



Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas  
CECAU - Colegiado do Curso de  
Engenharia de Controle e Automação



Vitor Augusto Otoni Figueiró

## **Atitude e Controle de Satélites Artificiais**

Monografia de Graduação

Ouro Preto, 2024

Vitor Augusto Otoni Figueiró

## **Atitude e Controle de Satélites Artificias**

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro(a) de Controle e Automação.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof. João Carlos Vilela Castro.

Coorientador: -

Ouro Preto

2024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E  
AUTOMACAO



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Santos Dumont**

**Como construir um avião?**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação

Aprovada em 26 de fevereiro de 2023

**VERSÃO DE DEMONSTRAÇÃO**

Membros da banca

[Doutor] - Carlos Chagas - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Doutora] - Nise da Silveira - Orientador (Universidade Federal da Bahia)

[Doutor] - Leopoldo Nachbin - (Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada)

[Doutora] - Ruth Sonntag Nussenzweig - (Universidade de São Paulo)

Nise da Silveira, coorientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/07/2023.



Documento assinado eletronicamente por Nise da Silveira, **PROFESSORA DE MAGISTÉRIO SUPERIOR**, em 04/07/2023, às 10:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto no 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site  
[http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0),  
informando o código verificador 26021982 e o código CRC X3DF4F4

# Agradecimentos

Os agradecimentos [são opcionais, e] vem aqui...

*Júpiter leva 4332 dias para fazer  
uma revolução.*

---

— Oliver Lodge.

# Resumo

O resumo deve ressaltar o objetivo, o método, os resultados e as conclusões do documento. A ordem e a extensão destes itens dependem do tipo de resumo (informativo ou indicativo) e do tratamento que cada item recebe no documento original. O resumo deve ser precedido da referência do documento, com exceção do resumo inserido no próprio documento. (...) As palavras-chave devem figurar logo abaixo do resumo, antecidas da expressão Palavras-chave:, separadas entre si por ponto e finalizadas também por ponto.

**Palavras-chaves:** latex. abntex. editoração de texto.

# Abstract

This is the english abstract.

**Key-words:** latex. abntex. text editoration.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Sputnik 1 antes do lançamento em outubro de 1957 . . . . .	12
Figura 2 – Cubo 3D gerado com o código python para o teste dos sensores . . . .	14
Figura 3 – Cubo 3D gerado com o código python para o teste dos sensores . . . .	14
Figura 4 – AltIMU10 - v3 . . . . .	18



# Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de endereçamento de cada Barramento I <sup>2</sup> C . . . . .	17
--	----

# Lista de abreviaturas e siglas

CI	Circuito Integrado
IMU	Unidade de Medição Inercial

# Lista de símbolos

$\Gamma$	Letra grega Gama
$\Lambda$	Lambda
$\zeta$	Letra grega minúscula zeta
$\in$	Pertence

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	12
1.1	Justificativas e Relevância . . . . .	13
1.2	Metodologia . . . . .	13
1.3	Objetivos . . . . .	15
1.4	Organização e estrutura . . . . .	15
2	ATITUDE DE SATÉLITES . . . . .	16
2.1	Ângulos de Euler . . . . .	16
2.2	Quatérnions . . . . .	16
2.3	QUEST - QUatérnion ESTimation . . . . .	16
3	DESENVOLVIMENTO . . . . .	17
3.1	Sistema de Aquisição de Dados . . . . .	17
3.2	Giroscópio . . . . .	18
3.3	Magnetômetro e Acelerômetro . . . . .	19
4	RESULTADOS . . . . .	20
4.1	Dados, dados, dados . . . . .	20
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .	21
	Referências . . . . .	22
	APÊNDICE A – LIBERO JUSTO . . . . .	23
	ANEXO A – MORBI ULTRICES RUTRUM LOREM. . . . .	24
	ANEXO B – LOREM MORBI ULTRICES RUTRUM. . . . .	25

