



DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA ESPACIAL DE CÓDIGO ABERTO PARA EXPERIMENTOS EM MICROGRAVIDADE: FACILITANDO O ACESSO E A DISSEMINAÇÃO DO CONHECIMENTO

Valéria Cristina Maria Nascimento Leite¹, Luciana Pereira Simões, Carlos Renato dos Santos, Adriano Costa Pinto, Waldenê de Melo Moura e Moisés José dos Santos Freitas²

O estudo da microgravidade é fundamental para explorar fenômenos físicos essenciais e avançar em áreas como ciência dos materiais, dinâmica de fluidos e biologia. Entretanto, o acesso a missões de microgravidade é tradicionalmente restrito devido ao alto custo e à complexidade envolvidos, limitando-o principalmente a instituições com significativo apoio financeiro. Este artigo apresenta o MicroGravity Explorer Kit (MGX), uma plataforma versátil para experimentos em microgravidade em voos de foguetes suborbitais. O MGX é uma ferramenta de código aberto voltada para ampliar o acesso à exploração científica em ambientes de microgravidade. Ela oferece suporte a diversos experimentos e está acessível a estudantes do ensino médio, graduação e pesquisadores. Essa iniciativa busca promover a participação de diferentes grupos na pesquisa e experimentação em condições de microgravidade. O MGX é equipado com um computador Jetson Nano e múltiplos sensores, incluindo sensores de inércia, temperatura, pressão e câmeras de resolução dupla 4K. Além disso, o MGX realiza aquisição de dados, compressão, processamento de imagens e aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina. O MGX simplifica o processo de pesquisa e reduz as barreiras de acesso, promovendo a inovação e a participação nas ciências espaciais, podendo levar a avanços em diversos campos científicos e servindo como uma ferramenta para o desenvolvimento científico e tecnológico.

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa em microgravidade, que explora fenômenos em condições de gravidade quase zero, é fundamental para o avanço de áreas como ciência dos materiais, dinâmica de fluidos e biologia. Historicamente, a complexidade e o custo das missões de microgravidade têm sido barreiras ao acesso à pesquisa espacial. Apesar dessas dificuldades, o Brasil possui um longo histórico de sucesso em experimentos em missões de sondagem, como evidenciado em Sobral (1997), resultado de uma parceria de mais de meio século entre o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Trabalhos mais recentes, como os de An et al. (2012) e Toledo et al. (2019, 2024), relatam experimentos realizados por essa parceria, abordando a solidificação de ligas eutéticas em microgravidade, conforme ilustrado no painel esquerdo da Figura 1.

¹ Autora – Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE)

² Co-autores – Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE)

Outro exemplo motivador desta temática é o experimento conduzido por estudantes do ensino médio de escolas de São José dos Campos, a bordo do foguete suborbital VSB-30 em 2010. O projeto, uma iniciativa de educação STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática), focou na medição de deslocamento por meio de um sistema massa-mola, como ilustrado no painel direito da Figura 1. Essa experiência demonstrou o potencial dos programas educacionais que engajam estudantes em atividades práticas e tecnológicas, preparando-os para se tornarem a próxima geração de cientistas e engenheiros.

Devido à importância dos estudos em microgravidade, a Agência Espacial Europeia (ESA) desenvolveu experimentos educacionais que envolvem professores em voos parabólicos. Essas atividades proporcionaram uma valiosa experiência de aprendizado, conforme reportado por Pletser et al. (2005). De maneira semelhante, o programa REXUS/BEXUS, uma iniciativa do Centro Aeroespacial Alemão (DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), documentado por Stamminger et al. (2012), demonstrou as oportunidades oferecidas para que estudantes universitários desenvolvessem e realizassem seus próprios experimentos em microgravidade.



Figura 1: Exemplos de experimentos em microgravidade. Painel esquerdo: forno para investigar a influência da gravidade na solidificação de uma liga eutética de Pb-Sn nas posições de lançamento e microgravidade. Painel direito: ilustração do experimento educacional de deslocamento por meio de sistema massa-mola.

Iniciativas como essas reforçam o potencial de ampliar a participação nesta área de pesquisa fundamental. A exploração dos ambientes de microgravidade é uma porta de entrada essencial para o setor espacial, tornando-o mais acessível por meio desses programas especializados. Tais programas não apenas capacitam novos profissionais, mas também desenvolvem tecnologias para uso futuro em foguetes e satélites. Segundo Perondi (2023), o setor de satélites encontra-se atualmente em um estágio de maturidade. Neste estágio, o uso direto de produtos e o advento de serviços habilitados por esses produtos definem esse novo setor econômico. De acordo com Pessoa Filho



(2021), este mercado gera mais de 300 bilhões de dólares anualmente, impulsionado principalmente pela venda de serviços de satélites e equipamentos terrestres. Este ambiente de crescimento exponencial e disrupção tecnológica é caracterizado pela geração inovadora do NewSpace, exemplificado de forma proeminente pelas operações da SpaceX e seu projeto Starlink. Motta et al. (2024) mencionam que, até 2032, 26.104 satélites pesando menos de 500 kg, conhecidos como SmallSats, serão lançados, proporcionando conectividade e inovação extensivas, incluindo acesso global à internet. Portanto, o desenvolvimento de ferramentas que facilitem o acesso ao espaço por meio de programas de microgravidade é fundamental para o avanço de novas tecnologias e a capacitação de mão de obra qualificada.

