

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC



LABORATÓRIO DE GUIAGEM, NAVEGAÇÃO E CONTROLE

---

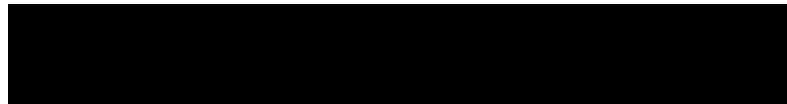
**IMU - Unidade de Medida Inercial**

---

Professor



Alunos



São Bernardo do Campo  
2 de maio de 2023

# Sumário

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introdução</b>  | <b>3</b>  |
| <b>1 Fundamentação teórica</b>                               | <b>4</b>  |
| 1.1 Análise de dados . . . . .                               | 4         |
| 1.2 TRIAD . . . . .  | 6         |
| 1.3 Integração por Trapézios . . . . .                       | 6         |
| 1.4 Quatérnions . . . . .                                    | 7         |
| <b>2 Procedimento experimental e redução de dados</b>        | <b>8</b>  |
| 2.1 Procedimento experimental . . . . .                      | 8         |
| 2.2 Redução de dados . . . . .                               | 9         |
| <b>3 Rotina computacional</b>                                | <b>11</b> |
| 3.0.1 TRIAD . . . . .  | 11        |
| 3.0.2 Integração por Trapézios . . . . .                     | 12        |
| 3.0.3 Quatérnions . . . . .                                  | 13        |
| <b>4 Resultados e discussão dos resultados</b>               | <b>14</b> |
| 4.1 Estudo de interferência externa nos resultados . . . . . | 14        |
| 4.2 Determinação de Atitude . . . . .                        | 16        |
| 4.2.1 TRIAD . . . . .  | 17        |
| 4.2.2 Integração por Trapézios . . . . .                     | 18        |
| 4.2.3 Quatérnions . . . . .                                  | 20        |
| 4.2.4 Comparativo dos dados . . . . .                        | 21        |
| <b>5 Conclusão</b>   | <b>23</b> |
| <b>Referências Bibliográficas</b>                            | <b>24</b> |

## Resumo

O presente projeto é realizado em duas etapas, uma laboratorial, contando com a obtenção de dados como a aceleração, campo magnético e rotação do corpo, utilizando-se dos dispositivos e sensores apropriados. E outra analítica, voltada para a análise e tratamento de todo o conjunto dados, realizando a sua adequação para grandezas conhecidas e adicionando filtros, para remover possíveis desvios causados por agentes externos no momento da medição. Vale-se ressaltar que o procedimento de medição contou com duas situações distintas os sensores parados, estáticos na bancada de teste e outra em movimento, realizando rotações de  $\pm 90^\circ$  em torno dos eixos x, y e z.

Por fim e com maior nível de complexidade é programado os métodos de determinação de atitude, ou seja, a obtenção dos ângulos de rotação do objeto, por meio dos métodos da TRIAD, Integração por trapézio e Quatérnion, sendo este o momento mais crucial para a boa execução do projeto proposto, haja visto a importância e necessidade para o controle de um veículo espacial.

# Introdução

O problema de determinação de atitude é uma parte fundamental da malha de controle de um veículo espacial (V/E) e cobre uma gama variada de técnicas para garantir que a direção de apontamento especificada pela missão seja obtida, sendo a atitude a representação da posição deste em um dado referencial.

Em órbita um V/E pode utilizar de diversos sensores, estimativas baseadas em dados passados, presentes ou projeções futuras obtidas da modelagem da dinâmica e/ou cinemática, juntamente com poderosos algoritmos para ponderar estas informações e determinar a melhor resposta para o problema.

Logo neste trabalho foi realizado um estudo abrangente sobre atitude de veículos espaciais, sendo abordados aspectos práticos para determinação de atitude em uma situação determinística, com dados advindos de um acelerômetro, magnetômetro e giroscópio, estes obtidos em laboratório. Assim como também é de interesse passar pelos diferentes métodos e torna-los entendíveis a todos

# 1 Fundamentação teórica

A orientação ou a posição angular de um veículo espacial é chamada de atitude e o ferramental matemático para trabalhar, descrever e modelar se baseia em sistemas de referência, vetores e suas representações nestes sistemas de referência.

Supondo um vetor  $\vec{v}$  conhecido no sistema de referência fixo no corpo, denotado por  $\vec{v}_b$ , é necessária para expressar este vetor em termos de um referencial inercial uma matriz de Rotação  $M_{rot}$  tal que:

$$\vec{v}_i = M_{rot}\vec{v}_b \quad (1.1)$$

Essa matriz de rotação é chamada de matriz de atitude e o exemplo em questão resume o problema de determinação de atitude de um V/E, onde dados de sensores estão disponíveis em um sistema fixo no corpo e em um sistema inercial e a obtenção da matriz de atitude fornece a informação da posição angular do corpo. A matriz de atitude tem algumas propriedades fundamentais:

- $R^T = R^{-1}$
- $\det(R) = \pm 1$
- $M_{rot} = \vec{v}_b \vec{v}_i^T$

Matrizes de rotação podem ser parametrizadas de diversas formas, neste projeto sendo utilizado o método da TRIAD, integração por trapézios e quatérnions.

