CBMAdi
CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUFATURA ADITIVA
ISBN: 978-65-86861-62-4

Proposta de aplicação da manufatura aditiva num projeto de giroscópio

[1]Lygia Graboschii Whittaker Franco, [1]João Cioffi, [1]Wilian Miranda dos Santos, [1]Denilson Paulo Souza dos Santos, [1–2]Julian Arnaldo Avila

1. UNESP - Universidade Estadual Paulista, Campus de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista - SP, Brasil
2. UAO - Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia

emails:
lygia.franco@unesp.br
joao.cioffi@unesp.br
wilian.santos@unesp.br
denilson.santos@unesp.br
julian.avila@unesp.br

Resumo:

O giroscópio é um instrumento utilizado para a correção de rotas na navegação aérea. Tendo em vista a presença de grupos de aeromodelismo, foguetemodelismo, bem como pesquisas de graduandos e pós graduandos nas áreas de aeroespacial, aeronáutica e telecomunicações da comunidade UNESP de São João da Boa Vista, fez-se necessário a elaboração de um projeto de um giroscópio de bancada próprio da universidade para atender esta demanda. A manufatura aditiva mostrou-se como uma ferramenta de baixo custo para a fabricação das peças e com facilidade de ajuste aos demais componentes como: motores, rolamentos, potenciômetros e eixos. No presente trabalho se apresentam duas propostas de confecção do giroscópio desenhados num software CAD, sendo que os dois projetos serão fabricados e testados nas próximas etapas.

Palavras-chave: manufatura aditiva; giroscópio; aeroespacial;

1. Introdução

Importantes avanços na área da comunicação, observação da Terra, espaço e estudos climáticos ocorreram graças ao progresso que ocorreu nas áreas aeroespacial, aeronáutica e tecnológica, o domínio de tecnologias oriundas desta miscelânea promoveu uma corrida tecnológica que utilizam várias áreas do conhecimento. O surgimento de nano satélites favoreceram a entrada de universidades nos processos de discussão e criação destas tecnologias pois o custo do processo foi barateado, sendo possível a impressão 3D de algumas estruturas e a aquisição de periféricos com um orçamento reduzido. Uma plataforma de testes de sensores [Fraden (2010)] e alguns atuadores podem ser criados para validação utilizando a manufatura aditiva.

Durante a criação de um satélite faz-se necessário uma bancada de teste (Simulador de controle de atitude) para fins de validação e análise dos requisitos embarcados no protótipo com a finalidade de garantir o funcionamento desejado. O controle de atitude de um nanossatélite pode ser simulado em uma mesa de 3 eixos, que é um tipo de giroscópio [Awerjcewicz et al, 2012], onde pode ser simulado controle de rodas de reação, apontamento, calibração de sensores: giroscópios, acelerômetros e velocidades de rotação [Ishioka, 2017; Peña, 2012; Helemberg, 2014]. O sistema de controle de atitude (Attitude Determination and Control System - ADCS) robusto de um satélite é de fundamental importância para a missão sendo utilizado para garantir a orientação do satélite em órbita, posicionamentos das antenas de comunicação e painéis solares.

A manufatura aditiva (MA) refere-se às tecnologias empregadas para construir objetos ou peças a partir de desenhos obtidos por modelagem computacional em 3D. Neste processo os materiais podem ser depositados no estado fundido (fusão a laser), na forma de fio ou de pó. Esta deposição de

material é feita camada por camada até a completa fabricação do componente requerido. Às vezes pode ser necessário que o componente seja usinado ou seja submetido à etapa de retífica para pequenas correções dimensionais. A ASTM (ASTM F2792, 2013) define a manufatura aditiva como "*Additive Manufacturing (AM), a process of joining materials to make objects form 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies such as traditional machining"*

É importante salientar que a principal vantagem desse processo é o componente se encontrar em um estado quase pronto para uso após ser construído, sem necessitar de investimentos adicionais de usinagem e tempo para remover grande volume de material, limitando o uso de usinagem às correções dimensionais e acabamentos superficiais, quando necessário.

Existem diferentes termos para descrever a manufatura aditiva, inicialmente foi chamada de "Prototipagem Rápida". Devido aos progressos recentes nesta área o termo "prototipagem" não descreve adequadamente o processo e os produtos obtidos. Depois, o termo "manufatura aditiva" foi introduzido porque representa melhor as características do processo. Com o intuito de ter uma interpretação mais realista da MA alguns pontos precisam ser destacados:

- Existem diferentes formas de desenhar e fabricar as peças, no entanto, devido ao processo de fabricação ser realizado camada a camada, existem geometrias em que a camada depositada irá ficar sem o suporte adequado, o que acarretaria falta de preenchimento ou geração de defeitos volumétricos.
- Esta tecnologia é ágil e versátil quando comparada com todo o processo produtivo de uma única peça por vias convencionais.
- Esta tecnologia consegue usar grande parte da matéria-prima durante a operação de fusão das camadas, mas sempre terá material que não será usado. Dependendo da influência suportada pelo material remanescente devido ao ciclo térmico, este poderá ser reutilizado ou descartado.
- Esta tecnologia não pretende substituir processos de fabricação bem estabelecidos técnica e economicamente, mas sim oferecer uma alternativa à produção de peças de maior complexidade de fabricação, uso de materiais caros, com geometrias personalizadas ou inexistentes no mercado.

Entre os mercados que já utilizam e outros começando a utilizar a MA, encontram-se as indústrias dos setores eletrônico, médico, aeroespacial e automobilístico. Foi estimado que em 2011 a venda de produtos e serviços de MA foi de US$ 1,7 bilhões e que para 2015 os crescimentos foram de até US$ 3,7 bilhões (AM-PLATFORM, 2014). Além disso, o crescimento da indústria de MA pode ser observado nas vendas de equipamentos. No setor de produção de componentes de polímeros existem aproximadamente 30.000 equipamentos instalados e no setor de MA de materiais metálicos, em torno de 500 equipamentos; e a expectativa é a de que esses números continuem crescendo. As pesquisas mostram que a MA vem sendo utilizada diretamente na produção de componentes (20 %) e em padrões para ferramentas de prototipagem (12,2 %) e fundição de ligas metálicas (12,1 %) (AM-PLATFORM, 2014).

1. Métodos

- **Uma breve descrição matemática do sistema:**

Inicialmente, partindo-se do princípio do equilíbrio de forças e momentos atuantes num corpo, optou-se pela modelagem de seções simétricas de cada componente estrutural do giroscópio [Apstoly, 2016; Usubamatov, 2016; Helemberg, 2014]. O equilíbrio estático referido pode ser representado como se segue:

- $\sum F_{i,j,k} = 0$ e $\sum M_{i,j,k} = 0$, em que i, j, k são as direções axiais representadas no espaço.