Este artigo apresenta o MicroGravity Explorer Kit (MGX), uma plataforma multifuncional projetada para democratizar a pesquisa em microgravidade. O MGX é uma ferramenta de código aberto destinada a voos de foguetes suborbitais, tornando os experimentos em microgravidade mais acessíveis para estudantes do ensino médio, graduandos e pesquisadores. Ao simplificar processos complexos e reduzir os custos associados, o MGX permite uma participação mais ampla na exploração espacial. Equipado com um computador Jetson Nano, sensores avançados e câmeras de alta precisão, o MGX suporta uma variedade de experimentos e análises de dados, promovendo a inovação e impulsionando os avanços nas ciências espaciais. A proposta do MGX é não apenas facilitar o acesso a essas tecnologias, mas também inspirar a próxima geração de cientistas e engenheiros, contribuindo para o crescimento contínuo do setor espacial.

2. O AMBIENTE DE MICROGRAVIDADE

Esta seção descreve os métodos para obter um ambiente de microgravidade. O objetivo é desenvolver um kit experimental versátil que permita a realização de pesquisas em múltiplos propósitos. Para isso é essencial conhecer os diferentes ambientes que possibilitam a condução de experimentos.

A microgravidade, caracterizada pela quase ausência de peso e pelo estado de queda livre, oferece um ambiente único para investigações científicas em diversas disciplinas, como ciência dos materiais, ciência da combustão, medicina, eletrônica e metalurgia. Os métodos tradicionais para alcançar a microgravidade incluem torres de queda, voos parabólicos, voos orbitais e voos suborbitais. Além desses, há métodos alternativos descritos na literatura, como o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) para experimentos em microgravidade e dispositivos Lab-on-a-Chip (LOC) para simulações em solo. VANTs demonstram controle e automação eficazes em manobras de microgravidade, enquanto dispositivos LOC oferecem simulações laboratoriais controladas, embora não reproduzam fielmente ambientes de microgravidade.

A seguir, é apresentado um breve resumo dos métodos mais tradicionais, destacando suas características, vantagens e limitações.

Torres de Queda: geram microgravidade ao liberar cápsulas ou objetos em queda



livre de uma certa altura e um ambiente de vácuo. Normalmente com cerca de 100 metros de altura, essas instalações proporcionam microgravidade por durações que variam de 4 a 9,3 segundos. Por exemplo, o Protótipo GraviTower Bremen, painel superior esquerdo da Figura 2, pode realizar até 960 experimentos de curto prazo diariamente. As torres de queda são econômicas e flexíveis e permitem uma frequência elevada de testes, mas oferecem apenas períodos breves de microgravidade e de qualidade inferior em comparação com plataformas orbitais.

Voos Parabólicos: criam microgravidade ao fazer aeronaves voarem em trajetórias parabólicas, painel superior direito da Figura 2. Cada parábola proporciona aproximadamente 20 segundos de microgravidade, com a capacidade de realizar múltiplas parábolas por voo. Voos parabólicos permitem a participação humana, essencial para o treinamento de astronautas e estudos fisiológicos. No entanto, a qualidade da microgravidade é inferior, tipicamente em torno de 10^{-2} g, e cada voo envolve períodos de gravidade maior, impactando a duração total do experimento.

Voos Orbitais: realizados por estações espaciais como a Estação Espacial Internacional (ISS) e a Tiangong oferecem microgravidade contínua ao orbitar a Terra em queda livre, painel inferior esquerdo da Figura 2. Este método é ideal para experimentos de longo prazo e pesquisas extensivas, incluindo estudos sobre células, biologia vegetal e os efeitos da microgravidade na fisiologia humana, um conhecimento fundamental para a exploração espacial conforme discutido em Carvalho e Silva et al., (2023). Apesar de fornecer a melhor qualidade de microgravidade, os voos orbitais são caros e envolvem rigorosas qualificações de experimento.

Voos Suborbitais: usando foguetes suborbitais, oferecem um equilíbrio entre custo e duração. Durante esses voos, é possível obter microgravidade por vários minutos e esses foguetes podem transportar instrumentação sofisticada, painel inferior direito da Figura 2. Por exemplo, experimentos têm explorado a formação de poeira estelar e pesquisas sobre medicamentos. Os voos suborbitais são vantajosos por suas durações de microgravidade mais longas em comparação com torres de queda e voos parabólicos. Além disso, são cada vez mais utilizados com os avanços em lançadores pequenos e implantação de CubeSats.

Analisando os diferentes métodos de experimentação em microgravidade apresentados, observa-se que cada um possui vantagens e limitações específicas. As torres de queda são econômicas e permitem experimentos rápidos, mas oferecem apenas períodos muito curtos de microgravidade. Os voos parabólicos possibilitam a participação humana, o que é valioso para treinamento e estudos fisiológicos, mas têm durações de microgravidade curtas e uma qualidade inferior. Em contraste, os voos orbitais proporcionam microgravidade de alta qualidade por períodos extensos, porém são muito caros e requerem rigorosas qualificações. Por outro lado, os voos suborbitais equilibram custo e duração e suportam cargas úteis sofisticadas, embora a duração da microgravidade ainda seja inferior à dos voos orbitais. Muitas vezes, combinações desses métodos são utilizadas para superar suas limitações e avançar na pesquisa em ambientes de microgravidade.

