DESENVOLVIMENTO ESTRUTURAL DE UMA MESA ESTABILIZADORA APLICADA À GAIOLA DE HELMHOLTZ

Tatyara Gonçalves Cardoso[1], Guilherme Moreira Cardozo[2], Manuel Barcelos Junior[3]

[1]Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil (tatyaragoncalvescardoso@gmail.com)
[2]Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil
[3]Universidade de Brasília, Brasília-DF, Brasil

Resumo: O avanço das tecnologias espaciais exige sistemas confiáveis de determinação e controle de atitude (ADCS) para satélites. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma mesa estabilizadora integrada a uma gaiola de Helmholtz para testes pré-voo de ADCS. Projetada para simular microgravidade com baixo atrito e alta rigidez, a bancada permite avaliar sensores e atuadores em condições realistas, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias espaciais no Brasil.

Palavras-chave: Tecnologia Espacial; ADCS; Teste em solo; CubeSats, Mesa Estabilizadora

INTRODUÇÃO

A determinação e o controle de atitude constituem um dos aspectos essenciais no estudo e desenvolvimento de satélites. Para a realização de testes e validações em solo, é necessário o uso de instrumentos capazes de simular algumas das condições encontradas no ambiente espacial, tais como a ausência de atrito, a microgravidade e torques gravitacionais. Nesse contexto, destacam-se os mancais a ar, utilizados há mais de 60 anos na validação de testes em solo de diversos sistemas de satélites (Kwan et al., 2015). Diferentemente de outros tipos de mancais, o mancal a ar utiliza uma fina camada de ar pressurizado para gerar uma interface praticamente livre de fricção entre as superfícies em contato (Bearings, 2006). Existem diferentes tipos de mancais a ar, cuja aplicação depende dos requisitos e das condições operacionais desejadas. O mancal esférico é amplamente utilizado em estudos de determinação e controle de atitude devido à sua capacidade de proporcionar movimento rotacional praticamente irrestrito em três graus de liberdade (Schwartz et al., 2003). Entretanto, considerando os objetivos deste trabalho, será empregado um mancal semiesférico, o qual permite rotação ilimitada em torno do eixo vertical (Z) e rotação limitada a aproximadamente 45° em torno dos eixos horizontais (X e Y) (PI, 2019). A mesa estabilizadora a ser desenvolvida será integrada a uma gaiola de Helmholtz, possibilitando a realização de testes de controle de atitude em três eixos para nanossatélites no padrão CubeSat. A mesa será acoplada à esfera do mancal a ar e deverá possuir a capacidade de suportar e fixar um CubeSat, além de incorporar unidades de massas móveis (UMM) em sua configuração para o balanceamento do sistema. Para simular adequadamente as condições de microgravidade, é essencial que a plataforma esteja balanceada em todos os eixos. Dessa forma, é necessário garantir que o centro de gravidade (CG) do sistema montado sobre a mesa coincida, ou esteja o mais próximo possível, do centro de rotação (CR) do mancal. Esse balanceamento é fundamental para garantir a estabilidade do sistema e permitir que o movimento observado seja representativo do comportamento dinâmico do satélite. O desenvolvimento da mesa estabilizadora proposto neste trabalho baseia-se em estudos anteriores realizados por estudantes da Universidade de Brasília (Silva et al., 2019; Guimarães, 2022). Entretanto, busca-se ampliar as capacidades do sistema por meio do desenvolvimento de uma mesa capaz de acomodar diferentes configurações de CubeSat, abrangendo os padrões 1U, 2U e 3U, com capacidade de carga de até 6 kg. O projeto envolve a modelagem estrutural da mesa, cálculos analíticos e simulações computacionais para avaliação do comportamento mecânico do sistema, contribuindo para o desenvolvimento de uma plataforma experimental destinada à validação de sistemas de controle de atitude em ambiente de laboratório.

MATERIAL E MÉTODOS

MANCAL A AR

O mancal a ser utilizado consiste em uma semiesfera de 100mm de diâmetro, baseada nos mancais descritos no manual da PI (2019). Considerando o objetivo de desenvolvimento de uma solução de baixo custo, o mancal será replicado em PLA

utilizando uma impressora 3D. Sua estrutura é composta por duas peças principais: uma base inferior responsável pela distribuição do fluxo de ar pressurizado e uma semiesfera superior. O ar pressurizado é injetado na base inferior, formando um colchão de ar entre as superfícies, o que reduz significativamente o atrito entre as partes e permite o movimento rotacional do sistema. A rotação em torno do eixo Z (vertical) é teoricamente ilimitada, permitindo que o sistema gire livremente ao redor desse eixo. Já as rotações em torno dos eixos X e Y (horizontais) são limitadas pela própria geometria da cavidade esférica ou semiesférica do mancal, sendo tipicamente restritas a aproximadamente ±45°. Essa configuração permite reproduzir, em ambiente de laboratório, o comportamento rotacional de satélites em órbita, possibilitando a validação experimental de algoritmos de controle de atitude e o teste de sensores e atuadores utilizados no ADCS (Attitude Determination and Control System).