# 1 Introdução

Os satélites artificiais desempenham um papel fundamental em interações com a Terra, corpos celestes ou outros artefatos espaciais, realizando tarefas essenciais por meio de instrumentos e dispositivos que precisam ser posicionados e orientados corretamente para garantir o desempenho ideal ([SHUSTER, 1993](#)) *apud* ([FERREIRA et al., 2008](#)). Um exemplo notável desse tipo de tecnologia é o Sputnik 1, o primeiro satélite lançado ao espaço, que marcou o início da Era Espacial após o fim da Segunda Guerra Mundial (ver Figura 1).



Figura 1 – Sputnik 1 antes do lançamento em outubro de 1957

A determinação de atitude, que corresponde à orientação de um veículo espacial em relação a um referencial inercial ou a um objeto de interesse, como a Terra, é um processo essencial para o controle dessas missões. Este processo, normalmente realizado por sensores de alta precisão e algoritmos sofisticados de processamento de dados, garante que o satélite se mantenha na posição correta. A precisão da determinação de atitude depende da combinação dos métodos de processamento aplicados e do hardware utilizado. Em resumo, determinar a atitude de um satélite significa calcular sua matriz de atitude em relação a um referencial previamente estabelecido ([WERTZ, 2012](#)).

A atitude de um satélite, ou seja, sua orientação no espaço, é crucial para o sucesso de missões espaciais. Como destacado por ([YANG, 2012](#)), "A determinação e controle da atitude de um satélite é uma parte importante para que o satélite alcance sua missão projetada", sendo este controle um fator determinante no desempenho de satélites já lançados. Yang também ressalta que "A determinação da atitude é muito importante por duas razões: primeiro, os engenheiros de controle precisam verificar se a orientação está correta; segundo, se não estiver, o erro é comparado com a atitude desejada e utilizado para ajustar os atuadores, corrigindo a orientação do satélite".

Com a crescente demanda por satélites dedicados a comunicação, monitoramento

ambiental, sensoriamento remoto e pesquisa científica, o controle preciso da atitude tornou-se indispensável. O sucesso dessas missões depende da capacidade de manter a eficiência e a precisão operacionais, especialmente em um cenário de crescente complexidade tecnológica e competitividade no setor aeroespacial.

Os dados coletados pelos sensores de atitude, normalmente representados como componentes vetoriais, podem ser apresentados em diversas formas, como quatérnions, ângulos de Euler ou matrizes de rotação. Os quatérnions, por exemplo, oferecem uma forma concisa e eficiente de descrever a rotação, permitindo uma interpretação geométrica clara do eixo e do ângulo de rotação (JIA, 2013), enquanto os modelos de ângulos de Euler têm se mostrado muito eficientes porque os modelos linearizados baseados nesses ângulos são controláveis, e todos os métodos padrão de projeto de sistemas de controle lineares são diretamente aplicáveis (YANG, 2012). As matrizes de rotação, por sua vez, é explicada como uma ferramenta usada para descrever a rotação de um objeto no espaço tridimensional em relação a um sistema de coordenadas inercial. Essa matriz é derivada a partir de ângulos de Euler e é usada para transformar coordenadas de um sistema de referência para outro. A matriz resultante é aplicada em diversas operações que envolvem a orientação espacial de satélites, como a determinação da atitude (SILVA, 2016)

## 1.1 Justificativas e Relevância

a escrever

## 1.2 Metodologia

Foi realizada no período de 4 meses, uma revisão bibliográfica, que teve como objetivo, estudar sistemas fotovoltaicos para aplicações aeroespaciais, topologias de conversores eletrônicos de potência, estratégias de controle e gerenciamento de energia, baterias e sistemas de acumulação de energia, medições em sistemas aeroespaciais e algoritmos para estimação de atitude, afim de definir um projeto preliminar para a unidade de processamento, condicionamento e regulação de energia fotovoltaica com sistema de estimação de atitude integrado e desenvolver modelos matemáticos.