Outras condições de equilíbrio podem ser descritas na forma:

- $\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum F_{i,ext} = F_{res}$: Equilíbrio em translação
- $\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum \tau_{i,ext} = 0$: Equilíbrio dos torques

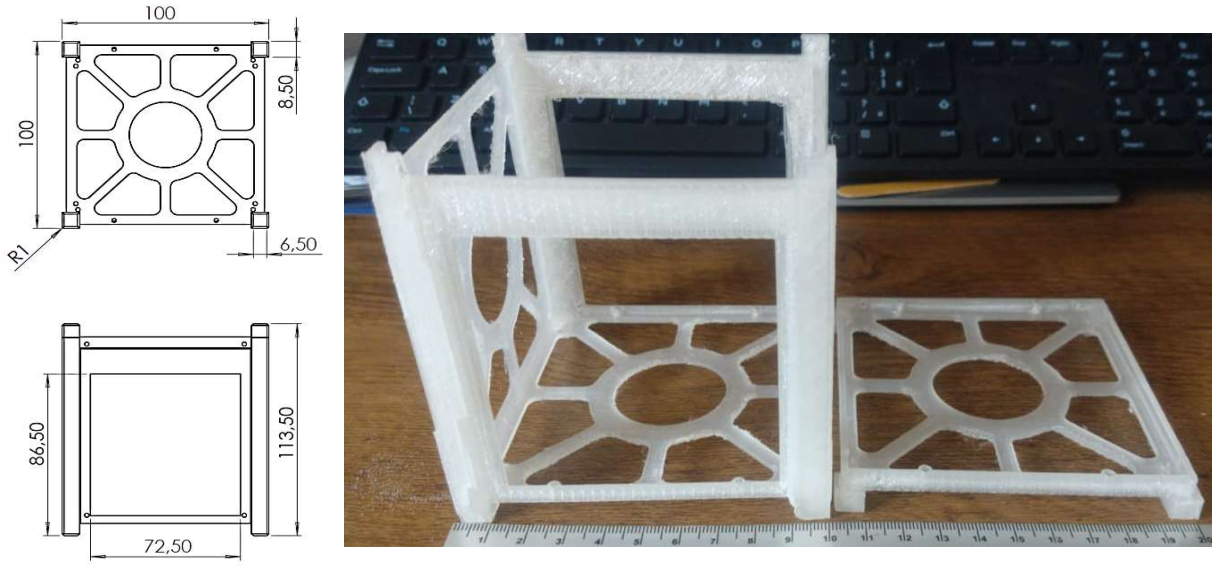
Desta forma, pôde-se criar modelos estaticamente e dinamicamente estáveis, visto que, atendidos aos critérios estabelecidos, o giroscópio não apresentaria tendências em condições de repouso e permaneceria em equilíbrio rotacional. Em suma, estando em rotação ou simplesmente estagnado, o modelo apresenta-se totalmente em equilíbrio - podendo, assim, haver o acionamento de um controle específico em qualquer uma das condições. Este controle agiria de forma a atuar na rotação da câmara em três graus de liberdade.

- **As propostas:**

Neste trabalho duas propostas de giroscópios foram elaboradas, em que a manufatura aditiva de polímero foi selecionada como o método principal de fabricação devido a versatilidade e facilidade de testar diferentes conceitos. Nos itens 2.1 e 2.2, evidencia-se as peças que serão fabricadas usando a manufatura aditiva, utilizando uma impressora 3D Ender 3D Pro. Cada projeto foi desenvolvido por um aluno de graduação de engenharia aeronáutica, em que os professores participaram como guias acadêmicos.

Foi considerado o fato de que a impressora adquirida pela universidade confecciona peças de até 200 mm X 200 mm X 200mm. Em cada projeto serão colocados 3 motores N20 DC, 3 potenciômetros 3590S-2-103L e 3 drivers L298N. Utilizaram-se também eixos de aço e rolamentos, que assim como o suporte de apoio, não foram confeccionados por manufatura aditiva. Na seguinte etapa, as partes serão fabricadas e os giroscópios serão montados, e testes de calibração de acelerômetros serão realizadas.

A Figura 1 mostra um CubeSat impresso em PLA, que será instrumentado com os sensores: GY-521 (acelerômetro e giroscópio), o GY-273 (magnetômetro), GY-GPS6MV2 (receptor GPS), o BMP208 (barômetro), Módulos TX / RX – RF 433MHZ (transmissor e receptor RF). Este CubeSat é ponto central do giroscópio, que será localizado numa câmara cúbica de 150x150x150 mm para fazer os testes de posicionamento, acelerômetro e variação de campo magnético.



a) b)

Figura 1: Nanossatélite a) projeto em CAD (formato CubSat 1U) e b) projeto impresso. Fonte: Baseado no projeto - https://grabcad.com/library/stratasat-1.

2.1- Proposta 1

A Figura 2 mostra a vista isométrica e a Figura 3 as dimensões da primeira versão proposta do giroscópio. Para acoplamento da telemetria embarcada (sensores), utilizou-se o conceito de uma câmara de acrílico cúbica nas dimensões triaxiais de 150mm. Ela possui caixas de rolamento nas

partes superior e inferior para o encaixe do eixo principal, com fixação através de parafusos. Além da caixa de rolamento, fez-se a utilização de anéis de retenção nas suas faces externa e interna, fixados sobre o eixo com a finalidade de impedir que o mesmo deslize durante o estado não-estático do corpo.

Com relação à estrutura do giroscópio, fez-se a modelagem através de três geometrias de circunferência extrudadas em 15mm, com 1.5mm de parede, e variou-se apenas os diâmetros para cada uma delas (anéis impressos em material plástico do tipo ABS). Dois detalhes importantes a serem mencionados: o primeiro se refere ao espaçamento considerado em cada anel para que houvesse o acoplamento do motor e driver (visto que cada um deles deve ser rotacionado e controlado quando for necessário); já o segundo trata da limitação de impressão mencionada, o que trouxe a necessidade de seccionar o modelo em partes a serem impressas.

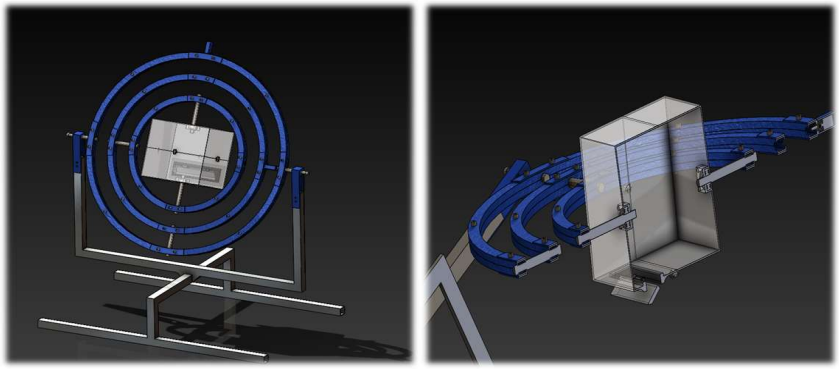


Figura 2: Vista Isométrica e de Seção.

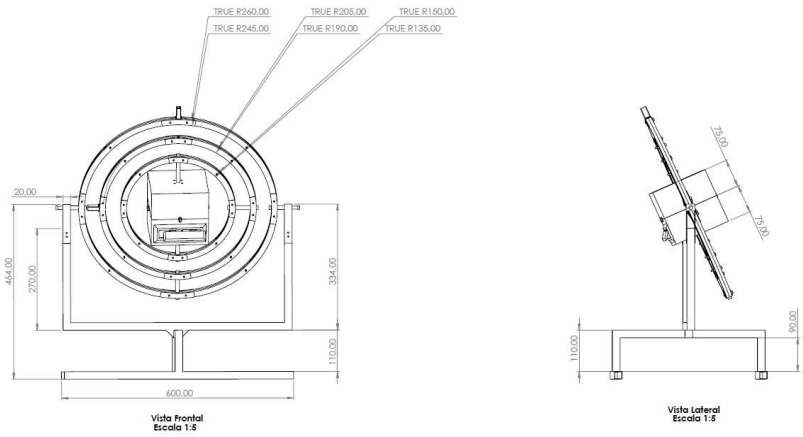


Figura 3: Dimensões Globais.

2.2- Proposta 2

A Figura 4 mostra a representação em três dimensões e a Figura 5 as dimensões globais da segunda versão proposta do giroscópio. Fez-se uma **c**aixa cúbica (150mmX150mmX150mm) e 1,5mm de espessura, impressa em material de acrílico, cuja função é acondicionar o mensurando do objeto de estudo. Na parte superior e inferior, existem furos passantes, na qual é fixado o primeiro eixo de giro por conjuntos porca- parafuso. Nota-se também a presença de dois furos roscados, para a inserção de parafusos que fixam o mensurando, de acordo com sua dimensão. Ainda, foi colocada uma face deslizante (152 mm X 146,4mm) e 1,45 mm de espessura, cuja função é impedir que o mensurando caia durante o movimento dos eixos.