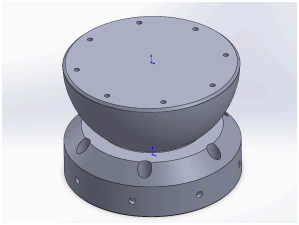


Figura 1. Mancal Aerostático.

MESA ESTABILIZADORA

A mesa estabilizadora é responsável por sustentar o CubeSat na região de campo magnético uniforme da gaiola de Helmholtz, garantindo rigidez estrutural, baixo atrito e estabilidade durante os testes. A plataforma apresenta configuração quadrada, com dimensões projetadas para acomodar CubeSats nos padrões 1U, 2Ue3U, respeitando a área útil da gaiola de Helmholtz. A mesa será fabricada em acrílico, com 330 mm de lado e 6 mm de espessura, de modo a garantir rigidez estrutural e baixa deflexão sob uma carga máxima de até 6 kg. Serão instalados suportes para as Unidades de Massas Móveis (UMM), distribuídos em três eixos. Para o eixo vertical (MZ) serão posicionados quatro suportes para massas, enquanto quatro suportes adicionais serão utilizados para os eixos horizontais X e Y (MX e MY), posicionados de forma simétrica.

As UMM associadas aos eixos X e Y serão deslocadas linearmente por meio de roscas sem-fim, permitindo o ajuste manual da posição das massas e sua fixação no ponto desejado, possibilitando o balanceamento do sistema. O design da mesa estabilizadora e das UMMs foi desenvolvido pelo Laboratório Aberto de Brasília, em colaboração com a aluna Guimarães (2022), seguindo os requisitos estabelecidos em seu trabalho.

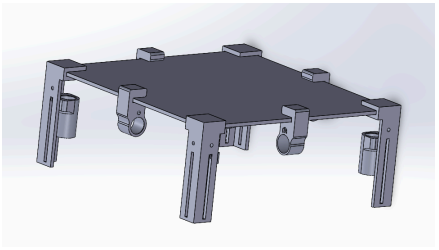


Figura 2. CAD da mesa com os suportes.

SISTEMA PNEUMÁTICO

O Sistema pneumático baseia-se na concepção de uma fina camada de ar que é capaz de anular o atrito entre as estruturas do mancal fornecendo ar comprimido limpo, seco e com pressão controlada. O fluido, geralmente ar comprimido, é injetado em cavidades ou micro-orifícios na base do mancal, gerando uma distribuição de pressão que sustenta o eixo e permite seu movimento. Diante disso, torna-se possível simular o ambiente espacial com precisão Rybus (2015). A Tabela 1 apresenta os principais componentes pneumáticos utilizados no sistema.

Tabela 1. Componentes Pneumáticos .

Componentes	Modelo
Compressor	JST
Filtro coalescente	RTI 4P-061-M04-DC
Filtro regulador de ar	Filtro Regulador 1/2 Polegada
Válvula de bloqueio	Airtac
Mangueira	Mangueira Tubo De Poliuretano Pu 06mm
Conector	Rosca macho NPT de 6 mm x1/5.1 cm

O compressor é responsável por gerar o ar comprimido necessário para alimentar o mancal aerostático. Esse equipamento utiliza um mecanismo de compressão mecânica para aumentar a pressão do ar atmosférico, convertendo energia mecânica em energia pneumática como em Kalatec (2024). No sistema proposto, o compressor deve fornecer uma pressão de operação próxima de 1.1 psi (aproximadamente 7.5 kPa), valor suficiente para gerar a força de sustentação necessária para levitar o CubeSat de até 6 kg. Sendo esta estimativa comprovada a partir da Segunda Lei de Newton. No qual, é possível estimar a força necessária para que o mancal consiga suspender um CubeSat de até 6 kg. Diante disso, é possível estimar a pressão que o ar comprimido deve gerar, através da relação entre