No início do projeto, projetamos o desenvolvimento de uma plataforma para determinar a atitude do satélite, mas antes disso, se fez necessário definirmos quais seriam os objetivos a serem alcançados com a utilização de tal plataforma. Alguns desses objetivos seguem a ideia trabalhada em (TAVARES, 2017) "Fazer a leitura da orientação atual apresentada pelo satélite, processar os algoritmos necessários, gerar a matriz de atitude do objeto que o relaciona com uma referência conhecida".

Antes de criarmos uma estrutura física, para o teste dos sensores e do funcionamento

dos algoritmos implementados, criou-se um código em Python que através da leitura dos sensores e do processamento do algoritmo de determinação da atitude, gera como resposta um objeto 3D, que se orienta no espaço através dos valores lidos pelo sensores, conforme visto nas figuras 2 e 3.

Os algoritmos de medição, estimação e controle foram implementados em uma plataforma programável baseada em um microcontrolador, capaz de realizar a aquisição e o processamento de sinais analógicos e digitais. Essa solução oferece um desempenho satisfatório em tempo real, garantindo a resposta rápida necessária para aplicações críticas. Além disso, a plataforma apresenta um alto grau de integração, incorporando conversores de dados e recursos de gerenciamento de consumo. Essa arquitetura integrada facilita a comunicação e o intercâmbio de comandos e informações com outros dispositivos embarcados, tornando o sistema mais eficiente e versátil.

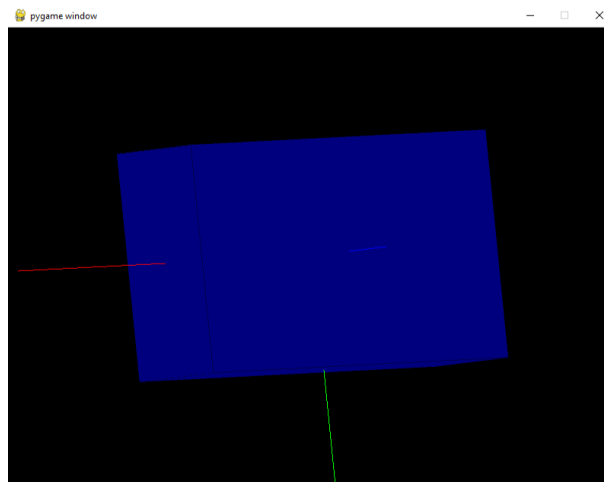


Figura 2 – Cubo 3D gerado com o código python para o teste dos sensores

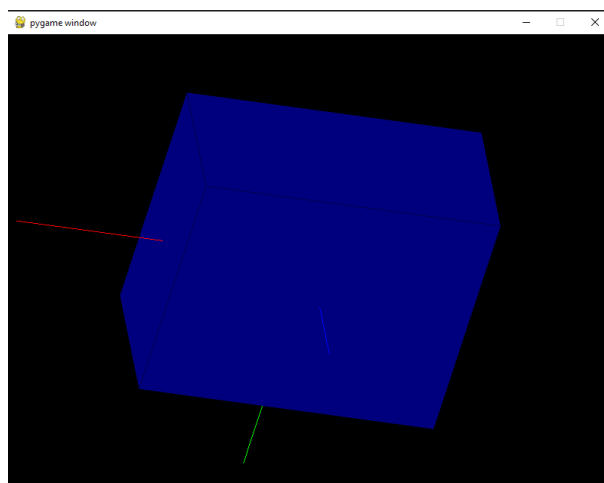


Figura 3 – Cubo 3D gerado com o código python para o teste dos sensores

Após a realização dos testes computacionais, o próximo passo será aplicar o sistema

em um ambiente físico. Para isso, será utilizado um gimbal, desenvolvido especificamente para o conjunto de sensores e o microcontrolador empregados. Esse dispositivo permitirá simular, de maneira precisa, todas as rotações possíveis em torno dos três eixos (X, Y e Z), criando um ambiente controlado e ideal para avaliar o comportamento real do sistema em situações práticas. Com essa abordagem, será possível verificar a acurácia e a eficácia dos algoritmos em condições reais, aproximando ainda mais os resultados obtidos das futuras aplicações do projeto.