Visando a praticidade no desenho e na montagem, utilizou-se a geometria quadrada para os três eixos de giro. Se trata de quadrados vazados impressos em ABS, com espessura de 15mm e 1,5mm de parede. No que tange às dimensões, o primeiro, segundo e terceiro tem, respectivamente: 180,5mmX180,5 mm; 270mm X 270mm; 365 mm X 365 mm.

Para o segundo e o terceiro eixo de giro fez-se peças que permitiam a junção das partes seccionadas (já que suas dimensões ultrapassam às da impressora), bem como que, simultaneamente, amparasse o potenciômetro, motor e driver. Na figura 4, as peças produzidas por manufatura aditiva são destacadas em branco.

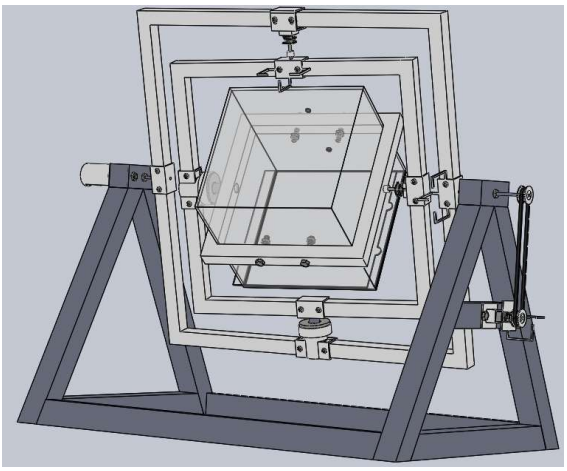


Figura 4. Representação 3D da proposta 2

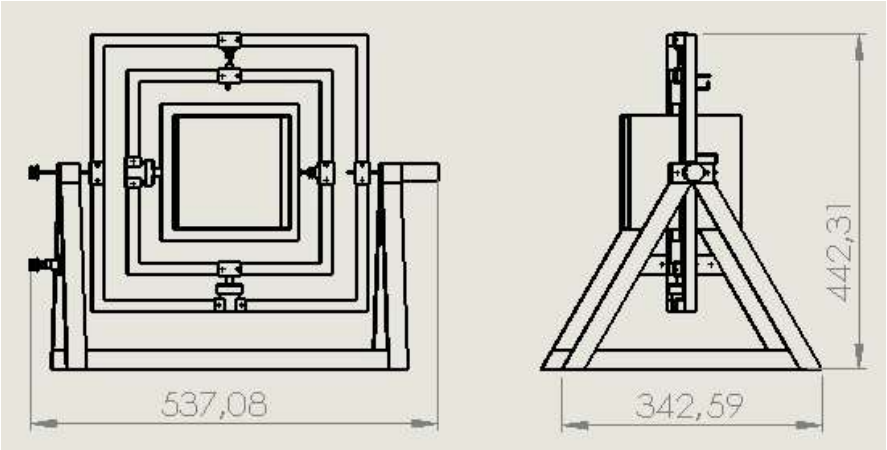


Figura 5. Dimensões globais da proposta 2

Na tabela 1 se apresentam os custos associados ao projeto.

Tabela 1. Custos associados aos projetos

Elemento	Quantidade	Valor unitário (R$)	Valor total (R$)
Filamento de PLA, 1 kg	2	120,00	240,00
Motores N20 DC	6	21,00	126,00
Potenciômetros 3590S-2-103L	6	11,00	66,00
Drivers L298N	6	17,00	102,00
Outros produtos	1	50,00	50,00
Total			584,00

2. Agradecimentos

Agradecemos à Unesp pelo fomento à pesquisa e possibilidade de elaboração do presente trabalho, em especial ao corpo docente aqui presente por ter disponibilizado o total apoio durante a evolução dele. Os autores agradecem à FAPESP (processos 2017/17697-5) em que a impressora *Ender 3D* foi comprada.

Referências

- AM-Platform. Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda. Disponível em: <http://www.rm-platform.com/linkdoc/AM SRA - February 2014.pdf>.
- ASTM International; ASTM F2792. F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. Rapid Manufacturing Association, p. 10–12, 2013.
- Apostoly, V., "Coriolis Vibratory Gyroscope - Theory and Design", Springer International Publishing, 2016.
- Awerjcewicz, J., Koruba, Z., "Theory of Gyroscopes", ResearchGate publication, 2012.
- Fraden, J., "Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs and Application", 4th Ed., Springer Science + Business Media, LLC, 2010.
- Helemberg, C. S. Jr., "Modelagem, Simulação e Controle de um Giroscópio", Escola Politécnica, UFRJ, 2014.
- Ishioka, I. S. K. “Desenvolvimento de um atuador magnético para o sistema de controle de atitude de nanosatélites”. Brasília, p. 104, 2017.
- Nussenzveig, H.M. “Curso de física básica” - 4º edição- São Paulo. Edgard Blucher,2002.
- Penã, L. G. “Dinâmica e Controle de Microsatélites em Órbitas Baixas”. 81 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia e tecnologia Espaciais com concentração em Mecânica Espacial e Controle, São José dos Campos, 2012.
- Usubamatov, R., "A Mathematical Model for Motions of Gyroscope Suspended from Flexible Cord", Cogent Engineering, 2016.

CBMAdi
CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUFATURA ADITIVA
ISBN: 978-65-86861-62-4

Proposta de aplicação da manufatura aditiva num projeto de giroscópio

[1]Lygia Graboschii Whittaker Franco, [1]João Cioffi, [1]Wilian Miranda dos Santos, [1]Denilson Paulo Souza dos Santos, [1–2]Julian Arnaldo Avila

1. UNESP - Universidade Estadual Paulista, Campus de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista - SP, Brasil
2. UAO - Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia

emails:
lygia.franco@unesp.br
joao.cioffi@unesp.br
wilian.santos@unesp.br
denilson.santos@unesp.br
julian.avila@unesp.br

Resumo:

O giroscópio é um instrumento utilizado para a correção de rotas na navegação aérea. Tendo em vista a presença de grupos de aeromodelismo, foguetemodelismo, bem como pesquisas de graduandos e pós graduandos nas áreas de aeroespacial, aeronáutica e telecomunicações da comunidade UNESP de São João da Boa Vista, fez-se necessário a elaboração de um projeto de um giroscópio de bancada próprio da universidade para atender esta demanda. A manufatura aditiva mostrou-se como uma ferramenta de baixo custo para a fabricação das peças e com facilidade de ajuste aos demais componentes como: motores, rolamentos, potenciômetros e eixos. No presente trabalho se apresentam duas propostas de confecção do giroscópio desenhados num software CAD, sendo que os dois projetos serão fabricados e testados nas próximas etapas.

Palavras-chave: manufatura aditiva; giroscópio; aeroespacial;

1. Introdução

Importantes avanços na área da comunicação, observação da Terra, espaço e estudos climáticos ocorreram graças ao progresso que ocorreu nas áreas aeroespacial, aeronáutica e tecnológica, o domínio de tecnologias oriundas desta miscelânea promoveu uma corrida tecnológica que utilizam várias áreas do conhecimento. O surgimento de nano satélites favoreceram a entrada de universidades nos processos de discussão e criação destas tecnologias pois o custo do processo foi barateado, sendo possível a impressão 3D de algumas estruturas e a aquisição de periféricos com um orçamento reduzido. Uma plataforma de testes de sensores [Fraden (2010)] e alguns atuadores podem ser criados para validação utilizando a manufatura aditiva.