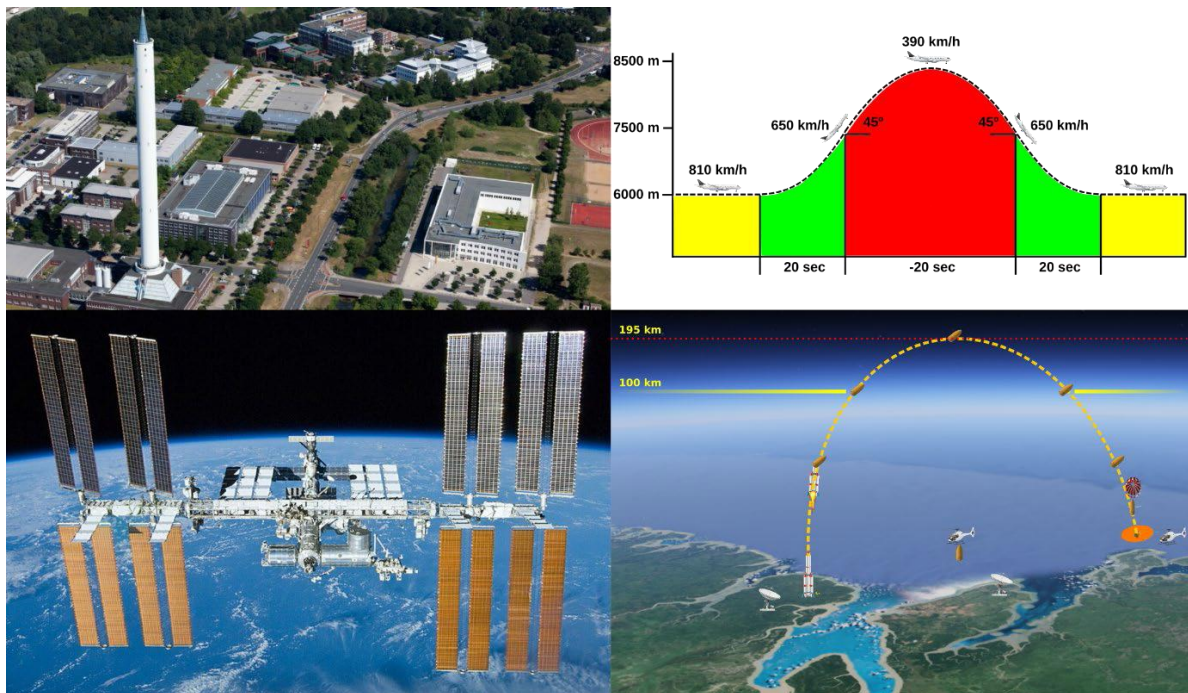


Figura 2: Meios de acesso ao ambiente de microgravidade.

3. METODOLOGIA DE PROJETO

Foguetes de sondagem são lançados a partir de instalações especializadas que incluem plataformas de lançamento, superfícies de concreto, armazenamento de propelente e edifícios de montagem (Fugivara et al., 2021). Essas instalações permitem a integração de cargas úteis, como experimentos de microgravidade, com a avionica a bordo. Durante o voo de um veículo suborbital, a telemetria e os cabos umbilicais são usados para monitorar o foguete a partir do bloco de controle. Um diagrama de contexto apresenta ao operador do controle a relação entre o experimento, o foguete e o centro de lançamento. Durante o lançamento do foguete, os operadores na casamata supervisionam a contagem regressiva e os procedimentos envolvidos na cronologia de lançamento. Os centros de controle de missão gerenciam o processo de lançamento, utilizando sistemas de segurança e comunicação para acompanhar o desempenho do foguete e garantir a segurança durante a fase propulsada do voo. Após o voo, a carga útil é recuperada para análise pós-voo, conforme ilustrado no painel inferior direito da Figura 2.

Silva e Perondi (2021) propuseram um ciclo de vida do projeto simplificado para as missões de foguetes de sondagem brasileiros, adaptando os padrões da European Cooperation for Space Standardization (ECSS). Essa abordagem equilibra o gerenciamento do projeto com a confiabilidade, simplificando as fases da missão. O design do MGX incorpora essas fases, fundindo algumas para maior eficiência e detalhando a fabricação, montagem, integração e testes. A Tabela 1 apresenta esse ciclo de vida do projeto, que começa com uma revisão da literatura sobre análise de missões, seguida pelo estabelecimento dos requisitos do MGX, a proposta de sua arquitetura e o detalhamento das implementações de hardware e software do projeto, incluindo

verificações e testes, até o voo e o encerramento da missão.

Tabela 1: Ciclo de vida do projeto adotado para o MGX.

Fase	Descrição
Fase 0 – Análise de missão	Os objetivos da missão e os requisitos de alto nível são estabelecidos. Os resultados esperados das missões potenciais serão estudados, com foco nas perguntas que o experimento pode procurar responder. Esta fase será mais refinada pelo usuário do MGX à medida que ele adapta o experimento às suas necessidades específicas.
Fase A - Viabilidade	O Conceito de Operações (ConOps) é estabelecido. Estudos arquiteturas e a seleção de uma arquitetura viável serão definidos com base nos estudos de alto nível realizados na Fase 0. O conceito de modelos (qualificação, aceitação, etc., ou protoflight) e metodologias para a verificação dos requisitos de alto nível serão propostos.
Fase B/C - Projeto	Os requisitos, restrições e especificações da missão são refinados para permitir o design detalhado e a verificação do MGX.
Fase D - fabricação, montagem, integração e testes	Com o design já aprovado, a fabricação e a verificação do MGX são concluídas. O MGX está agora pronto para ser integrado ao foguete.
Fase E/F - lançamento e encerramento da missão	O MGX é integrado ao módulo de serviço do foguete suborbital e para ser lançado. Quando aplicável, as operações de recuperação são realizadas. Os produtos da missão, incluindo os resultados dos experimentos, são fornecidos ao segmento de aplicação, e as atividades de encerramento da missão são concluídas.

