



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 Artificias

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,
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	19

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de endereçamento de cada Barramento I ² C	18
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
abnTeX	ABsurdas Normas para TeX

Lista de símbolos

Γ	Letra grega Gama
Λ	Lambda
ζ	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	REVISÃO DE LITERATURA	16
3	ATITUDE DE SATÉLITES	17
3.1	Ângulos de Euler	17
3.2	Quatérnions	17
3.3	QUEST - QUatérnion ESTimation	17
4	DESENVOLVIMENTO	18
4.1	Sistema de Aquisição de Dados	18
4.2	Giroscópio	19
4.3	Magnetômetro e Acelerômetro	20
5	RESULTADOS	21
5.1	Dados, dados, dados	21
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	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 têm como função realizar tarefas de interação com a terra, corpos celestes, ou outros artefatos espaciais construídos pelo homem. Essas tarefas são executadas através de instrumentos e dispositivos que devem ser posicionados e orientados de maneira apropriada, permitindo a obtenção do desempenho desejado (**shuster1993**) *apud* (**ferreira2008**). Um exemplo marcante de satélite artificial, que simbolizou o início da Era Espacial, foi o Sputnik 1, visto na figura 1. Ele se tornou o primeiro satélite a ser lançado ao espaço, um marco alcançado após o fim da Segunda Guerra Mundial

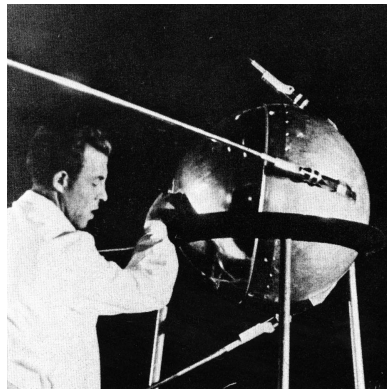


Figura 1 – Sputnik 1 antes do lançamento em outubro de 1957

A atitude de um satélite, que corresponde à sua orientação no espaço, é um elemento crucial para o sucesso das missões espaciais modernas. Com o aumento da demanda por satélites dedicados a diversas finalidades, como comunicação, monitoramento ambiental, sensoriamento remoto e pesquisa científica, o controle e a determinação precisa da atitude se tornaram atividades indispensáveis. Essas funções garantem a eficiência e a precisão das operações, sendo fundamentais para o cumprimento dos objetivos propostos por essas missões, especialmente em um cenário de crescente complexidade tecnológica e competitividade no setor aeroespacial.

A determinação de atitude é um processo computadorizado da orientação de um veículo espacial em relação a um sistema referencial inercial ou algum objeto de interesse, como a Terra. Este processo geralmente envolve a utilização de diversos tipos de sensores e sofisticados procedimentos de processamento de dados. A precisão alcançada é frequentemente limitada por uma combinação entre os métodos de processamento aplicados e o hardware da espaçonave. O processo de determinar a atitude pode ser resumido em se calcular a matriz de atitude do satélite num determinado instante em relação a um referencial previamente estabelecido (**Wertz2012**).

Os dados coletados pelos sensores, representados em forma de componentes vetoriais,

podem ser apresentados de diferentes maneiras. Entre as opções estão os quatérnions, que oferecem uma forma compacta e eficiente de representar rotações; os ângulos de Euler, que descrevem a orientação através de três rotações sequenciais; ou ainda por meio de matrizes de rotação, que fornecem uma descrição completa e direta das transformações no espaço tridimensional. Cada uma dessas representações possui suas próprias vantagens, dependendo do contexto e das necessidades da aplicação.

Os quatérnions são definidos como "um 4-tuple, que é uma representação mais concisa do que uma matriz de rotação. Seu significado geométrico também é mais óbvio, pois o eixo de rotação e o ângulo podem ser recuperados de forma trivial"(stanford2017quaternions).

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 (tavares2017)"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.

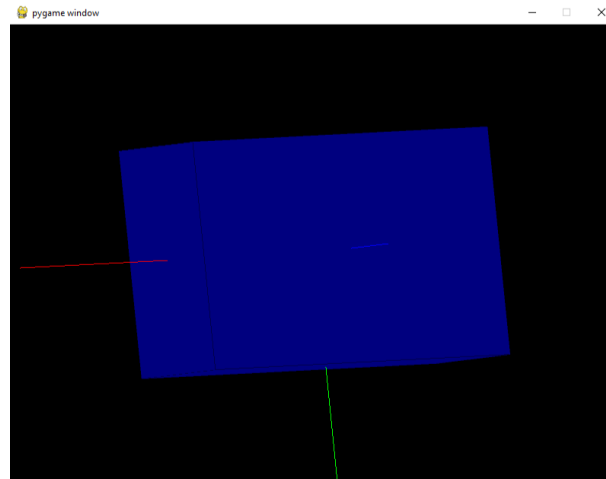


Figura 2 – Cubo 3D gerado com o código python para o teste dos sensores

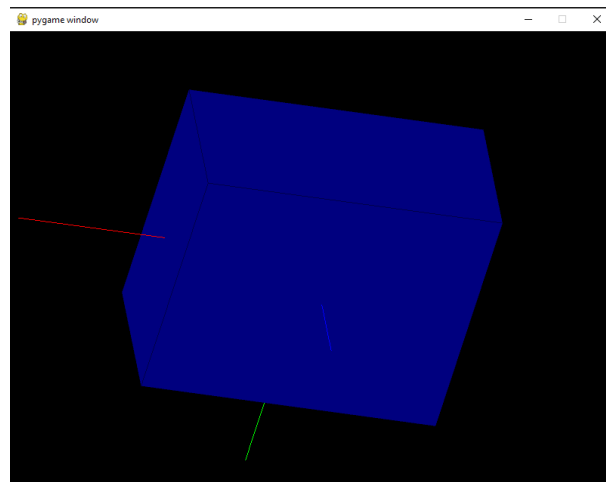


Figura 3 – Cubo 3D gerado com o código python para o teste dos sensores

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 2 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 4, que começa na página 18, e 3, 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.

2 Revisão de literatura

A ESCREVER

3 Atitude de Satélites

IDEIA DE ESCRITA

3.1 Ângulos de Euler

IDEIA DE ESCRITA

3.2 Quatérnions

IDEIA DE ESCRITA

3.3 QUEST - QUatérnion EStimation

4 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.

4.1 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 I²C, 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 I²C, 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 I²C

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. (Polulu2024)

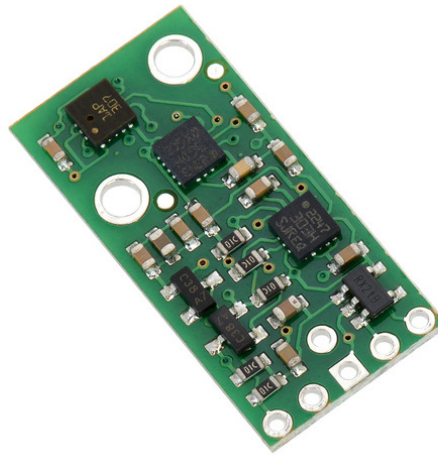


Figura 4 – Imagem do AltIMU10 - v3 da Pololu

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

4.2 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.

Como sua comunicação é via protocolo I²C, 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.

4.3 Magnetômetro e Acelerômetro

5 Resultados

Neste capítulo é apresentada uma análise dos resultados obtidos.

5.1 Dados, dados, dados

6 Considerações finais

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

APÊNDICE A – libero justo

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

ANEXO A – Morbi ultrices rutrum lorem.

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

ANEXO B – Lorem Morbi ultrices rutrum.

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