Durante a criação de um satélite faz-se necessário uma bancada de teste (Simulador de controle de atitude) para fins de validação e análise dos requisitos embarcados no protótipo com a finalidade de garantir o funcionamento desejado. O controle de atitude de um nanossatélite pode ser simulado em uma mesa de 3 eixos, que é um tipo de giroscópio [Awerjcewicz et al, 2012], onde pode ser simulado controle de rodas de reação, apontamento, calibração de sensores: giroscópios, acelerômetros e velocidades de rotação [Ishioka, 2017; Peña, 2012; Helemberg, 2014]. O sistema de controle de atitude (Attitude Determination and Control System - ADCS) robusto de um satélite é de fundamental importância para a missão sendo utilizado para garantir a orientação do satélite em órbita, posicionamentos das antenas de comunicação e painéis solares.

A manufatura aditiva (MA) refere-se às tecnologias empregadas para construir objetos ou peças a partir de desenhos obtidos por modelagem computacional em 3D. Neste processo os materiais podem ser depositados no estado fundido (fusão a laser), na forma de fio ou de pó. Esta deposição de

material é feita camada por camada até a completa fabricação do componente requerido. Às vezes pode ser necessário que o componente seja usinado ou seja submetido à etapa de retífica para pequenas correções dimensionais. A ASTM (ASTM F2792, 2013) define a manufatura aditiva como "*Additive Manufacturing (AM), a process of joining materials to make objects form 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies such as traditional machining"*

É importante salientar que a principal vantagem desse processo é o componente se encontrar em um estado quase pronto para uso após ser construído, sem necessitar de investimentos adicionais de usinagem e tempo para remover grande volume de material, limitando o uso de usinagem às correções dimensionais e acabamentos superficiais, quando necessário.

Existem diferentes termos para descrever a manufatura aditiva, inicialmente foi chamada de "Prototipagem Rápida". Devido aos progressos recentes nesta área o termo "prototipagem" não descreve adequadamente o processo e os produtos obtidos. Depois, o termo "manufatura aditiva" foi introduzido porque representa melhor as características do processo. Com o intuito de ter uma interpretação mais realista da MA alguns pontos precisam ser destacados:

- Existem diferentes formas de desenhar e fabricar as peças, no entanto, devido ao processo de fabricação ser realizado camada a camada, existem geometrias em que a camada depositada irá ficar sem o suporte adequado, o que acarretaria falta de preenchimento ou geração de defeitos volumétricos.
- Esta tecnologia é ágil e versátil quando comparada com todo o processo produtivo de uma única peça por vias convencionais.
- Esta tecnologia consegue usar grande parte da matéria-prima durante a operação de fusão das camadas, mas sempre terá material que não será usado. Dependendo da influência suportada pelo material remanescente devido ao ciclo térmico, este poderá ser reutilizado ou descartado.
- Esta tecnologia não pretende substituir processos de fabricação bem estabelecidos técnica e economicamente, mas sim oferecer uma alternativa à produção de peças de maior complexidade de fabricação, uso de materiais caros, com geometrias personalizadas ou inexistentes no mercado.

Entre os mercados que já utilizam e outros começando a utilizar a MA, encontram-se as indústrias dos setores eletrônico, médico, aeroespacial e automobilístico. Foi estimado que em 2011 a venda de produtos e serviços de MA foi de US$ 1,7 bilhões e que para 2015 os crescimentos foram de até US$ 3,7 bilhões (AM-PLATFORM, 2014). Além disso, o crescimento da indústria de MA pode ser observado nas vendas de equipamentos. No setor de produção de componentes de polímeros existem aproximadamente 30.000 equipamentos instalados e no setor de MA de materiais metálicos, em torno de 500 equipamentos; e a expectativa é a de que esses números continuem crescendo. As pesquisas mostram que a MA vem sendo utilizada diretamente na produção de componentes (20 %) e em padrões para ferramentas de prototipagem (12,2 %) e fundição de ligas metálicas (12,1 %) (AM-PLATFORM, 2014).

1. Métodos

- **Uma breve descrição matemática do sistema:**

Inicialmente, partindo-se do princípio do equilíbrio de forças e momentos atuantes num corpo, optou-se pela modelagem de seções simétricas de cada componente estrutural do giroscópio [Apstoly, 2016; Usubamatov, 2016; Helemberg, 2014]. O equilíbrio estático referido pode ser representado como se segue:

- $\sum F_{i,j,k} = 0$ e $\sum M_{i,j,k} = 0$, em que i, j, k são as direções axiais representadas no espaço.

Outras condições de equilíbrio podem ser descritas na forma:

- $\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum F_{i,ext} = F_{res}$: Equilíbrio em translação
- $\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum \tau_{i,ext} = 0$: Equilíbrio dos torques

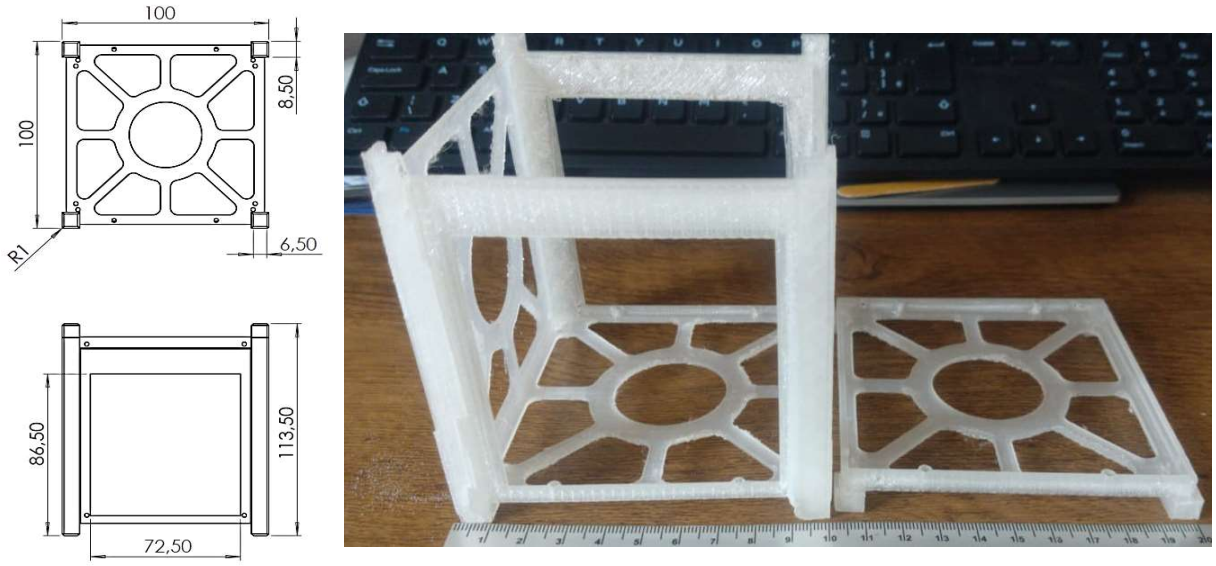
Desta forma, pôde-se criar modelos estaticamente e dinamicamente estáveis, visto que, atendidos aos critérios estabelecidos, o giroscópio não apresentaria tendências em condições de repouso e permaneceria em equilíbrio rotacional. Em suma, estando em rotação ou simplesmente estagnado, o modelo apresenta-se totalmente em equilíbrio - podendo, assim, haver o acionamento de um controle específico em qualquer uma das condições. Este controle agiria de forma a atuar na rotação da câmara em três graus de liberdade.

- **As propostas:**

Neste trabalho duas propostas de giroscópios foram elaboradas, em que a manufatura aditiva de polímero foi selecionada como o método principal de fabricação devido a versatilidade e facilidade de testar diferentes conceitos. Nos itens 2.1 e 2.2, evidencia-se as peças que serão fabricadas usando a manufatura aditiva, utilizando uma impressora 3D Ender 3D Pro. Cada projeto foi desenvolvido por um aluno de graduação de engenharia aeronáutica, em que os professores participaram como guias acadêmicos.