## 1.1 Análise de dados

Para realizar todos os procedimentos, desenvolver e compreender a importância do presente projeto utiliza-se uma Unidade de Medida Inercial (IMU) composto pelos seguintes sensores: Acelerômetro, Magnetômetro e Giroscópio. Sensores estes que possuem suas referencias conforme é mostrado por meio das figuras abaixo.

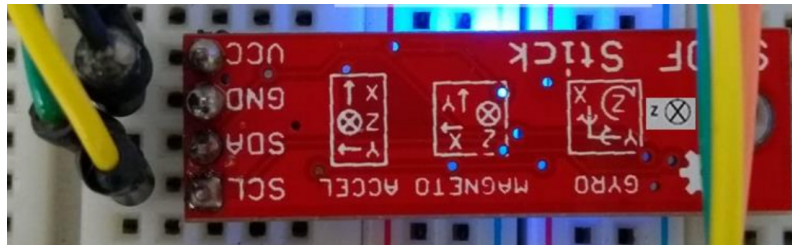


Figura 1.1: Detalhe dos Sistemas de Referência dos sensores

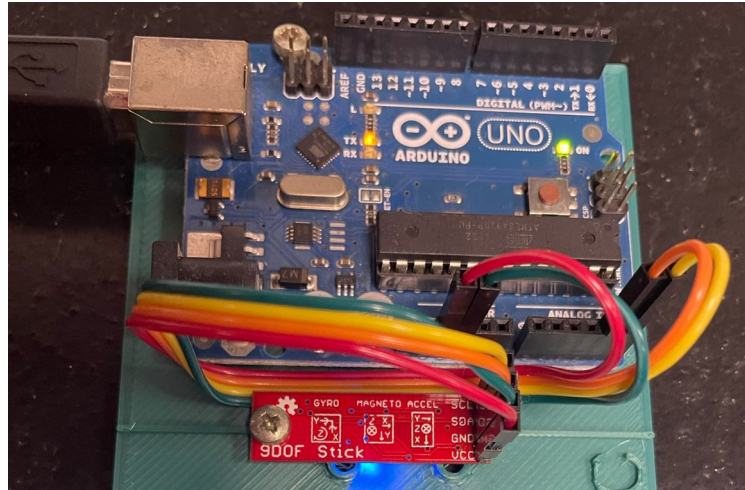


Figura 1.2: Sistemas de Referência dos sensores

O acelerômetro é modelado por meio do Princípio Fundamental da Dinâmica, podendo ser entendido e estudado como uma massa suspensa por uma haste fixa em um suporte, de maneira que quando o sistema sofre uma alteração em sua velocidade, a massa é deslocada da posição inicial de forma proporcional. O giroscópio por sua vez mede a velocidade de rotação e não necessita de auxílio externo para mensurar tal velocidade com relação ao sistema inercial. Seu funcionamento baseia-se no princípio de conservação do momento angular ( $H$ ). E por fim o último sensor utilizado o magnetômetro que é capaz de medir a direção do campo magnético, por meio de um sensor magnético e uma unidade eletrônica, responsável em converter as medidas encontradas em um formato desejado

Com todas as medições em mãos é preciso entender o output fornecido, com auxílio dos manuais técnicos do fabricante é possível obter os fatores de sensibilidade de cada sensor para converter as unidade das medidas realizadas para grandezas conhecidas, para tanto utilizou-se os dados mostrados por meio da tabela abaixo

| Sensor       | Unidade      |
|--------------|--------------|
| Acelerômetro | 256 (1/g)    |
| Magnetômetro | normalizado  |
| Giroscópio   | 14,375 (1/°) |

Tabela 1.1: Fatores de escala

Próximo procedimento essencial é determinar os desvios para calibrar as medidas experimentais, dado que o ambiente em que foi realizado o experimento pode certamente ter influenciado nas medidas ao passo que dispositivos eletrônicos do meio causam desvios. Logo o desvio é calculado pela diferença entre o valor ideal e o valor médio obtido.

| Sensor       | X | Y | Z |
|--------------|---|---|---|
| Acelerômetro | 0 | 0 | 1 |
| Magnetômetro | 1 | 0 | 0 |
| Giroscópio   | 0 | 0 | 0 |

Tabela 1.2: Valores ideais para cada sensor

Portanto o dado do sensor calibrado é a somatória do dado medido e o do desvio determinado, posteriormente volta-se aos métodos de determinação de atitude: TRIAD, Integração por trapézio e quatérnion

## 1.2 TRIAD

Um algoritmo simples baseado na construção de duas tríades de vetores ortonormais que representa um novo sistema nos dois sistemas de interesse (corpo referencial e inercial). Apesar do baixo custo computacional este algoritmo é determinístico e descarta parte da informação normalmente disponível, utilizando apenas dois vetores e por isso acaba sendo menos preciso que outros métodos.