pressão e área. Em que a área do mancal aerostático pode ser dada a partir da área de uma esfera como em Donald F. Elger (2019). Sendo importante ressaltar que esta é apenas uma estimativa, onde não foram considerados as possíveis perdas em todo o caminho do ar comprimido pelo sistema e não sendo considerado também, a pressão atmosférica que terá que ser vencida, além da força peso considerada. Após a compressão, o ar passa por um filtro coalescente, cuja função é remover partículas sólidas, aerossóis e pequenas quantidades de líquidos presentes no fluxo de ar comprimido como em PneumaticSoluções (2018). Esse tipo de filtro utiliza um elemento filtrante especial que promove a coalescência de microgotículas, permitindo sua remoção do fluxo. A presença de contaminantes no ar poderia comprometer o desempenho do mancal, causando instabilidades na camada de ar ou até obstrução dos micro-orifícios de alimentação. Em seguida, o ar comprimido é direcionado para um filtro regulador de pressão, responsável por ajustar e estabilizar a pressão de saída do sistema pneumático como em Compressores (2025). O controle preciso da pressão é fundamental na operação do mancal aerostático, pois a espessura e a estabilidade do filme de ar dependem diretamente da pressão de alimentação. Caso a pressão seja inferior ao valor necessário, o filme de ar não será capaz de sustentar a carga aplicada, impedindo a levitação do CubeSat. Por outro lado, pressões excessivas podem gerar instabilidades no sistema e aumento desnecessário no consumo de ar. A válvula de bloqueio é um componente importante para a segurança e manutenção do sistema pneumático. Ela permite interromper completamente o fluxo de ar comprimido, isolando o sistema durante procedimentos de manutenção ou inspeção. Esse tipo de válvula normalmente possui um mecanismo de travamento com cadeado, impedindo a abertura acidental da linha de ar enquanto o sistema estiver sendo manipulado, como em Mainflame (2020). O transporte do ar comprimido entre os componentes é realizado por mangueiras de poliuretano, que apresentam boa resistência mecânica, flexibilidade e baixa perda de carga para aplicações pneumáticas,como em Saint-Gobain (2026). As conexões entre os elementos do sistema são feitas por conectores roscados do tipo NPT, garantindo vedação adequada e facilidade de montagem.

ORIFÍCIOS

O mancal aerostático utilizado neste sistema possui um mecanismo de alimentação baseado em orifícios distribuídos no estator. Nesse tipo de configuração, o ar comprimido é injetado através de pequenos furos que conectam a linha de alimentação pneumática à região do filme de ar, em que os mesmos possuem diversas vantagens como boa estabilidade, facilidade de fabricação e simplicidade construtiva como em J. P. Khatait and Lin (2005). Em que o diâmetro do orifício pode ser expressa pela seguinte equação:

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

No qual Q é a vazão volumétrica, Cd o coeficiente de descarga, A seria a área do orifício, ΔP a diferença de pressão e ρ a densidade do fluido como em Toolbox (2020). Substituindo os valores e considerando um total de 6 orifícios no sistema obtemos um valor de aproximadamente 0.4 mm de diâmetro. Ademais, a vazão volumétrica em relação a quantidade de orifícios pode ser calculada através:

$$Q_{furo} = \frac{Q_{total}}{n} \quad (2)$$

No qual Q do furo é a vazão volumétrica do furo, Q total é a vazão volumétrica total do sistema, n o número de orifícios. E a vazão total por :

$$Q_{total} < 1\,SCFM \quad (3)$$

O Qual Qtotal é a vazão volumétrica total do sistema. Sendo uma estimativa inicial, antes de uma análise mais detalhada através da equação de Reynolds

TUBULAÇÃO

Em mancais aerostáticos, o ar comprimido é introduzido na superfície do mancal através de restritores ou pequenos orifícios. Esse ar forma uma película pressurizada responsável pela sustentação da carga. A geometria da alimentação pneumática influencia diretamente o desempenho do mancal, especialmente a distribuição de pressão, a capacidade de carga, a estabilidade e a rigidez do sistema. Uma das configurações mais utilizadas é a tubulação do tipo estrela com seis furos distribuídos radialmente. Nesse tipo de configuração, existe normalmente uma entrada principal de ar localizada na região central do mancal, da qual partem seis canais distribuidores igualmente espaçados angularmente (Mendes,2017), (Silva,2012).

A principal razão para utilizar uma geometria em estrela com seis furos está relacionada à uniformidade da distribuição de pressão. Quando o ar é distribuído de maneira simétrica, o filme pneumático torna-se mais homogêneo, evitando regiões de alta ou baixa pressão que poderiam causar inclinação da plataforma, instabilidades ou perda de rigidez. Essa simetria também reduz momentos desbalanceados e melhora o comportamento dinâmico do sistema, especialmente em aplicações sensíveis como testes de atitude de satélites. Outro

fator importante é o aumento da rigidez estática do mancal. A rigidez representa a capacidade do sistema resistir à aproximação entre as superfícies separadas pelo filme de ar. Em mancais alimentados por múltiplos orifícios, a pressão é renovada continuamente em diversos pontos da superfície, reduzindo quedas locais de pressão e aumentando a capacidade de sustentação da carga. Dessa forma, o mancal torna-se mais resistente a perturbações externas e vibrações (Britto,2024), (Santos,2024).