Foi considerado o fato de que a impressora adquirida pela universidade confecciona peças de até 200 mm X 200 mm X 200mm. Em cada projeto serão colocados 3 motores N20 DC, 3 potenciômetros 3590S-2-103L e 3 drivers L298N. Utilizaram-se também eixos de aço e rolamentos, que assim como o suporte de apoio, não foram confeccionados por manufatura aditiva. Na seguinte etapa, as partes serão fabricadas e os giroscópios serão montados, e testes de calibração de acelerômetros serão realizadas.

A Figura 1 mostra um CubeSat impresso em PLA, que será instrumentado com os sensores: GY-521 (acelerômetro e giroscópio), o GY-273 (magnetômetro), GY-GPS6MV2 (receptor GPS), o BMP208 (barômetro), Módulos TX / RX – RF 433MHZ (transmissor e receptor RF). Este CubeSat é ponto central do giroscópio, que será localizado numa câmara cúbica de 150x150x150 mm para fazer os testes de posicionamento, acelerômetro e variação de campo magnético.



a) b)

Figura 1: Nanossatélite a) projeto em CAD (formato CubSat 1U) e b) projeto impresso. Fonte: Baseado no projeto - https://grabcad.com/library/stratasat-1.

2.1- Proposta 1

A Figura 2 mostra a vista isométrica e a Figura 3 as dimensões da primeira versão proposta do giroscópio. Para acoplamento da telemetria embarcada (sensores), utilizou-se o conceito de uma câmara de acrílico cúbica nas dimensões triaxiais de 150mm. Ela possui caixas de rolamento nas

partes superior e inferior para o encaixe do eixo principal, com fixação através de parafusos. Além da caixa de rolamento, fez-se a utilização de anéis de retenção nas suas faces externa e interna, fixados sobre o eixo com a finalidade de impedir que o mesmo deslize durante o estado não-estático do corpo.

Com relação à estrutura do giroscópio, fez-se a modelagem através de três geometrias de circunferência extrudadas em 15mm, com 1.5mm de parede, e variou-se apenas os diâmetros para cada uma delas (anéis impressos em material plástico do tipo ABS). Dois detalhes importantes a serem mencionados: o primeiro se refere ao espaçamento considerado em cada anel para que houvesse o acoplamento do motor e driver (visto que cada um deles deve ser rotacionado e controlado quando for necessário); já o segundo trata da limitação de impressão mencionada, o que trouxe a necessidade de seccionar o modelo em partes a serem impressas.

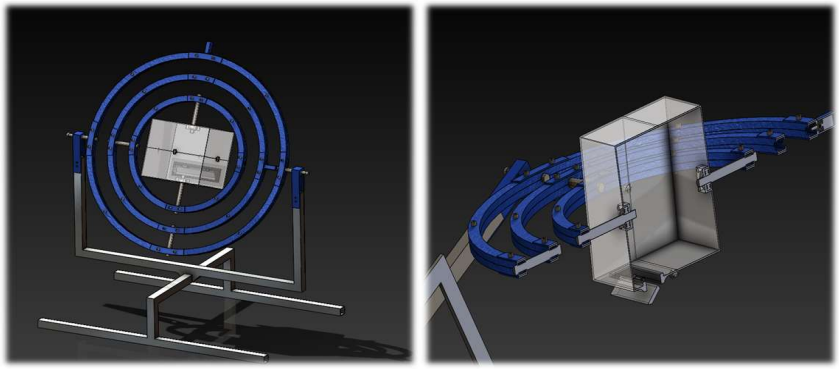


Figura 2: Vista Isométrica e de Seção.

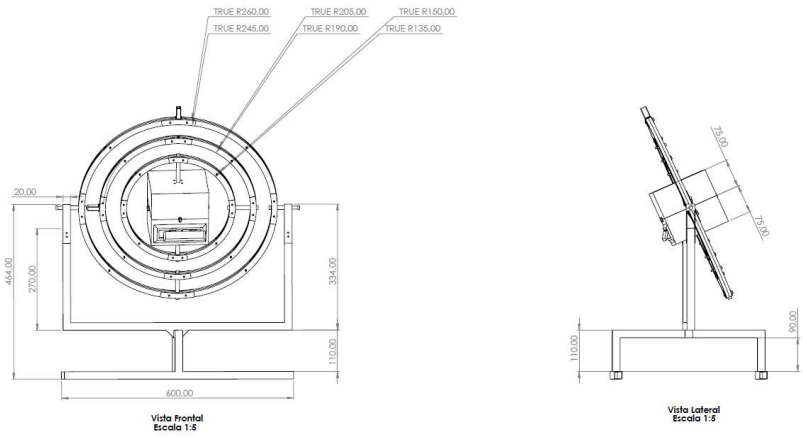


Figura 3: Dimensões Globais.

2.2- Proposta 2

A Figura 4 mostra a representação em três dimensões e a Figura 5 as dimensões globais da segunda versão proposta do giroscópio. Fez-se uma **c**aixa cúbica (150mmX150mmX150mm) e 1,5mm de espessura, impressa em material de acrílico, cuja função é acondicionar o mensurando do objeto de estudo. Na parte superior e inferior, existem furos passantes, na qual é fixado o primeiro eixo de giro por conjuntos porca- parafuso. Nota-se também a presença de dois furos roscados, para a inserção de parafusos que fixam o mensurando, de acordo com sua dimensão. Ainda, foi colocada uma face deslizante (152 mm X 146,4mm) e 1,45 mm de espessura, cuja função é impedir que o mensurando caia durante o movimento dos eixos.

Visando a praticidade no desenho e na montagem, utilizou-se a geometria quadrada para os três eixos de giro. Se trata de quadrados vazados impressos em ABS, com espessura de 15mm e 1,5mm de parede. No que tange às dimensões, o primeiro, segundo e terceiro tem, respectivamente: 180,5mmX180,5 mm; 270mm X 270mm; 365 mm X 365 mm.

Para o segundo e o terceiro eixo de giro fez-se peças que permitiam a junção das partes seccionadas (já que suas dimensões ultrapassam às da impressora), bem como que, simultaneamente, amparasse o potenciômetro, motor e driver. Na figura 4, as peças produzidas por manufatura aditiva são destacadas em branco.

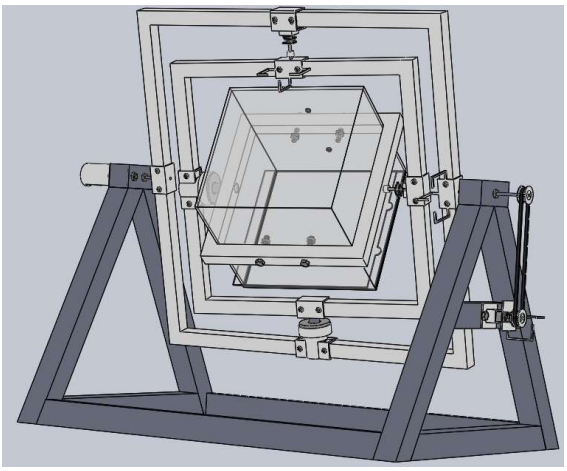


Figura 4. Representação 3D da proposta 2

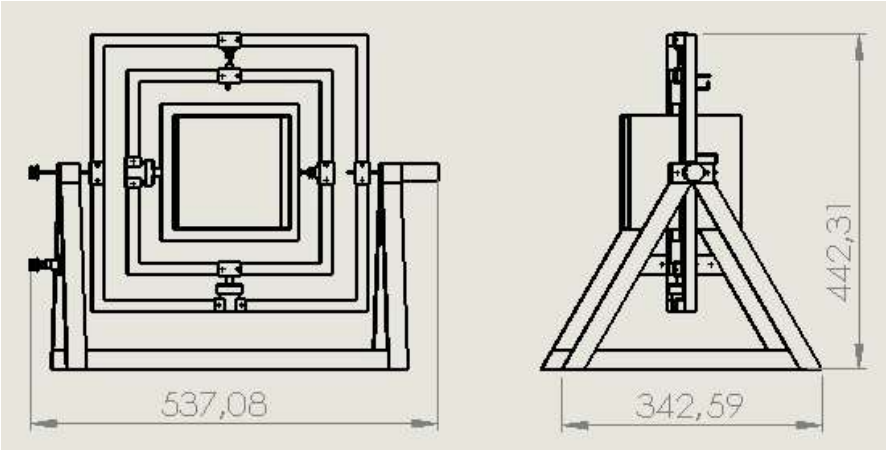


Figura 5. Dimensões globais da proposta 2

Na tabela 1 se apresentam os custos associados ao projeto.