## 1.3 Objetivos

### Geral

Portanto, o objetivo primário deste estudo foi desenvolver e implementar uma unidade de processamento, condicionamento e regulação de energia fotovoltaica para CUBESAT's com um sistema de estimação da atitude integrado cujo resultado seja facilmente disponibilizado para aplicação em malhas de controle.

### Específicos

Foram objetivos Específicos: Desenvolvimento de modelos para predição da posição do sol considerando a disposição dos painéis no satélite; desenvolvimento de conversores eletrônicos de potência para processamento, condicionamento, regulação e gerenciamento de energia fotovoltaica gerada em satélites; desenvolvimento de algoritmos para determinação da atitude de um satélite; desenvolvimento de sistemas de medição e aquisição para satélite e desenvolvimento de pessoal especializado.

## 1.4 Organização e estrutura

o capítulo ?? são apresentados os principais trabalhos consultados para a realização do projeto conhecimento sobre o assunto.

O presente trabalho aborda a estimativa da atitude de um satélite artificial, especificamente o Cubesat. Nos capítulos 2, que tem início na página 16 e 3, que começa na página 17, serão discutidos os conceitos fundamentais relacionados à atitude dos satélites, incluindo suas representações e os algoritmos utilizados para seu cálculo. Além disso, serão apresentados os componentes empregues na construção do nosso protótipo, como sensores, microcontroladores e outros dispositivos relevantes.

A ESCREVER



## 2 Atitude de Satélites

IDEIA DE ESCRITA

### 2.1 Ângulos de Euler

### 2.2 Quatérnions

IDEIA DE ESCRITA

### 2.3 QUEST - QUatérnion ESTimation

## 3 Desenvolvimento

Para alcançar os resultados desejados na determinação da atitude do satélite, foi necessário montar um sistema específico para aquisição de dados, utilizando sensores e um microcontrolador. Esse sistema foi desenvolvido com o objetivo de realizar testes com o algoritmo de determinação de atitude implementado. Assim, tornou-se essencial identificar as ferramentas mais adequadas para a execução dessas tarefas, garantindo a precisão e a eficiência do sistema durante os testes e validações. A escolha criteriosa dos componentes e recursos foi fundamental para assegurar que os resultados obtidos fossem confiáveis e consistentes para realizar a tarefa.

### 3.1 Sistema de Aquisição de Dados

Para realizarmos a aquisição dos dados necessários, foi-se utilizado um sensor Polulu AltIMU-10 v3, mostrado na figura 4. Esta é uma placa compacta que integra múltiplos sensores avançados, sendo ideal para aplicações em medições inerciais e altimetria. Ele combina um giroscópio de três eixos (L3GD20H), um acelerômetro e magnetômetro de três eixos (LSM303D), e um barômetro digital (LPS331AP), formando uma unidade de medição inercial (IMU) que também funciona como altímetro. Isso significa que o AltIMU-10 v3 é capaz de medir a rotação, aceleração, orientação magnética e pressão atmosférica, proporcionando um conjunto de dados completo para a determinação da atitude e altitude de dispositivos, como em aplicações aeroespaciais e de robótica.