A utilização de seis furos também contribui para reduzir instabilidades pneumáticas. Quando apenas um único orifício central é utilizado, podem surgir regiões de pressão excessivamente concentradas, além de oscilações associadas ao comportamento compressivo do ar. A distribuição do fluxo em múltiplos pontos suaviza o gradiente de pressão e melhora a estabilidade dinâmica do sistema. Além disso, a alimentação radial reduz regiões mortas e recirculações indesejadas do fluxo de ar (Britto,2024), (Silva,2012).

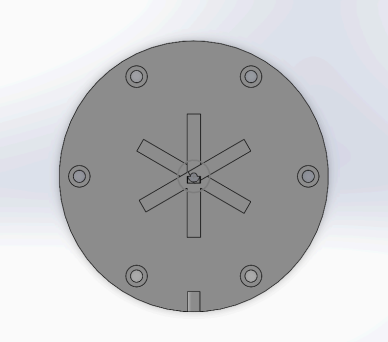


Figura 3. Geometria em estrela do mancal.

A tubulação em estrela possui ainda a função de equalizar a pressão entre os diferentes orifícios. Quando os canais possuem dimensões semelhantes, as perdas de carga tendem a ser aproximadamente iguais, permitindo que cada furo receba uma vazão semelhante. Isso garante uma distribuição mais uniforme do filme pneumático e melhora o desempenho global do mancal. Apesar das vantagens, o aumento indiscriminado do número de furos não resulta necessariamente em melhor desempenho. Quantidades excessivas de orifícios podem aumentar significativamente o consumo de ar, dificultar a fabricação e provocar interações indesejadas entre os jatos pneumáticos. Por esse motivo, configurações com quatro, seis ou oito furos são frequentemente utilizadas em projetos de mancais aerostáticos de precisão.

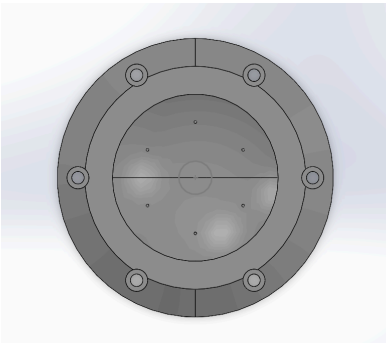


Figura 4. CAD do mancal em vista superior.

ELETRÔNICA

O sistema eletrônico proposto tem como objetivo realizar o monitoramento contínuo de parâmetros fundamentais para a análise das condições de operação do mancal aerostático. O acompanhamento dessas variáveis é essencial para garantir a estabilidade do sistema, prevenir falhas e permitir a análise do desempenho durante os testes experimentais. Entre os principais parâmetros monitorados estão a pressão, umidade relativa do ar, tensão elétrica do sistema e temperatura, os quais influenciam diretamente no comportamento físico do mancal e na confiabilidade do sistema eletrônico embarcado. O monitoramento de tais grandezas físicas é realizado por meio de sensores eletrônicos específicos, capazes de converter grandezas físicas em sinais elétricos que podem ser processados digitalmente por um computador de bordo. Esses sensores operam baseados em diferentes princípios físicos, como variações de resistência elétrica, capacitância, efeitos piezoelétricos ou medições baseadas em semicondutores. A correta aquisição e processamento desses dados permitem uma análise precisa das condições ambientais e operacionais do sistema. Os componentes eletrônicos estão listados abaixo:

Tabela 2. Componentes Eletrônicos.

Componente	Modelo
Computador de bordo	Raspberry pi 4
Acelerômetro	Mpu-9250
Giroscópio	Mpu-9250
Sensor de temperatura	SHT20 Modbus
Sensor de voltagem	INA-219
Baterias	NR18650-25R Cilíndrica

O computador de bordo Raspberry Pi 4 é responsável pelo processamento dos dados provenientes dos sensores, armazenamento das informações e transmissão dos dados coletados. Este dispositivo é

amplamente utilizado em aplicações embarcadas devido à sua elevada capacidade de processamento, baixo consumo de energia e ampla compatibilidade com sensores e periféricos, como em pi (2012).

Para o monitoramento da dinâmica do sistema são utilizados sensores inerciais baseados na Unidade de Medição Inercial (IMU) MPU-9250, que integra em um único dispositivo um acelerômetro triaxial e um giroscópio triaxial. O acelerômetro mede acelerações lineares ao longo dos três eixos espaciais, permitindo identificar vibrações e deslocamentos do sistema. Já o giroscópio mede velocidades angulares, possibilitando detectar rotações ou instabilidades no mancal durante o funcionamento. Sensores inerciais desse tipo são amplamente utilizados em sistemas de navegação, controle de atitude e monitoramento de vibração, como em InvenSense (2016).

