas de um projeto espacial tais como escolher os componentes, elaborar os circuitos embarcados, fazer a integração dos componentes, projetar a estrutura, testar todo o sistema, preparar o lançamento e finalmente analisar os dados científicos obtidos, vai ajudar os alunos a respeito da importância do trabalho em equipe, a relevância do papel de cada membro, cumprimento das metas dentro dos prazos e custos estabelecidos. O projeto ainda serve de inspiração, criando entusiasmo nos alunos, e como divulgação de atividades espaciais para o público em geral, estimulando o interesse pela área científica e carreiras relacionadas. As imagens obtidas durante o voo podem ser utilizadas para atrair mais alunos e desenvolver mais projetos na área espacial.

Pretende-se ainda, gerar uma expertise em procedimentos necessários para o desenvolvimento de sondas estratosféricas mais elaboradas e capazes de subir mais alto, bem como capazes de levar consigo experimentos científicos. Almeja-se, ainda, consolidar os conhecimentos necessários para que os alunos de Engenharia Aeroespacial possam desenvolver nanossatélites a partir de componentes de fácil integração. Para isso, serão avaliados os métodos de controle de atitude usuais para esse tipo de satélite, bem como a utilização de painéis solares para efetuar a carga das baterias.

13. CONCLUSÕES

O envio de um experimento ao espaço, mesmo que usando um foguete de pequeno porte, apresenta custo elevado para os padrões de uma universidade. Com a utilização de um balão atmosférico, o custo cai bastante, tornando acessível para os alunos de Engenharia Aerospacial uma vivência prática acerca do envio de artefatos para o espaço. O lançamento de uma sonda estratosférica de caráter educacional visa permitir aos alunos uma experiência interdisciplinar, vivenciando a aplicação de algumas técnicas de aprendizagem ativa. A aplicação de padrões abertos para construir a sonda no formato de um nanossatélite, utilizando a plataforma ArduSat, contribui para o desenvolvimento das competências necessárias para a execução de projetos relacionados com a Engenharia Aeroespacial.

14. REFERÊNCIAS

Airspy, 2019. “Sdr software download”. https://airspy.com/download/. Acesso em: 18/07/2019.

ArduSat, 2019. “Ardusat - your arduino experiment in space”. https://www.kickstarter.com/projects/575960623/ardusat-your-arduino-experiment-in-space. Accessed: 2019-04-22.

Cal Poly, 2019. “Cubesat design specification rev. 13”. URL https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/56e9b62337013b6c063a655a/1458157095454/cds_rev13_final2.pdf.

Campos, L., 2011. “Aprendizagem baseada em projetos: uma nova abordagem para a educação”. In *COBENGE 2011*.

Corpino, S., Caldera, M., Nichele, F., Masoero, M. e Viola, N., 2015. “Thermal design and analysis of a nanosatellite in low earth orbit”. *Acta Astronautica*, Vol. 115, pp. 247 – 261. ISSN 0094-5765. doi:https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.05.012. URL http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576515001940.

de Camargo, L.A.P. e dos Santos, W.A., 2017. “Proposta de um computador de bordo para o nanosatélite alpha

dentro do programa ctee". In *Anais do 8º Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais*.

Eletrodex, 2019. "Sensor ina219_i2c". https://www.eletrodex.com.br/modulo-sensor-de-corrente-dc-ina219-i2c.html. Acesso em: 18/07/2019.

Fong, C.J., Chang, M.S., Chen, H., Cheng, H.C., Kuo, Y.L., Liou, C.C. e Yang, E., 2014. "Personal satellite research and development for space experiment and application". In *Remote Sensing Satellite Technology Workshop 2014*.

Freetronics, 2019. "Libresat payload processor module". `https://www.freetronics.com.au/products/ardusat-payload-processor-module#.XL3LjphKiUk`. Accessed: 2019-04-22.

Geeroms, D., Bertho, S., Roeve, M.D., Lempens, R., Ordies, M. e Prooth, J., 2015. "Ardusat, an arduino-based cubesat providing students with the opportunity to create their own satellite experiment and collect real-world space data". In *Proceedings of the 22nd ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*.

Hoperf Eletronic, 2019. "Módulo rfm22b". URL `http://www.hoperf.de/upload/rf/RFM22B_23B.pdf`.

Louis, L., 2016. "Working principle of arduino and using it as a tool for study and research". *International Journal of Control, Automation, Communication and Systems*, Vol. 1, No. 2.

Masson, T.J., Miranda, L.F.d., Munhoz Jr, A.H. e Castanheira, A.M.P., 2012. "Metodologia de ensino: Aprendizagem baseada em projetos (pbl)". In *COBENGE 2012*.

Mohi, A.N., Aziz, J.S. e Salman, L.A., 2015. "Cubesat communication system, a new design approach". *International Journal of Computer Science Engineering and Technology*, Vol. 12, No. 5, pp. 417–422.

NASA, 2018. "Scientific balloons overview". URL `https://www.nasa.gov/scientificballoons/overview`.

NASA, 2019. "Nasa 3d resources". URL `https://nasa3d.arc.nasa.gov/detail/cubesat`.

NXP Semiconductors, 2011. *NEO-6 u-blox 6 GPS Modules*. NXP Semiconductors.

Pulschen, A.A., de Araujo, G.G., de Carvalho, A.C.S.R., Cerini, M.F., de Mendonca Fonseca, L. e Rodrigues, D.G.F., 2018. "Survival of extremophilic yeasts in the stratospheric environment during balloon flights and in laboratory simulations". *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 84, No. 23.

Queiroz, A. e Souza Corrêa, C., 2015. "Meteorologia aeroespacial no instituto de aeronÁutica e espaÇo (iae)".

Queiroz, K.P., Dias, S.M., Duarte, J.M. e Carvalho, M.M., 2018. "Uma solução para o sistema brasileiro de coleta de dados ambientais baseada em nanossatélites". *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 34, No. 07.

Quiros-Jimenez, O. e d'Hemecourt, D., 2018. "Development of a flight software framework for student cubesat missions". In *European Space Astronomy Center*.

Toyohara, D.Q.K., Sena, G.J.d., Araújo, A.M.d. e Akamatsu, J.I., 2010. "Aprendizagem baseada em projetos – uma nova estratégia de ensino para o desenvolvimento de projetos". In *PBL 2010 Congresso Internacional*.

Woellert, K., Ehrenfreund, P., J.Ricco, A. e Hertzfeld, H., 2011. "Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations". *Advances in Space Research*, Vol. 47, No. 4.

Zosimovych, N. e Chen, Z., 2018. "3d printing cubesat: a low-cost mode of space exploration". *Aeronautics and Aerospace Open Access Journal*, Vol. 2, No. 5, p. 320–324.