Os dados de entrada para o algoritmo são quatro vetores, determinados em dois sistemas de coordenadas diferentes. Inicia-se com por exemplo os vetores de aceleração  $\vec{a}$  e campo magnético  $\vec{m}$  medidos no sistema de coordenadas do corpo, enquanto que o sistema inercial pode ser definido por meio dos valores ótimos  $\vec{a}_i$  e  $\vec{m}_i$

Vetores do corpo

$$\begin{cases} \vec{t}_{1b} &= \vec{a} \\ \vec{t}_{2b} &= \frac{\vec{a} \times \vec{m}}{|\vec{a} \times \vec{m}|} \\ \vec{t}_{3b} &= \vec{t}_{1b} \times \vec{t}_{2b} \end{cases}$$

Vetores inerciais

$$\begin{cases} \vec{t}_{1n} &= \vec{a}_i \\ \vec{t}_{2n} &= \frac{\vec{a}_i \times \vec{m}_i}{|\vec{a}_i \times \vec{m}_i|} \\ \vec{t}_{3n} &= \vec{t}_{1n} \times \vec{t}_{2n} \end{cases}$$

Logo determina-se a matriz de rotação  $M_{rot}$  através da multiplicação entre a matriz composta pelos vetores do corpo e a matriz transposta dos vetores inerciais.

## 1.3 Integração por Trapézios

A integração por meio do método do trapézio utiliza-se a função  $trapz(x_i, y_i)$ , presente no MATLAB, o método aproxima a integração ao longo de um intervalo dividindo a área em trapézios com áreas mais facilmente computáveis. Por exemplo, aqui está uma integração trapezoidal da função seno usando oito trapézios igualmente espaçados

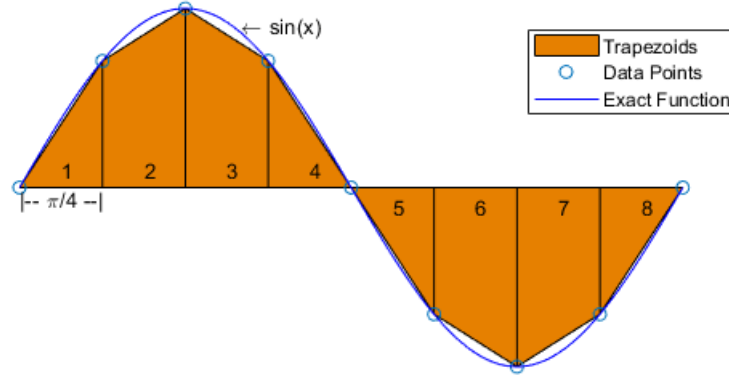


Figura 1.3: Exemplo de utilização do método do trapézio (1)

Se tratando de um procedimento de integração numérica, independente do método, e haja visto os dados inicialmente obtidos, utiliza-se a velocidade angular, proveniente do giroscópio. Ao passo que o dado é integrado resulta na angulação do veículo espacial.

## 1.4 Quatérnions

O procedimento de análise baseado em quatérnions se inicia a partir matriz de rotação ( $R_{bi}$ ) obtida pelo método da TRIAD

Portanto é possível determinar o ângulo  $\alpha$  em torno de uma eixo fixo arbitrário, de modo que:

$$\alpha = \arccos\left[\frac{1}{2}(Tr(R_{bi}) - 1)\right] \quad (1.2)$$

Em que  $Tr$  representa o traço de uma matriz, ou seja, a soma dos elementos da diagonal principal

Em seguida pode-se definir a matriz antissimétrica expressa com a utilização dos elementos da matriz de rotação ( $R_{bi}$ )

$$v = \begin{bmatrix} (R_{bi})_{23} - (R_{bi})_{32} \\ (R_{bi})_{31} - (R_{bi})_{13} \\ (R_{bi})_{12} - (R_{bi})_{21} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Portanto os quatérnions não apresentam singulares nas equações cinemáticas, mas possuem uma componente adicional e são definidos da seguinte forma:

$$q = \begin{bmatrix} r \\ q_4 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

De modo que as componentes  $r$  e  $q_4$  são definidas da seguinte forma

$$r = v \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (1.5)$$

$$q_4 = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (1.6)$$

Por fim obtém-se os ângulos de Euler transformadas em quatérnions



## 2 Procedimento experimental e redução de dados

### 2.1 Procedimento experimental

Para este experimento foi utilizado os seguintes materiais:

- Bússola;
- Arduino UNO + 9DOF SPARKFUN® Stick (Magnetômetro - HMC5883L®, Acelerômetro - ADXL345® e Giroscópio - ITG-3200®) + Protoboard;
- Computador com MatLab para aquisição de dados;
- Folha de papel.

O objetivo do procedimento experimental foi obter a variação da aceleração, da taxa de rotação e da direção do campo magnético por meio dos sensores acoplados à placa. Esses dados foram posteriormente utilizados para determinar a atitude da placa submetida a movimentos. Uma visão geral do experimento é ilustrado abaixo Fig. 2.1.