O monitoramento da temperatura e da umidade relativa do ar é realizado por meio do sensor SHT20, um dispositivo digital baseado em tecnologia CMOSens®, que integra elementos sensores e circuitos de processamento em um único encapsulamento. A medição da temperatura é fundamental para avaliar possíveis variações térmicas que possam afetar o comportamento dos materiais, enquanto a umidade pode influenciar na estabilidade do ar utilizado na sustentação do mancal e na confiabilidade do sistema eletrônico como em Sensirion (2011). A Tensão elétrica do sistema é monitorada utilizando o sensor INA219, desenvolvido pela Texas Instruments. Esse dispositivo é um monitor digital de corrente e tensão baseado em um amplificador de shunt de alta precisão, capaz de medir a queda de tensão em um resistor de shunt e calcular a corrente consumida pelo sistema. Esse tipo de monitoramento é essencial para avaliar o consumo energético do circuito e garantir que os componentes operem dentro das faixas seguras de tensão, como em Texas Instruments (2015).

A integração entre o computador de bordo e os sensores será realizada utilizando a linguagem de programação C, amplamente empregada em sistemas embarcados devido à sua alta eficiência, controle direto sobre o hardware e baixo consumo de recursos computacionais. Essas características tornam a linguagem C especialmente adequada para aplicações que exigem processamento em tempo real e aquisição contínua de dados.

Além da aquisição e processamento local dos dados, o sistema também realizará a transmissão das informações coletadas por meio de comunicação sem fio, utilizando o protocolo Wi-Fi. O Wi-Fi é uma tecnologia de comunicação baseada no padrão IEEE 802.11, amplamente utilizada para redes locais sem fio (WLAN). Esse protocolo permite a troca de dados entre dispositivos eletrônicos sem a necessidade de conexões físicas, utilizando ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas. Arquitetura de rede Wi-Fi normalmente utiliza uma topologia em estrela, na qual diversos dispositivos se conectam a um ponto central chamado ponto de acesso (Access Point). Esse ponto de acesso pode atuar como um gateway, permitindo a conexão da rede local com a Internet ou com outros sistemas de monitoramento remoto. Em ambientes convencionais, um ponto de acesso pode conectar dezenas de dispositivos simultaneamente, dependendo da capacidade do equipamento utilizado. Os padrões mais comuns de Wi-Fi incluem o IEEE 802.11b/g/n, que opera na faixa de frequência de 2,4 GHz, oferecendo taxas de transmissão típicas entre 150 e 200 Mbps em ambientes domésticos ou laboratoriais, com alcance aproximado de até 50 metros. Já o padrão mais recente IEEE 802.11ac opera na faixa de 5 GHz e pode atingir taxas de transmissão significativamente maiores, variando entre 500 Mbps e 1 Gbps, dependendo da configuração do sistema. Essas características tornam o Wi-Fi uma solução simples e eficiente para sistemas de monitoramento remoto em aplicações experimentais, como em midia (2026).

PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

O sistema eletrônico será implementado em uma placa de circuito impresso (PCB– Printed Circuit Board), responsável por interconectar todos os componentes eletrônicos do sistema de forma organizada e confiável. As PCBs desempenham um papel fundamental em sistemas eletrônicos modernos, pois permitem a redução do tamanho do circuito, aumentam a confiabilidade das conexões e facilitam o processo de montagem e manutenção, como em Ansys (2026). A Placa deverá possuir furos de fixação em suas extremidades, permitindo sua instalação na mesa do mancal por meio de parafusos padrão M3 e porcas. Essa solução mecânica garante a fixação segura da placa sem causar danos às trilhas condutoras do circuito ou aos componentes eletrônicos montados. O material escolhido para a fabricação da PCB será o FR-4, um dos substratos mais utilizados na indústria eletrônica. O FR-4 é um material compósito constituído principalmente por camadas de fibra de vidro tecida impregnadas com resina epóxi retardante de chama. A fibra de vidro proporciona resistência mecânica e estabilidade estrutural, enquanto a resina epóxi atua como agente ligante e confere propriedades dielétricas ao material. Esse compósito apresenta uma combinação equilibrada de propriedades importantes para aplicações eletrônicas, como elevada rigidez mecânica, boa estabilidade térmica, excelente isolamento elétrico e resistência à chama. Além

disso, o FR-4 apresenta boa compatibilidade com processos industriais de fabricação de PCB, tornando-se uma solução economicamente viável para uma ampla gama de aplicações eletrônicas e sistemas embarcados como em Hub (2012). Todo o sistema eletrônico será alimentado por duas baterias do tipo 18650 conectadas em configuração em série. As baterias Samsung INR18650-25R são amplamente utilizadas em aplicações eletrônicas devido à sua elevada densidade energética, capacidade de fornecer correntes relativamente altas e boa estabilidade durante ciclos de carga e descarga. A utilização de duas células em série permite uma maior tensão ao sistemas como em Panasonic (2018)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ANÁLISE ESTRUTURAL