O AltIMU-10 v3 utiliza a interface de comunicação I<sup>2</sup>C, um protocolo serial simples que facilita a conexão de diversos dispositivos no mesmo barramento de dados, podemos perceber os endereços através da Tabela 1. Isso permite que todos os sensores sejam acessados de maneira eficiente por meio de uma única linha de clock e uma única linha de dados, simplificando a comunicação com microcontroladores e outros sistemas embarcados. Além disso, essa versão oferece a possibilidade de alterar os endereços dos sensores no barramento I<sup>2</sup>C, o que permite a utilização de mais de uma unidade AltIMU no mesmo sistema, sem conflitos de endereçamento.

<i>Sensor</i>	<i>Slave Address (default)</i>	<i>Slave Address (SA0 driven low)</i>
<i>L3GD20H (gyro)</i>	<i>1101011b</i>	<i>1101010b</i>
<i>LSM303D (accelerometer and magnetometer)</i>	<i>0011101b</i>	<i>0011110b</i>
<i>LPS331AP (barometer)</i>	<i>1011101b</i>	<i>1011100b</i>

Tabela 1 – Tabela de endereçamento de cada Barramento I<sup>2</sup>C

Uma vantagem adicional em relação a outros produtos similares é que esse módulo inclui componentes eletrônicos adicionais, como um regulador de tensão integrado e circuitos de mudança de nível, o que torna sua interface compatível tanto com sistemas de 3,3V quanto com sistemas que operam a 5V. Isso elimina a necessidade de componentes externos para ajustar a tensão, facilitando a sua integração em projetos que utilizam microcontroladores que operam a diferentes tensões de alimentação.

No mercado, o AltIMU-10 v3 se destaca não apenas por sua alta precisão, mas também por sua facilidade de uso em relação a outros sensores MEMS, que, por serem pequenos e funcionarem com tensões mais baixas, costumam apresentar dificuldades de integração para estudantes e amadores. A Pololu superou essas barreiras, oferecendo uma solução compacta e acessível com a robustez necessária para projetos que demandam medições precisas de atitude e altitude. (POLULU..., 2024)

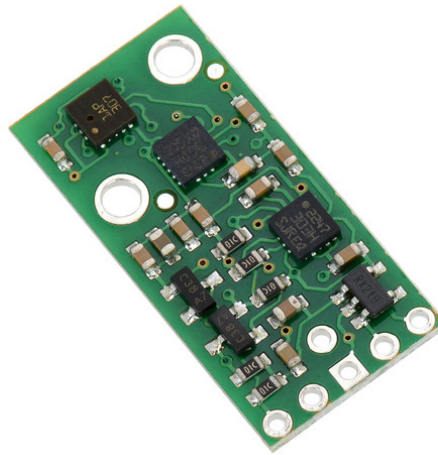


Figura 4 – Imagem do AltIMU10 - v3 da Pololu

Polulu, 2024: <https://www.pololu.com/product/2469>

## 3.2 Giroscópio

O giroscópio presente no AltIMU-10 v3 é o L3GD20H, como já citado anteriormente, um sensor de três eixos que mede a velocidade angular em torno dos eixos X, Y e Z. Ele é utilizado para detectar a rotação e a orientação de objetos em movimento, sendo amplamente utilizado em sistemas de controle de atitude. Esse giroscópio possui diferentes escalas de sensibilidade ajustáveis, que variam de  $\pm 245^\circ/\text{s}$  a  $\pm 2000^\circ/\text{s}$ , permitindo medições precisas de giros rápidos ou lentos. Além disso, o L3GD20H é conhecido por sua estabilidade e baixa deriva, características importantes para sistemas que exigem alta precisão em medições de rotação.

A capacidade de saída do giroscópio é em formato de 16 bits por eixo. O que possibilita uma resolução de dados elevada, deixando-o especialmente útil em sistemas de controle e navegação.

Como sua comunicação é via protocolo I<sup>2</sup>C, como foi explicado anteriormente, facilita sua integração com microcontroladores, e opera com baixo consumo de energia, sendo ideal para aplicações embarcadas que precisam monitorar a atitude, como em satélites, drones e robôs.