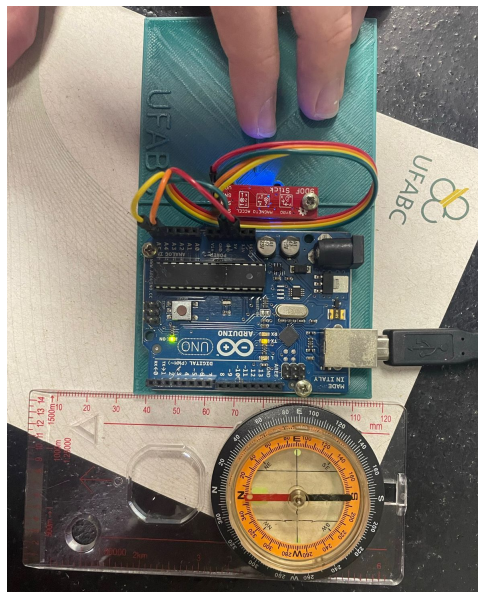


Figura 2.1: Visão geral do experimento.

Primeiramente a placa foi posicionada com os sensores em repouso e com auxílio de uma bússola determinou-se o norte ao qual o eixo x do magnetômetro é apontado, então, utilizando-se o MATLAB, realizou-se a leitura de 1000 medições. O segundo passo foi verificar se variáveis do ambiente poderiam gerar um ruído nas medições, dessa forma duas tomadas de dados foram realizadas, uma com a aproximação de um celular da placa e outra com geração de ruídos sonoros com palmas. Por fim foi realizadas leituras da placa em movimento, ou seja, a placa IMU foi movimentada enquanto a leitura de 1000 medições era feita, rotacionando-a em torno dos eixos y, z e x, respectivamente, em aproximadamente *90 graus*, de maneira a realizar os movimentos um seguido do outro.

## 2.2 Redução de dados

Em uma etapa inicial ajusta-se os dados para grandezas conhecidas e as quais possam ser devidamente trabalhadas

```
%Acelerometro
acx = data(:,1)/256;
acy = data(:,2)/256;
acz = data(:,3)/256;

%Magnetometro
magmod = sqrt(data(:, 4).^2 + data(:,5).^2 + data(:,6).^2);
mgx = data(:,4)./magmod;
mgy = data(:,5)./magmod;
mgz = data(:,6)./magmod;

%Giroscopio
grx = data(:,7)/(14.375);
gry = data(:,8)/(14.375);
grz = data(:,9)/(14.375);
```

A partir das médias, calcula-se os desvios para que assim possa-se criar um filtro retirando ruídos e desvios que possam ter ocorrido na obtenção dos dados

```
%Médias do acelerometro
axmed = mean(acx);
aymed = mean(acy);
azmed = mean(acz);
%Medias do magnetometro
mgxmed = mean(mgx);
mgymed = mean(mgy);
mgzmed = mean(mgz);
%Medias do giroscopio
grxmed = mean(grx);
grymed = mean(gry);
grzmed = mean(grz);
```

```
%Desvios
%Acelerometro
dax = 0 - axmed;
day = 0 - aymed;
daz = 1 - azmed;
%Magnetometro
dmx = 1 - mgxmed;
dmy = 0 - mgymed;
dmz = 0 - mgzmed;
%Giroscopio
dgx = 0 - grxmed;
dgy = 0 - grymed;
```

```
dgz = 0 - grzmed;
```

```
%Valores calibrados
```

```
%Acelerometro
```

```
ACx = acx + dax;
```

```
ACy = acy + day;
```

```
ACz = acz + daz;
```

```
%Magnetometro
```

```
MGx = mgx + dmx;
```

```
MGy = mgy + dmy;
```

```
MGz = mgz + dmz;
```

```
%Giroscopio
```

```
GRx = grx + dgx;
```

```
GRy = gry + dgy;
```

```
GRz = grz + dgz;
```

E por fim são ajustados os eixos dos sensores para adequar ao eixos do referencial utilizado, o giroscópio.

```
%Ajuste dos vetores (Baseados no Giroscopio)
```

```
%Acelerometro
```

```
acelx = ACx;
```

```
acely = -ACy;
```

```
acelz = ACz;
```

```
%Magnetometro
```

```
magx = MGy;
```

```
magy = -MGx;
```

```
magz = MGz;
```

```
%Giroscopio
```

```
girox = GRx;
```

```
giroy = GRy;
```

```
giroz = GRz;
```

### 3 Rotina computacional

Para melhor visualização das aplicações teóricas presentes no relatório, utilizadas ao longo dos problemas supracitados, e sua ordenação no processo de obtenção dos resultados abaixo encontra-se o fluxograma da rotina em MatLab empregada.