Tabela 1. Custos associados aos projetos

Elemento	Quantidade	Valor unitário (R$)	Valor total (R$)
Filamento de PLA, 1 kg	2	120,00	240,00
Motores N20 DC	6	21,00	126,00
Potenciômetros 3590S-2-103L	6	11,00	66,00
Drivers L298N	6	17,00	102,00
Outros produtos	1	50,00	50,00
Total			584,00

2. Agradecimentos

Agradecemos à Unesp pelo fomento à pesquisa e possibilidade de elaboração do presente trabalho, em especial ao corpo docente aqui presente por ter disponibilizado o total apoio durante a evolução dele. Os autores agradecem à FAPESP (processos 2017/17697-5) em que a impressora *Ender 3D* foi comprada.

Referências

- AM-Platform. Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda. Disponível em: <http://www.rm-platform.com/linkdoc/AM SRA - February 2014.pdf>.
- ASTM International; ASTM F2792. F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. Rapid Manufacturing Association, p. 10–12, 2013.
- Apostoly, V., "Coriolis Vibratory Gyroscope - Theory and Design", Springer International Publishing, 2016.
- Awerjcewicz, J., Koruba, Z., "Theory of Gyroscopes", ResearchGate publication, 2012.
- Fraden, J., "Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs and Application", 4th Ed., Springer Science + Business Media, LLC, 2010.
- Helemberg, C. S. Jr., "Modelagem, Simulação e Controle de um Giroscópio", Escola Politécnica, UFRJ, 2014.
- Ishioka, I. S. K. “Desenvolvimento de um atuador magnético para o sistema de controle de atitude de nanosatélites”. Brasília, p. 104, 2017.
- Nussenzveig, H.M. “Curso de física básica” - 4º edição- São Paulo. Edgard Blucher,2002.
- Penã, L. G. “Dinâmica e Controle de Microsatélites em Órbitas Baixas”. 81 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia e tecnologia Espaciais com concentração em Mecânica Espacial e Controle, São José dos Campos, 2012.
- Usubamatov, R., "A Mathematical Model for Motions of Gyroscope Suspended from Flexible Cord", Cogent Engineering, 2016.

CBMAdi
CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUFATURA ADITIVA
ISBN: 978-65-86861-62-4

Proposta de aplicação da manufatura aditiva num projeto de giroscópio

[1]Lygia Graboschii Whittaker Franco, [1]João Cioffi, [1]Wilian Miranda dos Santos, [1]Denilson Paulo Souza dos Santos, [1–2]Julian Arnaldo Avila

1. UNESP - Universidade Estadual Paulista, Campus de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista - SP, Brasil
2. UAO - Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia

emails:
lygia.franco@unesp.br
joao.cioffi@unesp.br
wilian.santos@unesp.br
denilson.santos@unesp.br
julian.avila@unesp.br

Resumo:

O giroscópio é um instrumento utilizado para a correção de rotas na navegação aérea. Tendo em vista a presença de grupos de aeromodelismo, foguetemodelismo, bem como pesquisas de graduandos e pós graduandos nas áreas de aeroespacial, aeronáutica e telecomunicações da comunidade UNESP de São João da Boa Vista, fez-se necessário a elaboração de um projeto de um giroscópio de bancada próprio da universidade para atender esta demanda. A manufatura aditiva mostrou-se como uma ferramenta de baixo custo para a fabricação das peças e com facilidade de ajuste aos demais componentes como: motores, rolamentos, potenciômetros e eixos. No presente trabalho se apresentam duas propostas de confecção do giroscópio desenhados num software CAD, sendo que os dois projetos serão fabricados e testados nas próximas etapas.

Palavras-chave: manufatura aditiva; giroscópio; aeroespacial;

1. Introdução

Importantes avanços na área da comunicação, observação da Terra, espaço e estudos climáticos ocorreram graças ao progresso que ocorreu nas áreas aeroespacial, aeronáutica e tecnológica, o domínio de tecnologias oriundas desta miscelânea promoveu uma corrida tecnológica que utilizam várias áreas do conhecimento. O surgimento de nano satélites favoreceram a entrada de universidades nos processos de discussão e criação destas tecnologias pois o custo do processo foi barateado, sendo possível a impressão 3D de algumas estruturas e a aquisição de periféricos com um orçamento reduzido. Uma plataforma de testes de sensores [Fraden (2010)] e alguns atuadores podem ser criados para validação utilizando a manufatura aditiva.

Durante a criação de um satélite faz-se necessário uma bancada de teste (Simulador de controle de atitude) para fins de validação e análise dos requisitos embarcados no protótipo com a finalidade de garantir o funcionamento desejado. O controle de atitude de um nanossatélite pode ser simulado em uma mesa de 3 eixos, que é um tipo de giroscópio [Awerjcewicz et al, 2012], onde pode ser simulado controle de rodas de reação, apontamento, calibração de sensores: giroscópios, acelerômetros e velocidades de rotação [Ishioka, 2017; Peña, 2012; Helemberg, 2014]. O sistema de controle de atitude (Attitude Determination and Control System - ADCS) robusto de um satélite é de fundamental importância para a missão sendo utilizado para garantir a orientação do satélite em órbita, posicionamentos das antenas de comunicação e painéis solares.

A manufatura aditiva (MA) refere-se às tecnologias empregadas para construir objetos ou peças a partir de desenhos obtidos por modelagem computacional em 3D. Neste processo os materiais podem ser depositados no estado fundido (fusão a laser), na forma de fio ou de pó. Esta deposição de

material é feita camada por camada até a completa fabricação do componente requerido. Às vezes pode ser necessário que o componente seja usinado ou seja submetido à etapa de retífica para pequenas correções dimensionais. A ASTM (ASTM F2792, 2013) define a manufatura aditiva como "*Additive Manufacturing (AM), a process of joining materials to make objects form 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies such as traditional machining"*

É importante salientar que a principal vantagem desse processo é o componente se encontrar em um estado quase pronto para uso após ser construído, sem necessitar de investimentos adicionais de usinagem e tempo para remover grande volume de material, limitando o uso de usinagem às correções dimensionais e acabamentos superficiais, quando necessário.

Existem diferentes termos para descrever a manufatura aditiva, inicialmente foi chamada de "Prototipagem Rápida". Devido aos progressos recentes nesta área o termo "prototipagem" não descreve adequadamente o processo e os produtos obtidos. Depois, o termo "manufatura aditiva" foi introduzido porque representa melhor as características do processo. Com o intuito de ter uma interpretação mais realista da MA alguns pontos precisam ser destacados:

- Existem diferentes formas de desenhar e fabricar as peças, no entanto, devido ao processo de fabricação ser realizado camada a camada, existem geometrias em que a camada depositada irá ficar sem o suporte adequado, o que acarretaria falta de preenchimento ou geração de defeitos volumétricos.
- Esta tecnologia é ágil e versátil quando comparada com todo o processo produtivo de uma única peça por vias convencionais.
- Esta tecnologia consegue usar grande parte da matéria-prima durante a operação de fusão das camadas, mas sempre terá material que não será usado. Dependendo da influência suportada pelo material remanescente devido ao ciclo térmico, este poderá ser reutilizado ou descartado.
- Esta tecnologia não pretende substituir processos de fabricação bem estabelecidos técnica e economicamente, mas sim oferecer uma alternativa à produção de peças de maior complexidade de fabricação, uso de materiais caros, com geometrias personalizadas ou inexistentes no mercado.