### 3.3 Magnetômetro e Acelerômetro

O acelerômetro e magnetômetro presentes no AltIMU-10 v3 estão combinados no sensor LSM303D, já citado, que mede tanto a aceleração quanto a intensidade dos campos magnéticos em três eixos (X, Y, Z). O acelerômetro é responsável por medir a aceleração linear do dispositivo, fornecendo informações importantes sobre inclinação e movimento, com escalas ajustáveis de sensibilidade que podem chegar a até  $\pm 16g$ . Isso o torna essencial para detectar variações na inclinação ou velocidade de objetos, sendo muito utilizado em sistemas de estabilização e controle de atitude.

Já o magnetômetro mede a intensidade dos campos magnéticos, permitindo que o dispositivo determine sua orientação em relação ao campo magnético da Terra. Com uma faixa de medição de até  $\pm 12$  gauss, o magnetômetro é usado para calcular a direção do norte magnético, funcionando como uma bússola digital. E ambos os CIs possuem sua saída de 16 bits por eixo, tendo assim, as mesmas vantagens do Giroscópio.

Juntos, o acelerômetro e o magnetômetro permitem determinar tanto a inclinação quanto a orientação espacial do dispositivo, complementando as medições do giroscópio para fornecer uma visão completa da atitude e movimento.

Assim como o giroscópio, o LSM303D utiliza o protocolo de comunicação I<sup>2</sup>C, o que facilita sua integração com sistemas embarcados e microcontroladores, permitindo a leitura simultânea dos dados de aceleração e campo magnético em tempo real, com baixo consumo de energia.

## 4 Resultados

Neste capítulo é apresentada uma análise dos resultados obtidos.

### 4.1 Dados, dados, dados

## 5 Considerações finais

As últimas palavras podem ser apresentadas neste capítulo. Ele pode ser numerado ou não. Caso queria que ele não possua numeração, utilize `\chapter*` após o comando `chapter`.

# Referências

FERREIRA, Alexandre J. et al. Procedimento experimental para a determinação de atitude de satélites artificiais. *Ciência & Engenharia*, ISSN 0103-944X, v. 17, n. 1/2, p. 57–64, 2008. Citado 1 vez na página 12.

JIA, Yan-Bin. *Quaternions and Rotations*. Set. 2013. Com S 477/577 Notes. Citado 1 vez na página 13.

POLULU. 2024. Disponível em: <https://www.pololu.com/product/2469>. Citado 1 vez na página 18.

SHUSTER, M. D. A survey of attitude representations. *Journal of Guidance and Control*, v. 41, n. 4, p. 439–517, 1993. Citado 1 vez na página 12.

SILVA, W. R. *Filtro H-infinito estendido de segunda ordem e filtro de partículas regularizado com "roughening" aplicados na estimativa de atitude de satélites artificiais*. 2016. Citado 1 vez na página 13.

TAVARES, Felipe Oliveira. *Desenvolvimento de plataforma de testes para determinação de atitude baseado em acelerômetros e magnetômetros*. 2017. F. 66. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. Citado 1 vez na página 13.

WERTZ, J. R. *Spacecraft Attitude Determination and Control*. Springer Science & Business Media, 2012. v. 73. Citado 1 vez na página 12.

YANG, Y. Spacecraft attitude determination and control: Quaternion based method. *Annual Reviews in Control*, v. 36, n. 2, p. 198–219, 2012. ISSN 1367-5788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.09.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578812000387>. Citado 2 vezes nas páginas 12, 13.

Lembre-se: apêndices são de autoria do próprio autor do texto. Anexos são elementos de autorias de outros, que o autor do texto julga interessante apresentar

Lembre-se: apêndices são de autoria do próprio autor do texto. Anexos são elementos de autorias de outros, que o autor do texto julga interessante apresentar

Lembre-se: apêndices são de autoria do próprio autor do texto. Anexos são elementos de autorias de outros, que o autor do texto julga interessante apresentar