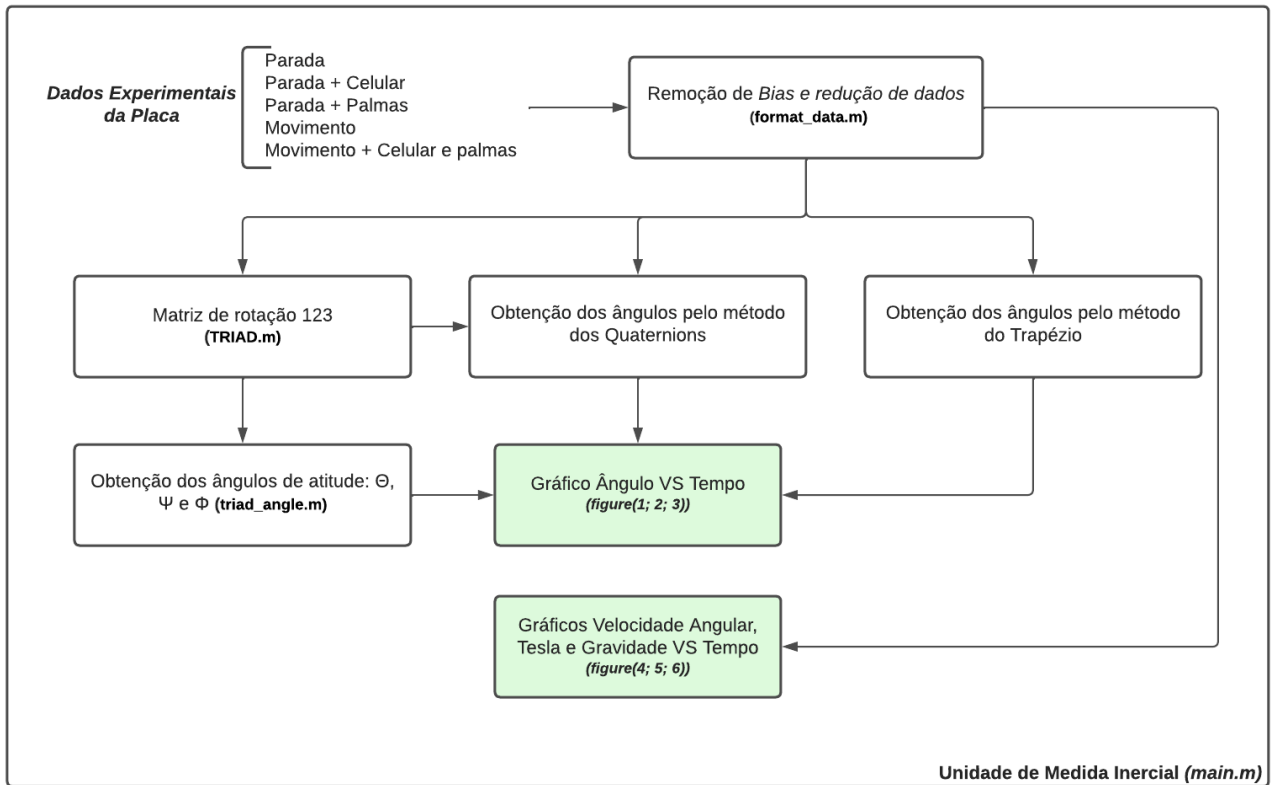


Figura 3.1: Fluxograma do código implementado em MatLab.

#### 3.0.1 TRIAD

Para iniciar o desenvolvimento cria-se a função *TRIAD* que recebe os dados devidamente ajustados do acelerômetro e magnetômetro para realizar as matrizes para o corpo e é criada a matriz inercial com os valores ideais dos mesmos sensores.

```

function [Rtriad] = TRIAD(data, acelx, acely, acelz, magx, magy, magz, value)
%Triad Algoritmo

%Estudo do algoritmo
%Acelerometro - Referencial - Sun
%Magnetometro - Dados

%Inercial
An = zeros(length(data),3);
Mn = zeros(length(data), 3);

```

```

for i=1:length(data)
    An(i, 3) = 1;
    Mn(i, 2) = 1;
end
AMn = cross(An(value,:), Mn(value, :));

%Body
Ab = [acelx acely acelz];
Mb = [magx magy magz];
AMb = cross(Ab(value, :), Mb(value, :));

%Vetores Tb
T1b = Ab(value, :);
T2b = AMb/norm(AMb);
T3b = cross(T1b,T2b) / norm(cross(T1b,T2b));

%Vetores Tn
T1n = An(value,:);
T2n = AMn/norm(AMn);
T3n = cross(T1n, T2n)/norm(cross(T1n, T2n));

%Matriz Rotação
BT = [T1b; T2b; T3b];
NT = [T1n; T2n; T3n];

Rtriad = BT*(NT');

end

```

Com a matriz de rotação determinada, identificado como  $R_{triad}$

```

function [theta, phi, psi] = triad_angle(triad)
    %Matriz 123
    phi = asind(triad(3,1));
    psi = -asind(triad(3,2)/cosd(phi));
    theta = -asind(triad(2,1)/cosd(phi));
end

```

Seus valores são comparados com a matriz de Euler, cuja a sequência é 123, mostrada abaixo, e assim obtendo funções que determinam os ângulos de Euler  $\theta$ ,  $\psi$  e  $\phi$  (2)

$$R_3(\psi)R_2(\theta)R_3(\phi) = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\phi + s_\psi c_\theta & -c_\psi s_\theta c_\phi + s_\psi s_\theta \\ -s_\psi c_\theta & -s_\psi s_\theta s_\phi + c_\psi c_\theta & s_\psi s_\theta c_\phi + c_\psi s_\theta \\ s_\theta & -c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