Com o objetivo de verificar a integridade estrutural da mesa sob diferentes condições de carregamento, foram realizadas simulações para avaliação da deformação total e das concentrações de tensão no material. As simulações estruturais foram realizadas no software ANSYS Mechanical, considerando uma análise estrutural estática. Para a simulação por elementos finitos (FEA), o elemento tetraédrico quadrático de 10 nós foi utilizado. A mesa estabilizadora foi modelada em PMMA,enquanto o mancal aerostático foi considerado em PLA. As propriedades mecânicas adotadas nas simulações estão apresentadas na Tabela 1. As propriedades mecânicas dos materiais utilizados foram definidas conforme valores encontrados na literatura, como em Callister Jr and Rethwisch (2020) e na biblioteca do ANSYS.

Tabela 3. Propriedades mecânicas dos materiais.

Propriedade	PLA	PMMA
Densidade (kg/m³)	1250	1180
Módulo de Young (GPa)	3.4	2.24-3.24
Coeficiente de Poisson	0.36	0.37-0.44
Resistência última à tração (MPa)	59	48.3-72.4
Limite de escoamento (MPa)	54	53.8-73.1

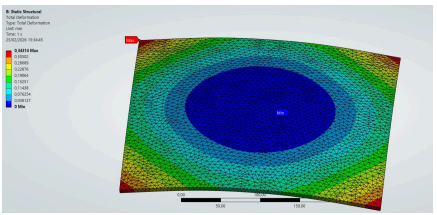


Figura 5. Deformação total com cargas nas extremidades.

Nas simulações, foram aplicadas pressões nas áreas correspondentes aos suportes das massas, seguindo a relação entre pressão e área. A região de contato entre a mesa e a semiesfera do mancal foi considerada como condição de fixação estrutural. Foi considerada a aplicação de massas de 100 g nas arestas e nas quinas da mesa. Os resultados indicaram uma deformação máxima de aproximadamente 0,34 mm, valor considerado aceitável para a aplicação proposta e compatível com as propriedades mecânicas do material utilizado. A deformação visual apresentada está amplificada para melhor visualização dos efeitos estruturais.

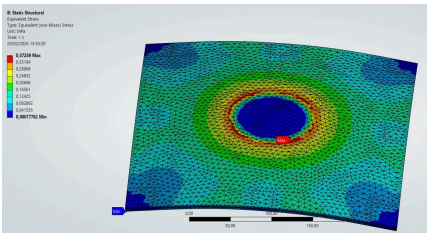


Figura 6. Tensão equivalente (von Mises).

Na Etapa seguinte, utilizando as mesmas condições de carregamento, foi realizada a análise de tensão equivalente (von Mises). Os resultados indicaram tensões mínimas nas regiões das quinas da mesa e concentrações de tensão mais elevadas ao redor da área do anel de contato entre a semiesfera do mancal e a mesa. Entretanto, a tensão máxima obtida permanece abaixo do limite de resistência do material, indicando que a estrutura apresenta comportamento adequado para as condições de carga consideradas.

TESTES

O teste experimental do mancal aerostático foi realizado com o objetivo de verificar o funcionamento do sistema pneumático e analisar o comportamento do mancal quando submetido à injeção de ar comprimido. Durante o experimento, utilizou-se uma pressão de alimentação de aproximadamente 1 bar aplicada através da tubulação do tipo estrela com seis furos distribuidores. Essa configuração permitiu a distribuição do ar comprimido de forma relativamente uniforme sobre a superfície do mancal, possibilitando a formação de um filme de ar entre as superfícies de contato.

Inicialmente, foi observado que, sem a injeção de ar, objetos com massa de até 2 kg permaneciam parados sobre o mancal. Nessa condição, existia contato direto entre as superfícies, fazendo com que o atrito mecânico fosse suficientemente elevado para impedir o movimento do objeto. Entretanto, ao iniciar a

alimentação pneumática, verificou-se uma mudança significativa no comportamento do sistema.

Com a entrada do ar comprimido em uma pressão de 40 psi até 60 psi, ocorreu a formação da película pneumática responsável pela sustentação aerostática. Esse filme de ar reduziu drasticamente o atrito entre as superfícies do mancal, fazendo com que o objeto perdesse aderência e deslizasse facilmente sobre a superfície. Como consequência, o objeto acabava saindo da posição inicial ou "caindo" da região de apoio do mancal.Esse comportamento foi considerado um indicativo positivo do funcionamento do sistema, pois demonstrou que o mancal foi capaz de substituir o contato sólido entre as superfícies por uma camada de ar pressurizado. A redução significativa do atrito também pôde ser observada durante os testes de movimentação, nos quais o mancal permanecia girando por um período relativamente longo após a aplicação de um pequeno movimento manual.