Entre os mercados que já utilizam e outros começando a utilizar a MA, encontram-se as indústrias dos setores eletrônico, médico, aeroespacial e automobilístico. Foi estimado que em 2011 a venda de produtos e serviços de MA foi de US$ 1,7 bilhões e que para 2015 os crescimentos foram de até US$ 3,7 bilhões (AM-PLATFORM, 2014). Além disso, o crescimento da indústria de MA pode ser observado nas vendas de equipamentos. No setor de produção de componentes de polímeros existem aproximadamente 30.000 equipamentos instalados e no setor de MA de materiais metálicos, em torno de 500 equipamentos; e a expectativa é a de que esses números continuem crescendo. As pesquisas mostram que a MA vem sendo utilizada diretamente na produção de componentes (20 %) e em padrões para ferramentas de prototipagem (12,2 %) e fundição de ligas metálicas (12,1 %) (AM-PLATFORM, 2014).

1. Métodos

- **Uma breve descrição matemática do sistema:**

Inicialmente, partindo-se do princípio do equilíbrio de forças e momentos atuantes num corpo, optou-se pela modelagem de seções simétricas de cada componente estrutural do giroscópio [Apstoly, 2016; Usubamatov, 2016; Helemberg, 2014]. O equilíbrio estático referido pode ser representado como se segue:

- $\sum F_{i,j,k} = 0$ e $\sum M_{i,j,k} = 0$, em que i, j, k são as direções axiais representadas no espaço.

Outras condições de equilíbrio podem ser descritas na forma:

- $\frac{d\vec{P}}{dt} = \sum F_{i,ext} = F_{res}$: Equilíbrio em translação
- $\frac{d\vec{L}}{dt} = \sum \tau_{i,ext} = 0$: Equilíbrio dos torques

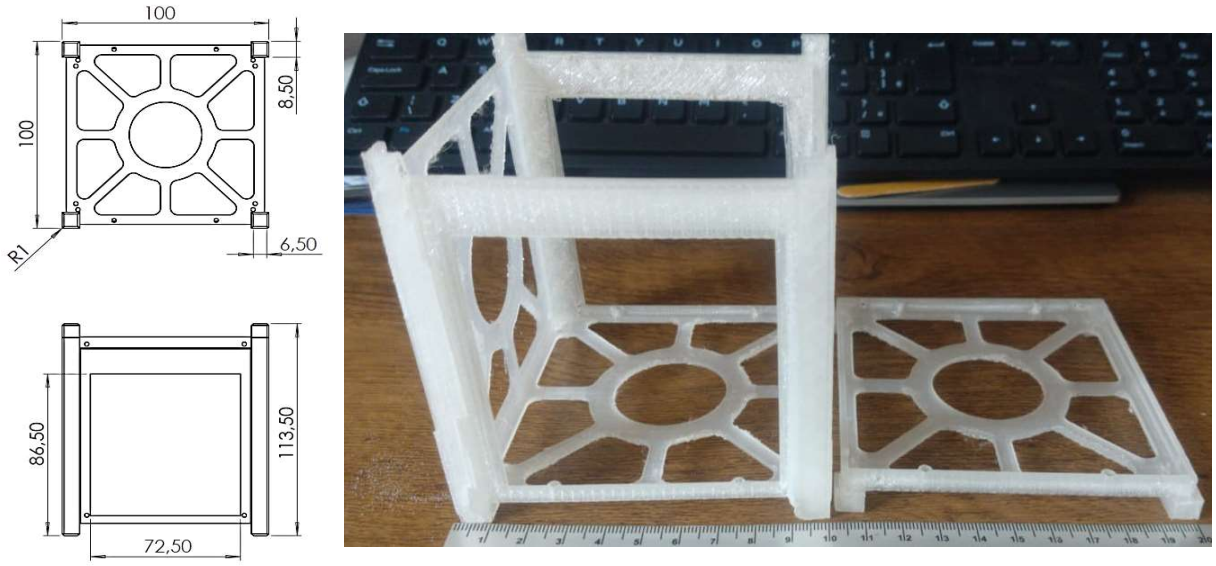
Desta forma, pôde-se criar modelos estaticamente e dinamicamente estáveis, visto que, atendidos aos critérios estabelecidos, o giroscópio não apresentaria tendências em condições de repouso e permaneceria em equilíbrio rotacional. Em suma, estando em rotação ou simplesmente estagnado, o modelo apresenta-se totalmente em equilíbrio - podendo, assim, haver o acionamento de um controle específico em qualquer uma das condições. Este controle agiria de forma a atuar na rotação da câmara em três graus de liberdade.

- **As propostas:**

Neste trabalho duas propostas de giroscópios foram elaboradas, em que a manufatura aditiva de polímero foi selecionada como o método principal de fabricação devido a versatilidade e facilidade de testar diferentes conceitos. Nos itens 2.1 e 2.2, evidencia-se as peças que serão fabricadas usando a manufatura aditiva, utilizando uma impressora 3D Ender 3D Pro. Cada projeto foi desenvolvido por um aluno de graduação de engenharia aeronáutica, em que os professores participaram como guias acadêmicos.

Foi considerado o fato de que a impressora adquirida pela universidade confecciona peças de até 200 mm X 200 mm X 200mm. Em cada projeto serão colocados 3 motores N20 DC, 3 potenciômetros 3590S-2-103L e 3 drivers L298N. Utilizaram-se também eixos de aço e rolamentos, que assim como o suporte de apoio, não foram confeccionados por manufatura aditiva. Na seguinte etapa, as partes serão fabricadas e os giroscópios serão montados, e testes de calibração de acelerômetros serão realizadas.

A Figura 1 mostra um CubeSat impresso em PLA, que será instrumentado com os sensores: GY-521 (acelerômetro e giroscópio), o GY-273 (magnetômetro), GY-GPS6MV2 (receptor GPS), o BMP208 (barômetro), Módulos TX / RX – RF 433MHZ (transmissor e receptor RF). Este CubeSat é ponto central do giroscópio, que será localizado numa câmara cúbica de 150x150x150 mm para fazer os testes de posicionamento, acelerômetro e variação de campo magnético.



a) b)

Figura 1: Nanossatélite a) projeto em CAD (formato CubSat 1U) e b) projeto impresso. Fonte: Baseado no projeto - https://grabcad.com/library/stratasat-1.

2.1- Proposta 1

A Figura 2 mostra a vista isométrica e a Figura 3 as dimensões da primeira versão proposta do giroscópio. Para acoplamento da telemetria embarcada (sensores), utilizou-se o conceito de uma câmara de acrílico cúbica nas dimensões triaxiais de 150mm. Ela possui caixas de rolamento nas

partes superior e inferior para o encaixe do eixo principal, com fixação através de parafusos. Além da caixa de rolamento, fez-se a utilização de anéis de retenção nas suas faces externa e interna, fixados sobre o eixo com a finalidade de impedir que o mesmo deslize durante o estado não-estático do corpo.

Com relação à estrutura do giroscópio, fez-se a modelagem através de três geometrias de circunferência extrudadas em 15mm, com 1.5mm de parede, e variou-se apenas os diâmetros para cada uma delas (anéis impressos em material plástico do tipo ABS). Dois detalhes importantes a serem mencionados: o primeiro se refere ao espaçamento considerado em cada anel para que houvesse o acoplamento do motor e driver (visto que cada um deles deve ser rotacionado e controlado quando for necessário); já o segundo trata da limitação de impressão mencionada, o que trouxe a necessidade de seccionar o modelo em partes a serem impressas.