### 3.0.2 Integração por Trapézios

%Integracao por Trapezio

```

gx = data(:, 7);
gy = data(:,8);
gz = data(:,9);
time = data(:,10)/1000;

theta_trapz = zeros(length(time), 1);
phi_trapz = zeros(length(time), 1);
psi_trapz = zeros(length(time), 1);

for i=2:length(time)
    theta_trapz(i) = theta_trapz(i - 1) - trapz([time(i) time(i-1)]
    , [gy(i) gy(i-1)]);
    phi_trapz(i) = phi_trapz(i - 1) - trapz([time(i) time(i-1)]
    , [gx(i) gx(i-1)]);
    psi_trapz(i) = psi_trapz(i - 1) - trapz([time(i) time(i-1)]
    , [gz(i) gz(i-1)]);
end

```

### 3.0.3 Quatérnions

Com o método da *TRIAD* devidamente desenvolvido, os dados são inseridos ao longo da *loop* desenvolvido para o cálculo da *TRIAD* e assim obtendo os quatérnions.

```

for i=1:length(data)

    triad_mov = TRIAD(data, data(:,1), ...
        data(:,2), data(:,3), ...
        data(:,4), data(:,5), ...
        data(:,6), i);

    %Quaternion
    alfa(i) = acosd(0.5*(trace(triad_mov)-1));
    v(:, :, i) = [(triad_mov(2,3)-triad_mov(3,2)) (triad_mov(3,1)-triad_mov(1,3))
        (triad_mov(1,2)-triad_mov(2,1))]*sind(alfa(i)/2);
    q4(i) = cosd(alfa(i)/2);
    q(:, :, i) = [v(1,1,i); v(1,2,i); v(1,3,i); q4(i)];

end

```

## 4 Resultados e discussão dos resultados

Com base no desenvolvimento supracitado é possível gerar os resultados mostrados abaixo, sendo categorizados em dois momentos, quando a placa se encontra em repouso sobre o mesa de testes e com a placa em movimento realizando rotações de  $\pm 90^\circ$

### 4.1 Estudo de interferência externa nos resultados

Nesta seção foi feita uma série de testes com a placa parada para verificar se interferências do ambiente poderiam gerar um resíduo nos dados coletados no experimento. Como descrito na seção 2.1 o estudo se baseou em 2 variáveis externas, ondas sonoras (palmas) e eletromagnéticas (celular) e foram comparados com a tomada de dados da placa sem interferências desejadas. Apresenta-se a seguir, respectivamente, os dados referentes ao acelerômetro, magnetômetro e giroscópio ao longo do tempo.