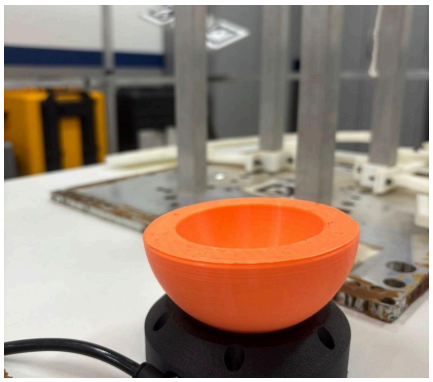


Figura 7. Teste do Mancal.



Figura 8. Teste em 60 psi.



Figura 9. Teste em 40 psi.

Portanto, o fato do objeto deslizar ou cair após a injeção de ar não representa necessariamente uma falha do sistema. Pelo contrário, esse resultado evidencia que o filme pneumático foi formado corretamente e que houve redução do atrito mecânico, princípio fundamental de funcionamento dos mancais aerostáticos. O experimento demonstrou, assim, a eficiência da sustentação pneumática e a capacidade do sistema de proporcionar movimentos com baixa fricção.

ELETRÔNICA

Na parte eletrônica foi realizado uma placa de circuito impresso para o controle de dados relacionados a mesa estabilizadora,em que o esquemático assim como o layout da PCB seguem abaixo com os seus devidos componentes.

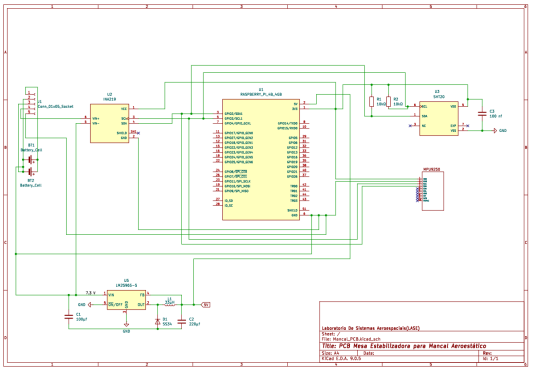


Figura 10. Esquemático da PCB

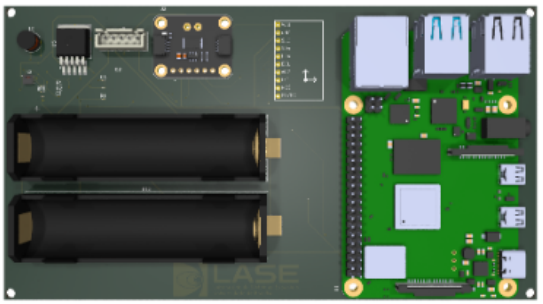


Figura 11. Layout da PCB

Foram analisados os DRCs (Design Rule Checks) da placa de circuito impresso do mancal aeroestático, verificando-se a conformidade das trilhas, espaçamentos, conexões e demais regras de projeto eletrônico. Os resultados obtidos indicaram o correto funcionamento das verificações elétricas, não sendo identificados erros críticos no layout da placa, garantindo assim maior confiabilidade e segurança.

CONCLUSÃO

O trabalho apresentou o desenvolvimento estrutural, além de seu sistema eletrônico e pneumático, da mesa para operar em conjunto com uma gaiola de Helmholtz no Laboratório de Sistemas Aeroespaciais da Universidade de Brasília. Os resultados das simulações indicam que a estrutura apresenta deformações e níveis de tensão compatíveis com os limites dos materiais adotados e uma boa confiabilidade e eficácia do sistema pneumático e eletrônico . Para trabalhos futuros serão realizados cálculos e simulações adicionais, que permitirão estimar as massas necessárias responsáveis pelo balanceamento da mesa com precisão. Também há foco em aprimorar o sistema pneumático com estudos aprofundados do escoamento, propriedades da película de ar, dinâmica de vazão nos orifícios e mapeamento das perdas de pressão em todo o sistema. Além versionamento iterativo da placa de circuito impresso (PCB) com validação em bancada, calibração avançada dos sensores e aprimoramento do sistema de controle conjunto (mesa estabilizadora e CubeSat)

REFERÊNCIAS

Ansys. “What is a printed circuit board (PCB)?”. Ansys, 2026. Disponível em: https://www.ansys.com/simulation-topics/what-is-a-printed-circuit-board. Acesso em: 22 mar. 2026.

Bearings, N.W.A. “Air Bearing Application and Design Guide”. Revision E. A.P., 2006.

Callister Jr, W.D.; Rethwisch, D.G. Materials Science and Engineering: An Introduction. John Wiley & Sons, 2020.

Compressores. “Para que serve o filtro regulador de ar?”. Air Press Compressores, 2025. Disponível em: https://www.airpresscompressores.com.br/para-que-serve-o-filtro-regulador-de-ar/. Acesso em: 22 mar. 2026.