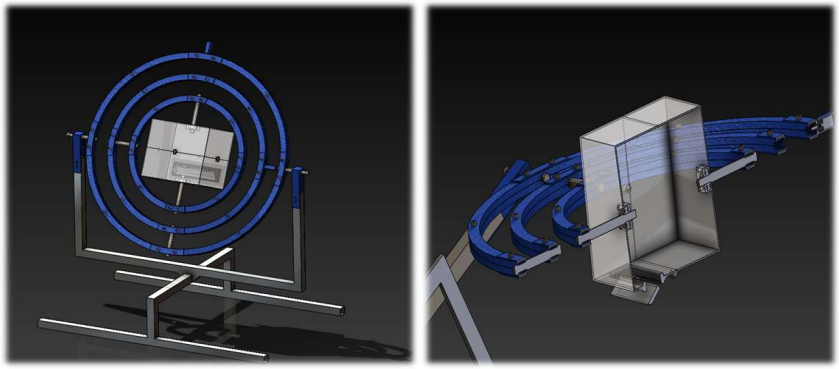


Figura 2: Vista Isométrica e de Seção.

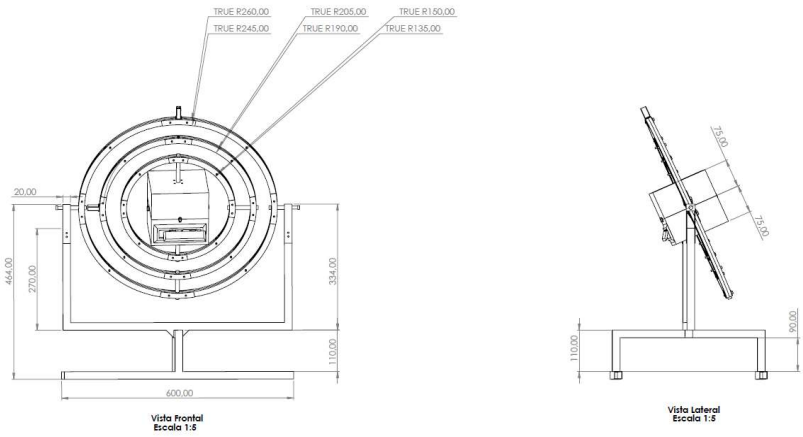


Figura 3: Dimensões Globais.

2.2- Proposta 2

A Figura 4 mostra a representação em três dimensões e a Figura 5 as dimensões globais da segunda versão proposta do giroscópio. Fez-se uma **c**aixa cúbica (150mmX150mmX150mm) e 1,5mm de espessura, impressa em material de acrílico, cuja função é acondicionar o mensurando do objeto de estudo. Na parte superior e inferior, existem furos passantes, na qual é fixado o primeiro eixo de giro por conjuntos porca- parafuso. Nota-se também a presença de dois furos roscados, para a inserção de parafusos que fixam o mensurando, de acordo com sua dimensão. Ainda, foi colocada uma face deslizante (152 mm X 146,4mm) e 1,45 mm de espessura, cuja função é impedir que o mensurando caia durante o movimento dos eixos.

Visando a praticidade no desenho e na montagem, utilizou-se a geometria quadrada para os três eixos de giro. Se trata de quadrados vazados impressos em ABS, com espessura de 15mm e 1,5mm de parede. No que tange às dimensões, o primeiro, segundo e terceiro tem, respectivamente: 180,5mmX180,5 mm; 270mm X 270mm; 365 mm X 365 mm.

Para o segundo e o terceiro eixo de giro fez-se peças que permitiam a junção das partes seccionadas (já que suas dimensões ultrapassam às da impressora), bem como que, simultaneamente, amparasse o potenciômetro, motor e driver. Na figura 4, as peças produzidas por manufatura aditiva são destacadas em branco.

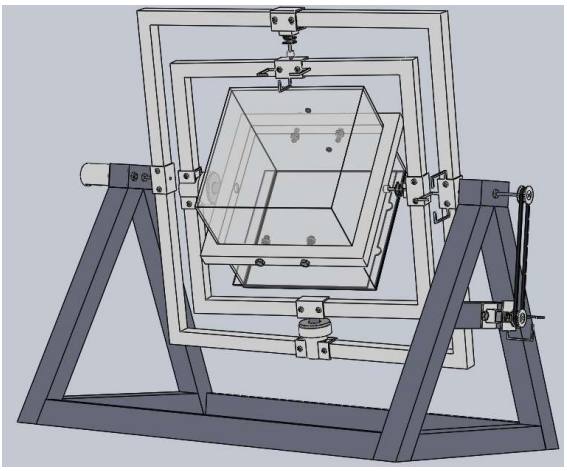


Figura 4. Representação 3D da proposta 2

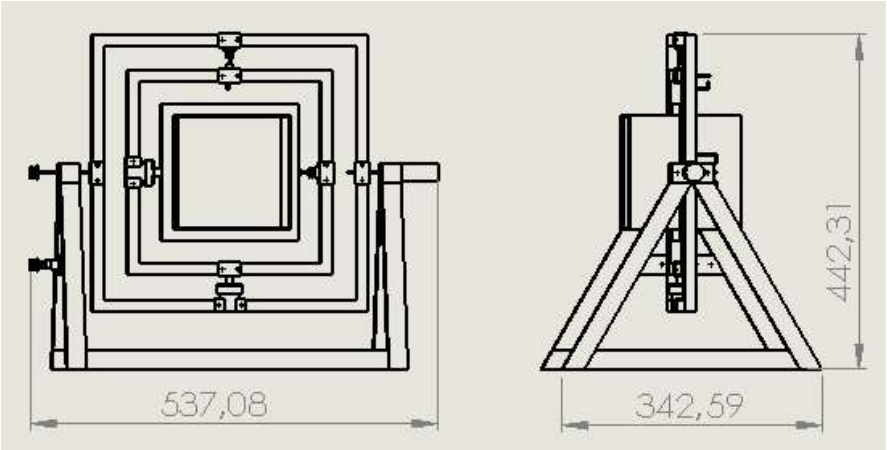


Figura 5. Dimensões globais da proposta 2

Na tabela 1 se apresentam os custos associados ao projeto.

Tabela 1. Custos associados aos projetos

Elemento	Quantidade	Valor unitário (R$)	Valor total (R$)
Filamento de PLA, 1 kg	2	120,00	240,00
Motores N20 DC	6	21,00	126,00
Potenciômetros 3590S-2-103L	6	11,00	66,00
Drivers L298N	6	17,00	102,00
Outros produtos	1	50,00	50,00
Total			584,00

2. Agradecimentos

Agradecemos à Unesp pelo fomento à pesquisa e possibilidade de elaboração do presente trabalho, em especial ao corpo docente aqui presente por ter disponibilizado o total apoio durante a evolução dele. Os autores agradecem à FAPESP (processos 2017/17697-5) em que a impressora *Ender 3D* foi comprada.

Referências

- AM-Platform. Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda. Disponível em: <http://www.rm-platform.com/linkdoc/AM SRA - February 2014.pdf>.
- ASTM International; ASTM F2792. F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. Rapid Manufacturing Association, p. 10–12, 2013.
- Apostoly, V., "Coriolis Vibratory Gyroscope - Theory and Design", Springer International Publishing, 2016.
- Awerjcewicz, J., Koruba, Z., "Theory of Gyroscopes", ResearchGate publication, 2012.
- Fraden, J., "Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs and Application", 4th Ed., Springer Science + Business Media, LLC, 2010.
- Helemberg, C. S. Jr., "Modelagem, Simulação e Controle de um Giroscópio", Escola Politécnica, UFRJ, 2014.
- Ishioka, I. S. K. “Desenvolvimento de um atuador magnético para o sistema de controle de atitude de nanosatélites”. Brasília, p. 104, 2017.
- Nussenzveig, H.M. “Curso de física básica” - 4º edição- São Paulo. Edgard Blucher,2002.
- Penã, L. G. “Dinâmica e Controle de Microsatélites em Órbitas Baixas”. 81 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia e tecnologia Espaciais com concentração em Mecânica Espacial e Controle, São José dos Campos, 2012.
- Usubamatov, R., "A Mathematical Model for Motions of Gyroscope Suspended from Flexible Cord", Cogent Engineering, 2016.