#### Tomada de dados com a placa parada: acelerômetro

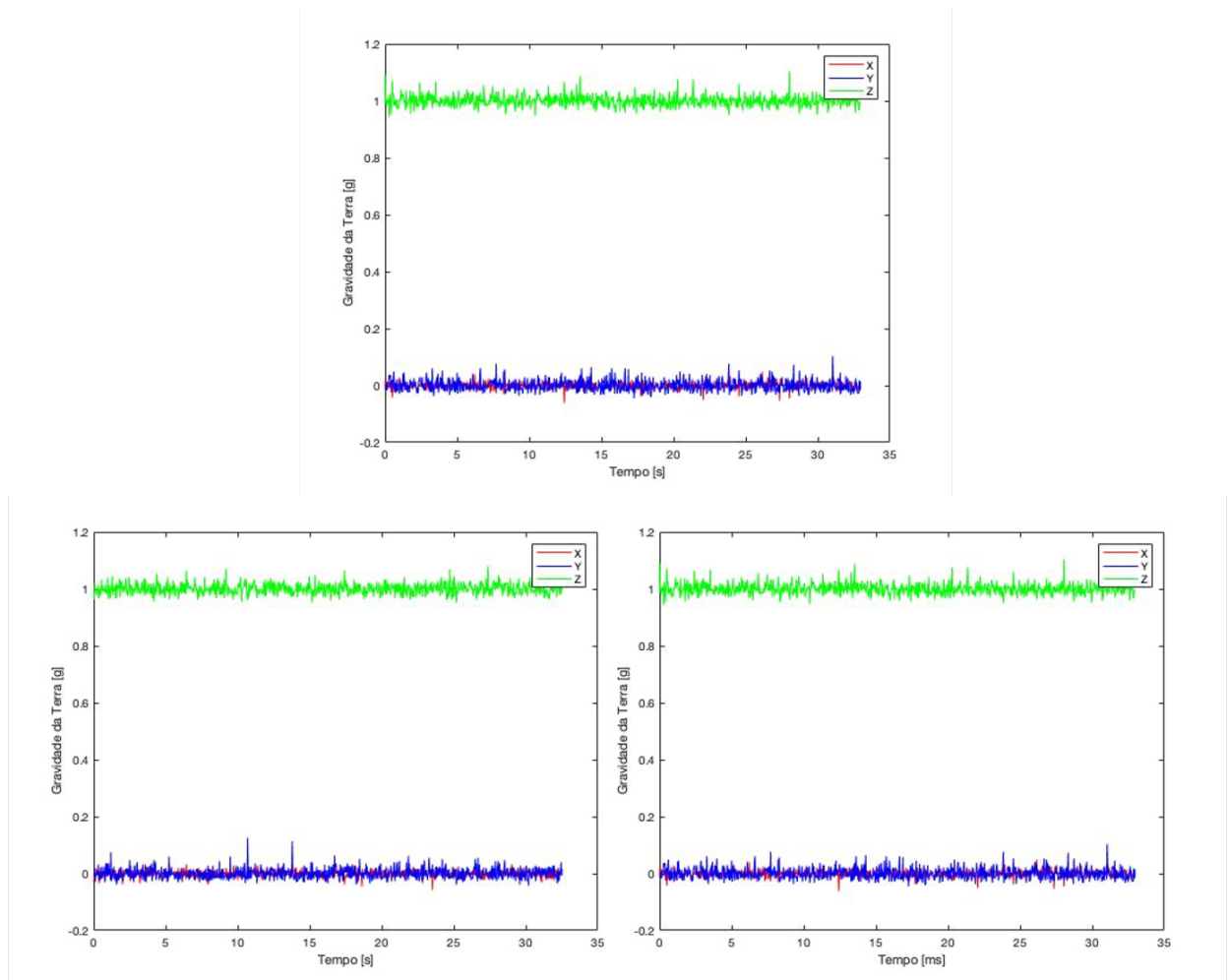


Figura 4.1: Dados do acelerômetro ao longo do tempo para, respectivamente, placa sem influência externa, com celular próximo e perturbação sonora.

## Tomada de dados com a placa parada: magnetômetro

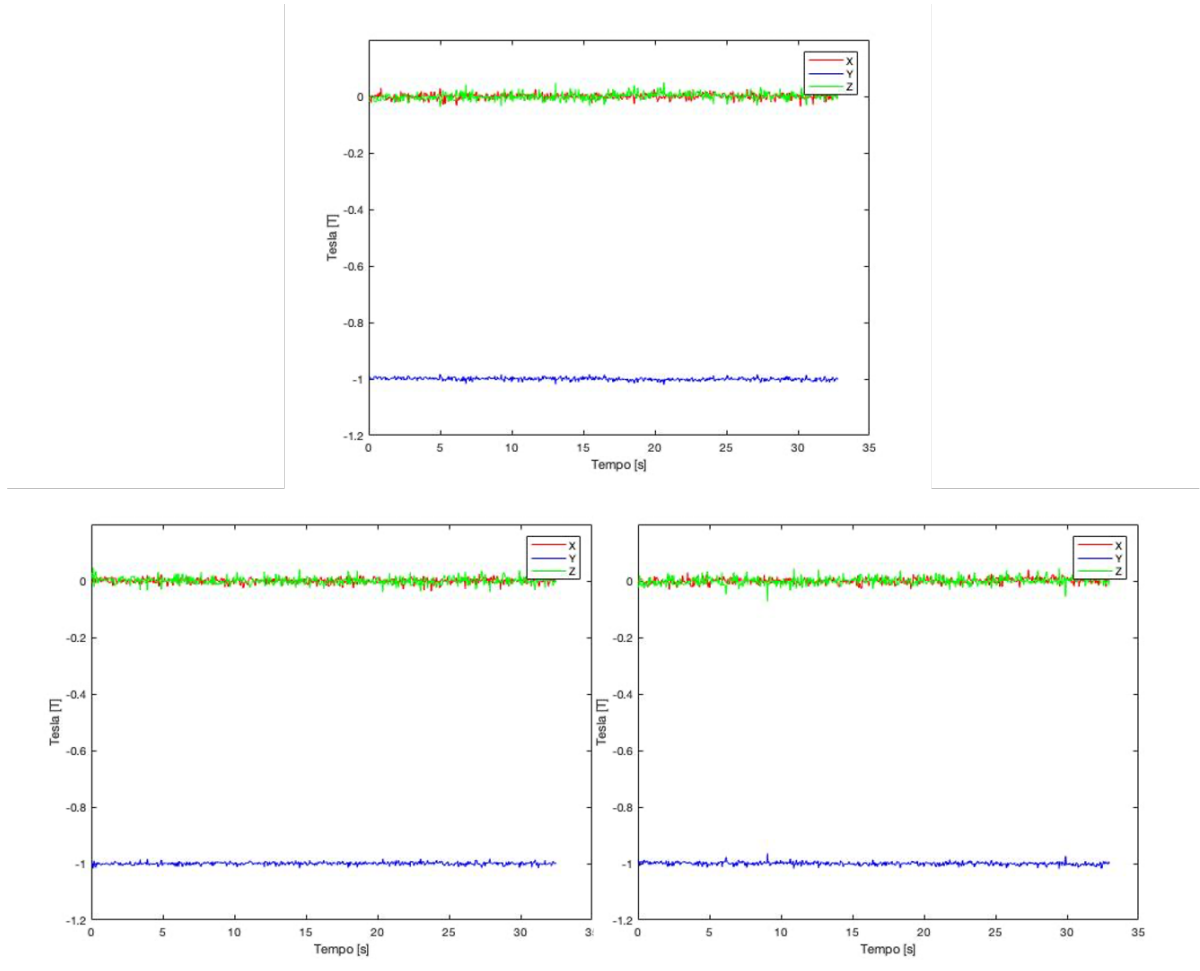


Figura 4.2: Dados do magnetômetro ao longo do tempo para, respectivamente, placa sem influência externa, com celular próximo e perturbação sonora.



