



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

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	10
Figura 2 – Cubo 3D gerado com o código python para o teste dos sensores	12
Figura 3 – Cubo 3D gerado com o código python para o teste dos sensores	13
Figura 4 – AltIMU10 - v3	18
Figura 5 – ESP32	20

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela de endereçamento de cada Barramento I ² C	17
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

CI	Circuito Integrado
IMU	Unidade de Medição Inercial

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativas e Relevância	11
1.2	Metodologia	11
1.3	Objetivos	13
1.4	Organização e estrutura	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
3	ATITUDE DE SATÉLITES	16
3.1	Ângulos de Euler	16
3.2	Quatérnions	16
3.3	QUEST - QUatérnion ESTimation	16
4	DESENVOLVIMENTO	17
4.1	Sistema de Aquisição de Dados	17
4.1.1	Giroscópio	18
4.1.2	Magnetômetro e Acelerômetro	19
4.2	Sistema de Estimação de Atitude	19
4.2.1	Controlador	20
	Referências	22

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. No dia 4 de outubro de 1957, o a aeronave foi lançada com sucesso, tornando-se o primeiro objeto feito pelo homem a entrar na órbita da Terra e marcando o início da 'Era Espacial' (ver Figura 1).

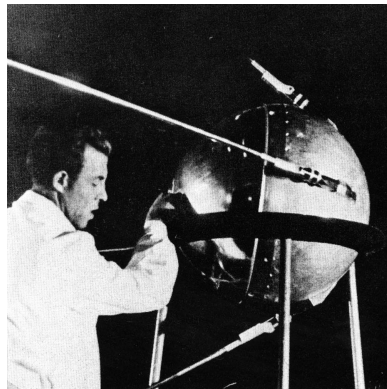


Figura 1 – Sputnik 1 antes do lançamento em outubro de 1957

Fonte: European Space Agency (ESA). Disponível em:: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2007/10/Sputnik_1_before_launch_in_October_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.

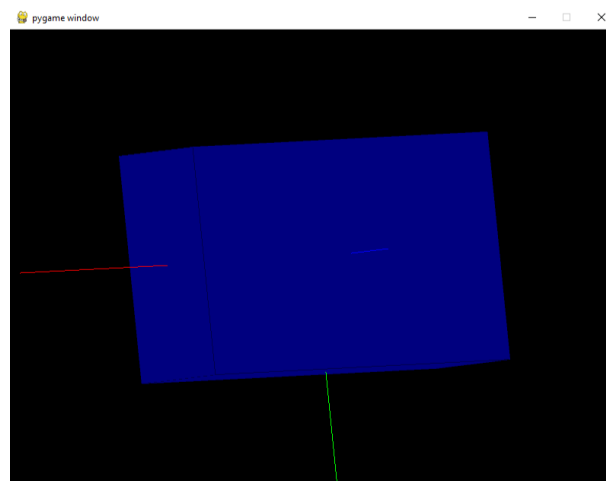


Figura 2 – Cubo 3D gerado com o código python para o teste dos sensores

Fonte: Autor

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.

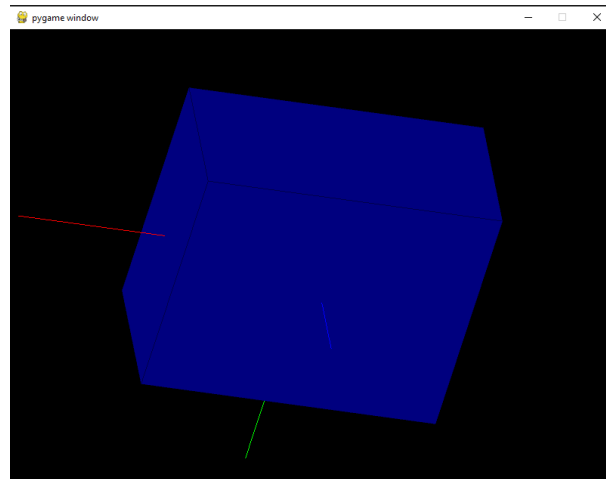


Figura 3 – Cubo 3D gerado com o código python para o teste dos sensores

Fonte: Autor

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 3, que tem início na página 16 e 4, 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.