3. PROJETO DO MGX

Seguindo as fases descritas na Tabela 1, inicialmente foi realizada uma compilação detalhada dos experimentos reportados na literatura, com o objetivo de garantir a versatilidade e flexibilidade do MGX como ferramenta para o desenvolvimento de experimentos futuros na área de microgravidade. Essa tarefa permitiu a classificação dos experimentos com base em seus tipos tecnológicos e especificidades de instrumentação. A revisão dos experimentos estabeleceu a base para os requisitos do desenvolvimento do projeto MGX.

Embora sejam analisados experimentos de vários métodos de microgravidade, o foco está na identificação de tendências em instrumentação e características comuns que o MGX pode incorporar em seu design. A compreensão das semelhanças entre esses experimentos, incluindo seus objetivos principais e características, desempenhará um papel fundamental na definição dos parâmetros de design para o MGX. A Tabela 2 lista vinte experimentos da literatura relacionados ao ambiente de microgravidade. Cada experimento é acompanhado por detalhes de seus sensores a bordo e classificado em quatro categorias adicionais: hipersônico (H), microgravidade (M), voo parabólico (PF) ou torre de queda (DT). A Tabela 2 também indica se o experimento requer sistemas de atuadores, câmeras para imagem e capacidades de tomada de decisão. A legenda na parte inferior da Tabela 2 fornece informações sobre os classificadores.



Tabela 2: Lista de Experimentos de Microgravidade Analisados e Suas Principais Características.

Título do experimento	Sensores	C	A	CM	DM
Um experimento estudantil para investigar o balanço de líquidos magnéticos em microgravidade, Romero-Calvo et al., (2020).	• Corrente • Magnetômetro • Acelerômetro • Infravermelho	M	Sim	Sim	Não
O Experimento CFVib: Controle de Fluidos em Microgravidade com Vibrações, Fernandez et al., (2017).	• Acelerômetro	M	Sim	Não	Não
Solidificação de Ligas Eutéticas em Microgravidade, An et al., (2014) e Toledo et al., (2019, 2024).	• Temperatura • Sensor de Vazão	PF	Não	Não	Não
Teste experimental de mini tubos de calor em condições de microgravidade a bordo de um foguete suborbital, Paiva et al., (2014, 2015).	• Temperatura	PF	Sim	Sim	Não
Propriedades da Propagação de Ondas em uma Reação do Tipo Belousov–Zhabotinsky em Gel sob Microgravidade, Hanke et al., (2009).	• Temperatura • Pressão	PF	Sim	Não	Não
equatorial na região entre as camadas E e F sobre o Brasil, Savio Odriozola et al., (2017).	• Sonda de Langmuir	PF	Não	Não	Não
HIFIRE: Uma colaboração internacional para avançar a ciência e a tecnologia do voo supersônico, Bowcutt et al., (2012).	• Pressão • Temperatura • IMU • GPS	PF	Não	Não	Não
Medição da Massa do Propulsor em um Tanque Esférico sob Condições de Microgravidade Usando Matrizes de Placas de Capacitância e Aprendizado de Máquina, Chowdhury et al., (2023).	• Capacitância	M	Não	Não	Sim
Controle da forma da interface de crescimento durante o crescimento de InGaSb por congelamento de gradiente vertical em microgravidade e otimização usando aprendizado de máquina, Ghritli et al., (2022).	• Temperatura • Vazão	M	Não	Não	Sim
Um tubo de calor pulsante para aplicações espaciais: Experimentos em solo e em microgravidade, Mangini et al., (2015).	• Temperatura • Pressão	PF	Não	Não	Sim
Investigação Experimental da Condensação em Tubos em Microgravidade, Azzolin et al., (2018).	• Temperatura • Pressão	PF	Sim	Sim	Não
Colisões Livres em um Experimento de Múltiplas Partículas em Microgravidade. I. Agregados de Poeira Adesivos a Baixas Velocidades, Weidling et al., (2012).	• N/A	M	Sim	Sim	Não
Experimentos de evaporação de gotas de combustível em ambientes sub- e supercríticos em microgravidade, Nomura et al., (2017).	• Temperatura	PF	Não	Sim	Não
Investigação Experimental da Ebulição por Nucleação de Bolha Única em Microgravidade, Nejati et al., (2020).	• Temperatura • Pressão • Coriolis flow	PF	Não	Sim	Não
Módulo de Medição de Microgravidade MEMS com Piso de Ruído Nano-g/ $\sqrt{\text{Hz}}$ para Aplicações Científicas Espaciais de Microgravidade de Nível Superior, Wang et al., (2021).	• Acelerômetro	VP	Não	Não	Não
Método Preciso de Medição do Estado de Movimento do Transportador em Ambiente de Microgravidade, Liu et al., (2023).	• IMU	N/A	Não	Sim	Não
Desenho e Resultados de um Experimento com o Objetivo de Coletar Dados sobre o Movimento de um Corpo Não Rígido em Microgravidade, Blazejczyk et al., (2021).	• IMU	DT	Não	Não	Não