Elger, D.F.; LeBret, B.A.; Williams, C.T.; Crowe, J.A.; Roberson, J.A. Engineering Fluid Mechanics. John Wiley & Sons, 2019.

Guimarães, S.C. Implementação e validação de plataforma para análise cinemática de CubeSat 1U. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

Hub, A.E. “Material FR4 explicado na fabricação de PCB”. AllPCB, 2012. Disponível em: https://www.allpcb.com/blog/pcb-manufacturing/fr4-material.html. Acesso em: 22 mar. 2026.

InvenSense. MPU-9250 Datasheet. InvenSense, 2016. Disponível em: https://invensense.tdk.com/download-pdf/mpu-9250-datasheet/.

Khatait, J.P.; Lin, W.L.; Lin, W.J. “Design and Development of Orifice-Type Aerostatic Thrust Bearing”. SIMTech Technical Reports, 2005.

Kalatec. “Compressor de ar: o que é e como funciona?”. Kalatec, 2024. Disponível em: https://blog.kalatec.com.br/compressor-de-ar/. Acesso em: 22 mar. 2026.

Kwan, T.H.; Lee, K.M.B.; Yan, J.; Wu, X. “An Air Bearing Table for Satellite Attitude Control Simulation”. In: 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, pp. 1420–1425, 2015.

Mainflame. “Válvula de bloqueio: o que é, principais tipos e mais!”. Mainflame, 2020. Disponível em: https://mainflame.com.br/blog/valvula-de-bloqueio-o-que-e-principais-tipos-e-mais/. Acesso em: 22 mar. 2026.

Hostmidia. “O que é Wi-Fi? Tudo o que você precisa saber”. Hostmidia, 2026. Disponível em: https://www.hostmidia.com.br/blog/wi-fi/. Acesso em: 22 mar. 2026.

Panasonic. Lithium-Ion Battery 18650 Datasheet. Panasonic, 2018. Disponível em: https://industrial.panasonic.com/www-data/pdf2/ACA4000/ACA4000CE260.pdf.

PI. PIglide HB Hemispherical Air Bearings User Manual. PI (Physik Instrumente), Version 1.3, 2019.

Raspberry Pi. “Raspberry Pi Documentation”. Raspberry Pi Foundation, 2012. Disponível em: https://www.raspberrypi.com/documentation/. Acesso em: 22 mar. 2026.

Pneumaticsoluções. “Filtro coalescente: entenda facilmente o que é e as suas vantagens”. Pneumaticsoluções, 2018. Disponível em:

https://pneumaticsolucoes.com/filtro-coalescente-entenda/. Acesso em: 22 mar. 2026.

Rybus, T. “Planar Air-Bearing Microgravity Simulators: Review of Applications, Existing Solutions and Design Parameters”. Acta Astronautica, 2015.

Saint-Gobain. “Mangueiras pneumáticas de polietileno, poliamida e poliuretano”. Saint-Gobain, 2026. Disponível em: https://lifesciencesbrasil.saint-gobain.com/blog/mangueiras-pneumaticas-de-polietileno-poliamida-e-poliuretano. Acesso em: 22 mar. 2026.

Schwartz, J.L.; Peck, M.A.; Hall, C.D. “Historical Review of Air-Bearing Spacecraft Simulators”. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 26, No. 4, pp. 513–522, 2003.

Sensirion. SHT20 Humidity and Temperature Sensor Datasheet. Sensirion Instruments, 2011. Disponível em: https://sensirion.com/media/documents/120BBE4C/63500094/SensirionHumiditySensorsSHT20Datasheet.pdf.

Silva, R.C.; Guimarães, F.C.; Loiola, J.V.L.; Borges, R.A.; Battistini, S.; Cappelletti, C. “Tabletop Testbed for Attitude Determination and Control of Nanosatellites”. Journal of Aerospace Engineering, Vol. 32, No. 1, p. 04018122, 2019.

Texas Instruments. INA219 High-Side Measurement Sensor Datasheet. Texas Instruments, 2015. Disponível em: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf.

Engineering Toolbox. “Medidores de vazão de orifício, bocal e venturi: princípios, cálculos e dados”. Engineering Toolbox, 2020. Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/orifice-nozzle-venturi-d590.html. Acesso em: 22 mar. 2026.

BRITTO, Carlos Roberto. Uma avaliação de mancais aerostáticos para máquinas-ferramenta. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

MENDES, Rodrigo da Silva. Estudo comparativo entre mancais aerostáticos com restritor de orifício e com elemento cerâmico poroso. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SANTOS, Leandro Ferreira dos. Estudo de restritores ranhurados para mancais aerostáticos radiais e axiais. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2024.

SILVA, Marcelo Augusto da. Análise da distribuição de pressão em mancais aerostáticos de múltiplos orifícios. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.