2 Revisão de literatura

Neste capítulo de revisão bibliográfica, será abordada a literatura existente sobre controle e atitude de satélites artificiais, destacando os principais trabalhos relacionados ao tema. Inicialmente, serão discutidos estudos que exploram a construção de protótipos e a implementação de sistemas de controle de atitude.

Alguns trabalhos importantes sobre controle e atitude de satélites já foram desenvolvidos, abordando temas que dialogam diretamente com o presente estudo. Na monografia de (TAVARES, 2017), o autor explora a construção de um protótipo para testes de atitude de satélites, cobrindo de forma detalhada a base teórica por trás da atitude, incluindo ângulos de Euler, quatérnions e matrizes de rotação. Esses conceitos são essenciais para explicar a determinação de atitude, sendo aplicados tanto no trabalho dele quanto no presente estudo. Ambos os projetos utilizam o mesmo sensor para aquisição de dados, o que evidencia uma proximidade nos métodos. No entanto, a diferença está na escolha da placa de desenvolvimento: enquanto o trabalho atual utiliza a ESP32, Tavares optou por outra placa, mas que segue uma abordagem de programação similar, facilitando a implementação dos algoritmos de controle.

Além disso, o autor detalha como cada uma das ferramentas de atitude é empregada para determinar a orientação do satélite no espaço, explorando os cálculos matemáticos envolvidos, que incluem as transformações de coordenadas e a construção de matrizes de rotação. Embora o trabalho de Tavares tenha apresentado pequenos erros de precisão na fase de testes

”(...)Em relação aos resultados percebeu-se uma defasagem quando os ângulos se afastam de zero, em comparação aos resultados dos potenciômetros. Embora os erros observados se mantenham em uma faixa razoável, eles devem ser analisados.(...)”

o projeto foi bem-sucedido ao atingir os objetivos propostos, demonstrando a eficácia da abordagem e confirmando a viabilidade de aplicação dos algoritmos desenvolvidos.

”(...)O desenvolvimento da plataforma vê-se que a atingiu o objetivo esperado. Foi criado um dispositivo que simula de forma intuitiva a orientação de um corpo no espaço. Isso graças a montagem usando de kimbal's.(...)”

(FAUSTINO, 2019), por sua vez, explora o controle de atitude sob uma perspectiva diferente, mas com objetivos relacionados à estabilidade de satélites.

O artigo de (FERREIRA et al., 2008) complementa a discussão com um procedimento experimental detalhado sobre a determinação de atitude.

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 (Micro-Electro-Mechanical Systems), 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)

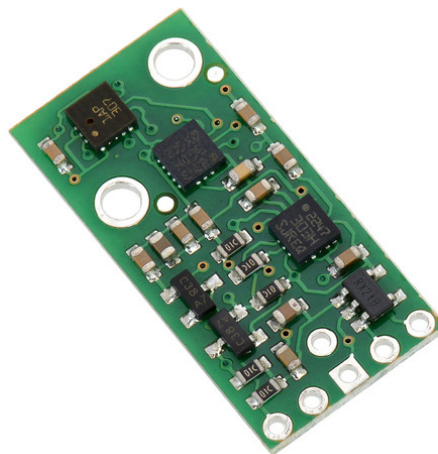


Figura 4 – Imagem do AltIMU10 - v3 da Pololu

Fonte: Disponível em (POLULU..., 2024)

4.1.1 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 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.

4.1.2 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 ± 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 I²C, 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.

4.2 Sistema de Estimação de Atitude

Após a aquisição de dados dos sensores de atitude, entra-se na fase de estimação da atitude em si, onde um microcontrolador desempenha um papel central. Este atua como o "cérebro" do sistema, implementando o algoritmo de estimação selecionado, que processa os dados dos sensores para determinar a orientação do satélite artificial em relação a um referencial. A escolha do algoritmo é fundamental, pois a precisão da estimação depende diretamente da capacidade do microcontrolador de processar as leituras dos sensores de

maneira eficiente e em tempo real.