II Congresso de Mulheres em STEAM

26 e 27 de setembro, no PIT, em São José dos Campos/SP

Teste de Carga Útil Suborbital a Bordo da Plataforma de Pesquisa de Foguete de Nível 3, Amberkar et al., (2020).	• Radiação • Aceleração • Pressão • Temperatura • Umidade	PF	Não	Não	Não
Gerenciamento de Propulsor em Microgravidade: Análise adicional de um experimento realizado no REXUS-14, Strobino et al., (2015).	• Aceleração	M	Sim	Sim	Não
SOAREX-8 Experimentos Suborbitais 2015 – Um Novo Paradigma para Comunicação de Pequenas Naves Espaciais, Stone et al., (2015).	• Temperatura • Pressão • Aceleração	M	Não	Não	Não
Legenda	(C) - Classe: Hipersônico (H) / Microgravidade (M) / Voo Parabólico (PF) / Torre de Queda (DT) (A) – Atuadores: Possui atuadores? (Sim/Não) (CM) - Câmeras: Possui câmeras? (Sim/Não) (DM) – Tomada de Decisão: O experimento precisa tomar decisões em tempo real? (Sim/Não)				

Com base na revisão dos trabalhos apresentados na Tabela 2 e em estudos sobre aviônica de foguetes suborbitais, como os de Villas-Boas et al. (2019), Andrade et al. (2022), Pinto et al. (2022), Simoes et al. (2024) e Dos Santos (2023) foram definidos os requisitos para o MGX, detalhado por Moura (2024). O objetivo do MGX é simplificar o projeto de experimentos em microgravidade para pesquisadores e estudantes, assegurando compatibilidade com a aviônica de foguetes e adequação ao módulo de serviço dos veículos. Os requisitos foram elaborados seguindo o processo proposto por Dos Santos (2022) e de acordo com o padrão IEEE 29148, que abrange desde a descoberta até a validação e o gerenciamento dos requisitos. A Tabela 3 apresenta os requisitos para hardware software e ambiente operacional do MGX, incluindo aspectos funcionais, de interface, operacionais e ambientais. Esses requisitos garantem que o MGX se integre e funcione adequadamente nos contextos operacionais discutidos.

Tabela 3: Requisitos do MGX.

Identificação	Descrição
REQ-01	O MGX será alimentado por uma fonte de alimentação principal.
REQ-02	A fonte de alimentação principal fornecerá 28 Volts $\pm$ 4 Volts.
REQ-03	A fonte de alimentação principal fornecerá 5 Amperes.
REQ-05	A referência de potência principal será conectada ao case do dispositivo através de um caminho de 100 K Ω .
REQ-06	O MGX gerará tensões internas.
REQ-07	O MGX gerará uma tensão interna de +3,3 Vdc.
REQ-08	O +3,3 Vdc estará disponível através de um conector de soquete de alimentação D-Sub 15.
REQ-09	O +3,3 Vdc terá a referência isolada das outras referências.
REQ-10	O MGX gerará uma tensão interna de +5 Vdc.
REQ-11	O +5 Vdc estará disponível através de um conector de soquete de alimentação D-Sub 15.
REQ-12	O +5 Vdc terá a referência isolada das outras referências.
REQ-13	O MGX gerará uma tensão interna de +12 Vdc.
REQ-14	O +12 Vdc estará disponível através de um conector de soquete de alimentação D-Sub 15.
REQ-15	O +12 Vdc terá a referência isolada das outras referências.



REQ-16	O MGX conterá uma unidade de medição inercial (IMU).
REQ-17	A IMU fornecerá um giroscópio com faixa de $\pm 2000^\circ/\text{s}$.
REQ-18	A IMU fornecerá um acelerômetro com faixa de $\pm 16g$.
REQ-19	O MGX conterá duas câmeras.
REQ-20	As câmeras terão interface USB.
REQ-21	As câmeras suportarão imagens em 4K.
REQ-22	O MGX conterá um sensor de pressão.
REQ-23	O sensor de pressão terá uma faixa de 0 a 40 KPa.
REQ-24	O MGX conterá um sensor de temperatura.
REQ-25	O MGX suportará temperaturas variando de -10°C a 75°C .
REQ-26	O MGX suportará um perfil de vibração aleatória de $0,1 \text{ g}^2/\text{Hz}$ de 20 Hz a 2000 Hz, com um total de 10 grms, em 3 eixos.
REQ-27	O MGX suportará uma aceleração de 20g em cada um dos três eixos.
REQ-28	O MGX suportará choques de amplitude de 40g por 110 milissegundos, seguindo uma forma de onda meia-senoide.
REQ-29	O MGX atenderá aos requisitos de EMI com base Nãos padrões MIL-STD-461 e MIL-STD-462.
REQ-30	O MGX fornecerá 2 portas UART.
REQ-31	A porta UART1 atenderá ao padrão RS-232.
REQ-32	A UART1 estará disponível através de um conector de soquete D-Sub 9.
REQ-33	A porta UART2 atenderá ao padrão RS-422.
REQ-34	A UART2 estará disponível através de um conector de soquete D-Sub 9.
REQ-35	As UARTs serão isoladas.
REQ-36	A taxa de transmissão das UARTs será configurável via software.
REQ-37	As UARTs do MGX serão programáveis e capazes de comunicar a 9600 bps, 14400 bps, 19200 bps, 38400 bps, 57600 bps e 115200 bps.
REQ-38	O MGX fornecerá 16 Entradas/Saídas Digitais (GPIO).
REQ-39	Os GPIOs estarão disponíveis através de um conector de soquete D-Sub 25.
REQ-40	Os GPIOs operarão em níveis TTL (Transistor-transistor logic).
REQ-41	O MGX fornecerá 2 portas I2C.
REQ-42	A porta I2C estará disponível através de um conector de 9 pinos D-Sub.
REQ-43	O I2C operará até 1MHz.
REQ-44	O MGX fornecerá 12 canais analógicos.
REQ-45	Os canais analógicos operarão em 0-5 Vdc.
REQ-46	Os canais analógicos estarão disponíveis através de um conector de 25 pinos D-Sub.
REQ-47	A taxa de amostragem dos canais analógicos será configurável via software.
REQ-48	O MGX suportará expansão de armazenamento SSD M.2 NVMe.
REQ-49	O MGX gravará os dados e vídeos coletados em memória não volátil.
REQ-50	A memória não volátil terá capacidade de 500 GBytes.
REQ-51	O MGX operará em um intervalo de temperatura ambiente de -40°C a $+85^\circ\text{C}$.
REQ-52	Quando ligado, o MGX começará a operar imediatamente de acordo com sua sequência programada.
REQ-53	O MGX será desenvolvido usando um computador de alto desempenho (HPC) equipado com uma GPU.
REQ-54	O MGX será capaz de tomar decisões autônomas durante o voo.
REQ-55	O HPC suportará frameworks de aprendizado de máquina.
REQ-56	O fornecedor do HPC fornecerá um kit de desenvolvimento de software (SDK).
REQ-57	O MGX consistirá em dois módulos principais: o módulo de processamento eletrônico e o módulo experimental.
REQ-58	As dimensões do módulo de processamento eletrônico do MGX serão 1U (10 cm x 10 cm x 10 cm).
REQ-59	O módulo experimental será desenvolvido pelo experimentador, atendendo aos requisitos da interface mecânica do foguete.



REQ-60	As dimensões e a forma do módulo experimental devem cumprir as restrições de interface especificadas para garantir a integração adequada com o foguete.
REQ-61	O MGX terá 4 pontos de fixação.
REQ-62	Os pontos de fixação suportarão parafuso M6.

4. DISCUSSÃO

Com base nos requisitos estabelecidos na Tabela 3, foi projetado o hardware ilustrado na Figura 3. Esse hardware é apresentado com os esquemas do módulo de processamento eletrônico embarcado. O elemento central para o processamento de dados é a placa NVIDIA Jetson Orin Nano, um módulo de computação projetado para uma ampla gama de aplicações embarcadas e de borda, incluindo computação em IA. O Jetson Nano possui uma CPU Arm Cortex-A78AE de 6 núcleos e uma GPU NVIDIA Ampere com até 1024 núcleos e Tensor Cores. Com esse hardware como núcleo do módulo de processamento, é possível garantir a aquisição de grandes volumes de dados experimentais, assim como dados de sensores de pressão, inerciais e imagens de câmeras 4K. Com base nesse hardware, são contemplados os requisitos REQ-20, REQ-21, REQ-30, REQ-37, REQ-41, REQ-43, REQ-45, REQ- 47 e REQ-49.

Adicionalmente, o módulo dispõe de uma interface para leitura de instrumentação I2C dos sensores do experimento, bem como I/Os TTL para leitura ou atuação (REQ-42, REQ-43). A capacidade de processamento também suporta compressão de dados H.265 (REQ-49) e algoritmos de aprendizado de máquina (REQ-55) para reconhecimento de padrões em tempo real e extração de características de imagens. Este componente de hardware é responsável por toda a comunicação entre o experimento e a estação de controle ou telemetria.

No módulo de processamento eletrônico, estão conectados três sensores essenciais. O IMU fornece dados cruciais de altitude e atitude durante o voo, sendo fundamental para a estabilização e orientação do foguete. Além disso, temos o sensor de temperatura, que monitora o dissipador de calor do Jetson Nano, garantindo que a temperatura permaneça dentro dos limites operacionais garantindo o desempenho e a vida útil do sistema. Por fim, o sensor de pressão oferece uma estimativa aproximada de altitude com base na pressão atmosférica. Além disso, ele identifica períodos transitórios no vácuo do espaço, como a entrada e saída da atmosfera terrestre. Esses sensores trabalham em conjunto para garantir o funcionamento do foguete, e a interface UART serial permite a transmissão desses dados ao sistema de telemetria a bordo.

Este módulo também inclui fontes de regulação de tensão para atender aos requisitos especificados nos REQ-2, REQ-3, REQ-6, REQ-7, REQ-8, REQ-9, REQ- 10 e REQ-13. Além disso, está equipado com uma conexão Ethernet para testes em solo (REQ-62). Ainda, o módulo oferece suporte para voos de recuperação, incluindo uma conexão de barramento M.2 NVMe capaz de conectar um SSD (REQ-48, REQ- 49, REQ-50), permitindo a gravação de dados e vídeos do experimento durante todo o experimento.

Os requisitos de interface do MGX estabelecem como ele se comunica com o experimento. Esses requisitos, como REQ-1, REQ-7, REQ-10, REQ-13, REQ-19, REQ-31, REQ-33, REQ-38, REQ-41, REQ-45 e REQ-62, especificam os tipos de interfaces esperadas. As opções de aquisição de dados incluem portas USB para câmeras 4K, um barramento I2C para sensores, uma UART para dados seriais, 12 canais de entrada analógica (0 a 5 V) e 16 pinos GPIO para controle ou leitura de dados discretos no padrão TTL.