4.2.1 Controlador

Escolhido como principal componente do sistema de estimação a placa de desenvolvimento ESP32, fabricada pela DOIT. Entre as várias opções disponíveis, optamos pelo modelo DOIT ESP32 DevKit v1, ilustrado na Figura 5. Esse modelo conta com um microcontrolador dual-core de 32 bits, o ESP-WROOM-32, fabricado pela Espressif. A decisão pela escolha desta placa foi baseada em sua ampla popularidade, fácil acesso a bibliotecas de código aberto e compatibilidade com diversas plataformas de desenvolvimento, o que facilita a implementação e integração com sensores e algoritmos de controle de atitude. Além disso, o ESP32 é conhecido por seu excelente custo-benefício, aliando poder de processamento e conectividade Wi-Fi/Bluetooth, sendo uma solução robusta e acessível para projetos de sistemas embarcados.

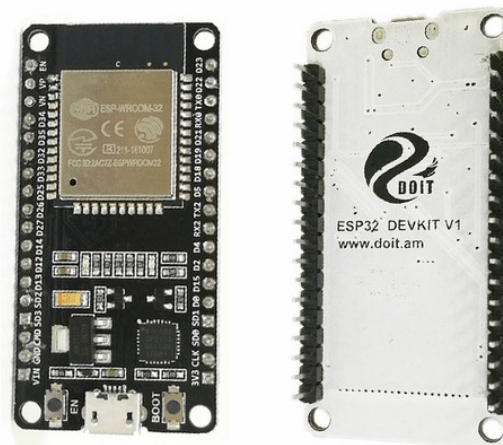


Figura 5 – Placa ESP 32

Fonte:: https://olddocs.zerynth.com/r2.3.3/official/board.zerynth.doit_esp32/docs/index.html

Neste projeto, sua tarefa é analisar os dados obtidos a partir dos sensores (giroscópio, acelerômetro e magnetômetro). Além disso, será também, responsável por formar os vetores de observação, normaliza-los, e implementar o algoritmo para estabelecer a orientação do nosso satélite.

Para a implementação do código do nosso determinador de atitude, optamos pela utilização da plataforma Arduino IDE, um software de código aberto amplamente utilizado em projetos de prototipagem eletrônica. O Arduino IDE oferece suporte à linguagem C, que é a principal linguagem de programação empregada para microcontroladores, facilitando a integração com sensores e dispositivos embarcados além de possuir uma vasta biblioteca de recursos de fácil acesso.

Paralelamente, para realizar simulações mais detalhadas do comportamento do satélite, utilizamos o Visual Studio Code (VSCode), uma poderosa plataforma de desenvolvimento que, combinada com a linguagem Python, nos permitiu criar uma simulação tridimensional. Python foi escolhido por sua flexibilidade e pela facilidade em manipular gráficos 3D, o que foi essencial para representar visualmente a atitude do satélite como um cubo 3D em movimento. Essa visualização gráfica, como mostrado nas figuras 2 e 3, na página 12, nos ajudou a compreender como as alterações nos vetores de atitude influenciam a orientação do satélite em relação ao espaço.

Dessa forma, o uso dessas duas plataformas complementares permitiu não apenas o desenvolvimento de um sistema eficiente para a determinação de atitude, mas também a realização de testes e simulações com alta precisão. Enquanto o Arduino IDE se mostrou eficiente para o controle de hardware, o VSCode e o Python foram indispensáveis para o desenvolvimento da interface de simulação, o que tornou o processo de validação do sistema mais intuitivo e visualmente compreensível.

Referências

- AL., A. J. Ferreira et. Procedimento experimental para a determinação de atitude de satélites artificiais. *Ciência Engenharia*, v. 17, p. 57–64, 2008. Acesso em: 09 abr. 2015. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/cieng/article/view/1107>. Nenhuma citação no texto.
- FAUSTINO, M. C. M. *Estudo de sistema de controle de atitude para simulador de nanossatélite*. 2019. Tese – Nome da Instituição. Citado 1 vez na página 15.
- 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 2 vezes nas páginas 10, 15.
- JIA, Yan-Bin. *Quaternions and Rotations*. Set. 2013. Com S 477/577 Notes. Citado 1 vez na página 11.
- 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 10.
- 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 11.
- 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 2 vezes nas páginas 11, 15.
- WERTZ, J. R. *Spacecraft Attitude Determination and Control*. Springer Science & Business Media, 2012. v. 73. Citado 1 vez na página 10.
- 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 10, 11.