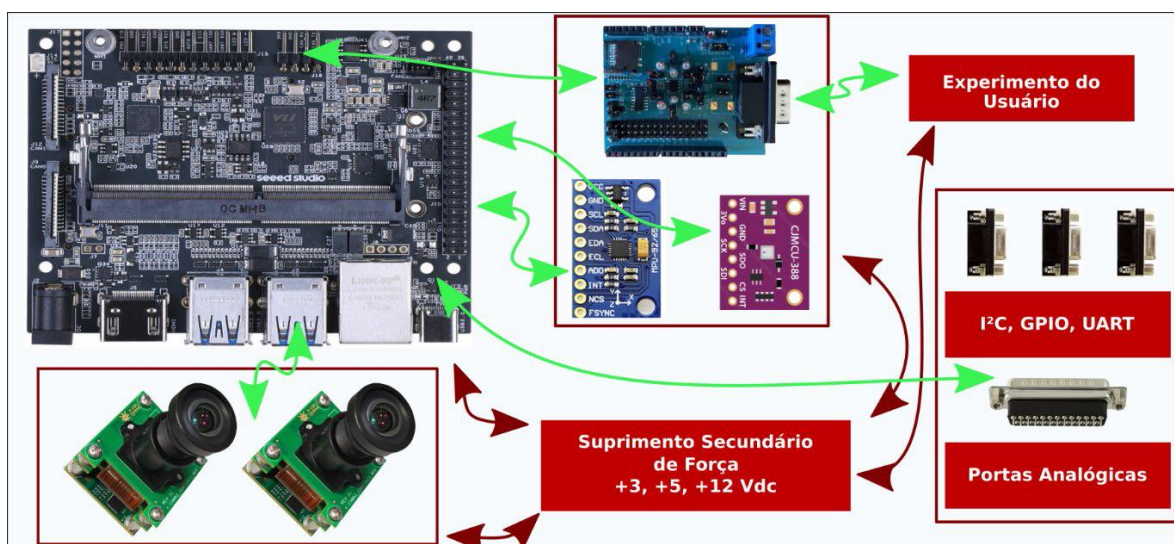


Figura 3: Diagrama esquemático de hardware do módulo de processamento eletrônico embarcado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do MicroGravity Explorer Kit (MGX) como uma plataforma de código aberto representa um avanço significativo no acesso à pesquisa em microgravidade. Ao simplificar os processos de aquisição de dados e integrar tecnologias modernas, como sensores de alta precisão e algoritmos de aprendizado de máquina, o MGX permite que um público mais amplo dentro do conceito STEAM (Ciência, Tecnologia, Engenharia, Arte e Matemática)., incluindo estudantes e pesquisadores de diversas disciplinas, participe de experimentos científicos em condições de microgravidade.

Programas de microgravidade desempenham um papel fundamental tanto na pesquisa quanto nos testes de novas tecnologias, servindo como uma porta de entrada para carreiras na crescente indústria espacial. O trabalho teve início com uma revisão abrangente dos métodos existentes de acesso à microgravidade, seguida por uma análise detalhada de experimentos documentados na literatura.

Esta revisão teve como objetivo compreender os requisitos típicos dos experimentadores para seus projetos. Com base nesse entendimento, foi estabelecida uma série de requisitos para criar um kit de experimentos versátil, adaptável a várias demandas e totalmente compatível com a instrumentação de foguetes suborbitais.

O MGX foi projetado com uma arquitetura modular, dividida em duas partes: o módulo



de processamento eletrônico e o módulo de experimentos. O módulo de processamento eletrônico possui dimensões padronizadas de 1U (10 cm x 10 cm x 10 cm), enquanto o módulo de experimentos é adaptado às necessidades específicas de cada experimento em termos de tamanho e de instrumentação. Essa flexibilidade garante que o MGX possa acomodar diversos métodos de aquisição de dados, como sensores I2C, interruptores, sensores analógicos, comunicação UART (RS-232 ou RS-422) e transmissão de dados de câmeras de alta resolução (incluindo até 4K). Além disso, o sistema pode gerar comandos para ativar atuadores nos experimentos. A plataforma de hardware MGX tem como peça central o Jetson Nano, um módulo de computação poderoso. Esse dispositivo é capaz de executar algoritmos de aprendizado de máquina em tempo real, permitindo que o MGX reconheça padrões, analise dados e comprima imagens de câmeras 4K. Essa funcionalidade aprimora os experimentos realizados em microgravidade.

Melhorias futuras na plataforma poderão aumentar suas capacidades e aplicações, ampliando ainda mais seu impacto na educação e na pesquisa científica. Com isso, o MGX tem potencial se consolidar como uma ferramenta essencial para experimentos em microgravidade e para a capacitação de novos profissionais nas ciências espaciais.

O objetivo ao desenvolver o MGX foi tornar o lançamento de experimentos no espaço mais acessível para pesquisadores e estudantes. A arquitetura flexível e compatível com foguetes do MGX, aliada às rotinas básicas de operação, possibilita a participação de mais pessoas na pesquisa espacial. Essa inclusão é fundamental para avançar nossa compreensão do espaço e impulsionar o progresso científico e tecnológico no contexto STEAM.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE) por dar suporte a essa pesquisa, fornecendo a infraestrutura necessária para o desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

AN, C.Y.; BOSCHETTI, C.; RIBEIRO, M.F.; TOLEDO, R. C.; FREITAS, F.E.; CASTILHO, F.F.; BANDEIRA, I.N. Solidification Furnace for Microgravity Experiments on Sounding Rockets. **Journal of Aerospace Technology and Management** 2012, 4, 237–240. <https://doi.org/10.5028/jatm.2012.04021412>.

ANDRADE, Rodrigo; MORAES, Alison; MOTTA, Felipe. IoT-Based Sounding Rocket Telemetry System. In: **2022 Symposium on Internet of Things (SIoT)**. IEEE, 2022. p. 1-4. <https://doi.org/10.1109/SIoT56383.2022.10070203>

BOAS, Danton José Fortes Villas et al. Innovative and low-cost launch systems. In: **Next Generation CubeSats and SmallSats**. Elsevier, 2023. p. 403-419. ISBN: 9780128245415.

BOAS, Danton José Fortes Villas et al. Proposal of low cost launchers for scientific



missions using cubesats. **Advances in Space Research**, v. 66, n. 1, p. 162-175, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.12.012>

DE CARVALHO, Isadora et al. Physiological Adaptations to Life in Space: An Update. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 15, 2023. <https://doi.org/10.1590/jatm.v15.1319>.

DOS SANTOS, C. R.; MARQUES, J. C. A Requirements Specification Method: An Experience Report in Aerospace. In: PROCEEDINGS OF THE WER, 2023. <https://doi.org/10.29327/1298356.26-20>.

DOS SANTOS, C. R.; MARQUES, J. C. ASP: An Aerospace Specification Process for Hardware Logic. In: PROCEEDINGS OF THE WER. 2022. <https://doi.org/10.29327/1298262.25-22>.

FUGIVARA, Sergio; MERLADET, Antônio V. D; LAHOZ, Carlos H. N. Stpa analysis of brazilian sounding rockets launching operations. **Microgravity Science and Technology**, v. 33, n. 3, p. 43, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12217-021-09871-x>

GARCIA, A., YAMANAKA, S. S. C., BARBOSA, A. N., BIZARRIA, F. C. P., JUNG, W., & Scheuerpflug, F. (2011). VSB-30 sounding rocket: history of flight performance. **Journal of Aerospace Technology and Management**, 3, 325-330. <https://doi.org/10.5028/jatm.2011.03032211>

KIRCHHARTZ, R., HÖRSCHGEN-EGGERS, M., & JUNG, W. (2018). **Sounding Rockets are unique Experimental Platforms**.

MOTTA, F., PESSOA FILHO, J. B., & DE OLIVEIRA MORAES, A. (2024). Is there a market for micro-launch vehicles?. **Space Policy**, 101629. <https://doi.org/10.1016/j.spacepol.2024.101629>

MOURA, W. de M; DOS SANTOS, C. R.; FREITAS, M. J. S.; PINTO, A. C.; SIMÕES, L. P.; MORAES, A. MicroGravity Explorer Kit (MGX): An Open-Source Platform for Accessible Space Science Experiments. **Aerospace**, 11, 2024. <https://doi.org/10.3390/aerospace11100790>

PERONDI, L. F. (2023). The Coming of Age of Space Satellite Industry: Transitioning from a Growth to a Maturity Life Cycle Phase. **Journal of Aerospace Technology and Management**, 15, e0323. <https://doi.org/10.1590/jatm.v15.1291>

PESSOA FILHO, J. B. (2021). Space age: Past, present and possible futures. **Journal of Aerospace Technology and Management**, 13, e3421. <https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1226>

PINTO, A. C., MACIEL, M. D., PINHO, M. S., MEDEIROS, R. R., & MORAES, A. O. (2022). Evaluation of lossy compression algorithms using discrete cosine transform for sounding rocket vibration data. **Measurement Science and Technology**, 34(1), 015117. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac97fe>.

SILVA, F. D. M., & PERONDI, L. F. (2021). A proposal of a life-cycle for the development of sounding rockets missions. **Journal of Aerospace Technology and Management**, 13, e2021. <https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1193>



II Congresso de Mulheres em
STEAM

26 e 27 de setembro, no PIT, em São José dos Campos/SP

SIMÕES, L. P., DOS SANTOS, C. R., & MORAES, A. (2024). A Proposed Methodology for Assessment of Li-ion Cell Suitability and Safety for Suborbital Vehicle Applications. *Microgravity Science and Technology*, 36(3), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12217-024-10110-2>.

SOBRAL, J. H. A. **Experimentos ionosféricos e da alta atmosfera utilizando foguetes**. 1ª Edição. São José dos Campos, São Paulo: Editora gráfica Carimbex, 1997;

TOLEDO, R. C., RIBEIRO, M. F., Bandeira, I. N., & An, C. Y. (2019). Solidification furnace developed for sounding rockets: Rio Verde mission. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 11, e2519. <https://doi.org/10.5028/jatm.v11.1040>

TOLEDO, R. C., TENÓRIO, P. I. G., SAMPAIO, M., DA SILVA, J. P., BANDEIRA, I. N., & AN, C. Y. (2024). Solidification Furnace Developed for Sounding Rockets: Santa Branca Mission. *Microgravity Science and Technology*, 36(2), 18. <https://doi.org/10.1007/s12217-024-10104-0>