## Tomada de dados com a placa parada: giroscópio

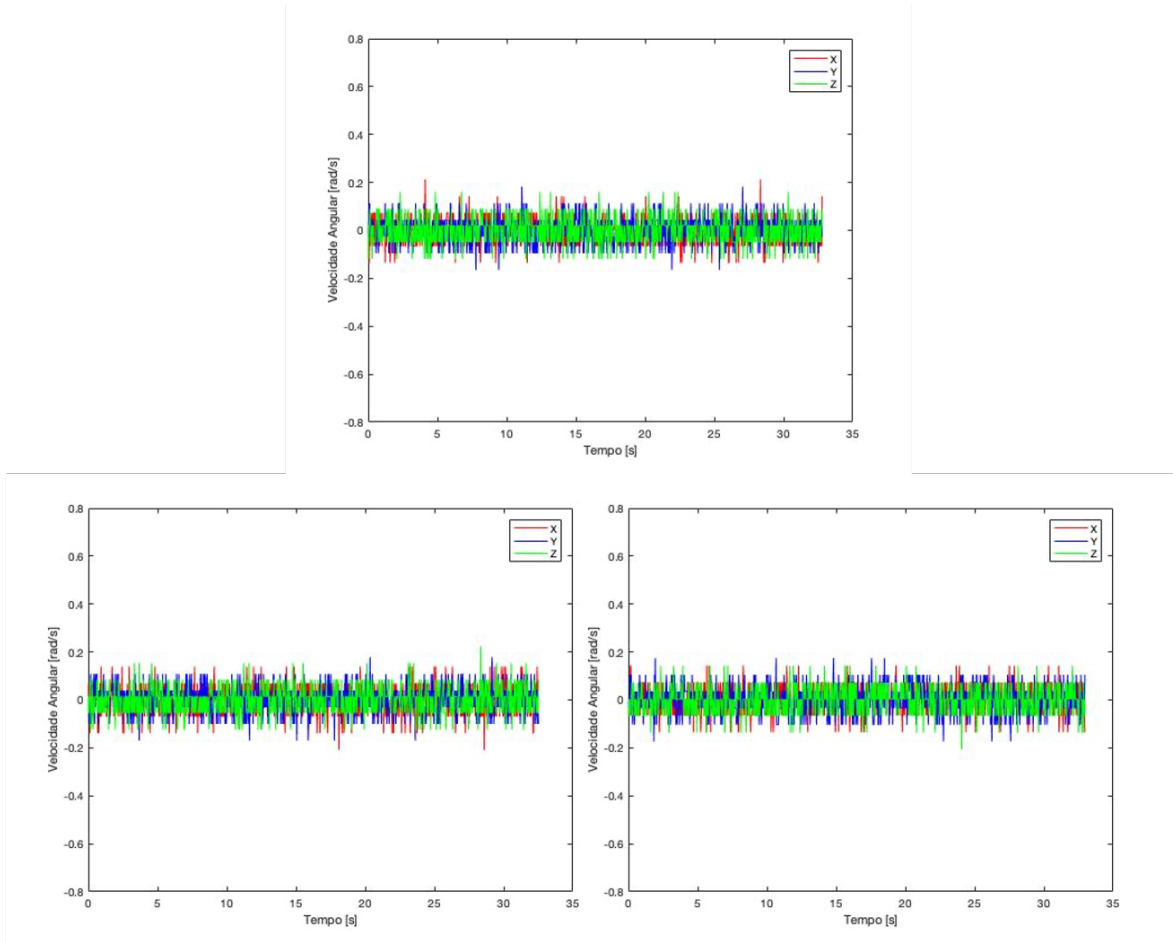


Figura 4.3: Dados do giroscópio ao longo do tempo para, respectivamente, placa sem influência externa, com celular próximo e perturbação sonora.

É possível notar que todos os procedimentos efetuados apresentaram um ruído em comum mesmo com os filtros aplicados, dessa forma, as ondas sonoras e eletromagnéticas artificialmente impostas ao experimento na tomada de dados não apresentaram uma interferência substancial na tomada de dados. No geral os valores obtidos com o acelerômetro e magnetômetro obtiveram um certo nível de estabilidade, próximos ao ideal, contudo o giroscópio diverge em  $\pm 0.2$ , algo considerável, entretanto esperado, devido a certas instabilidades e interferências no momento das medições.

## 4.2 Determinação de Atitude

Importante destacar que os dados aqui mostrados contam com dois momentos de obtenção de dados, um primeiro momento com a rotação do sistema em  $90^\circ$  em torno dos 3 eixos e a placa em repouso. É esperado que a tomada de dados em movimento mostre um gráfico com picos em  $\pm 90^\circ$  enquanto que a placa parada tenhamos algo fixo em  $0^\circ$

### 4.2.1 TRIAD

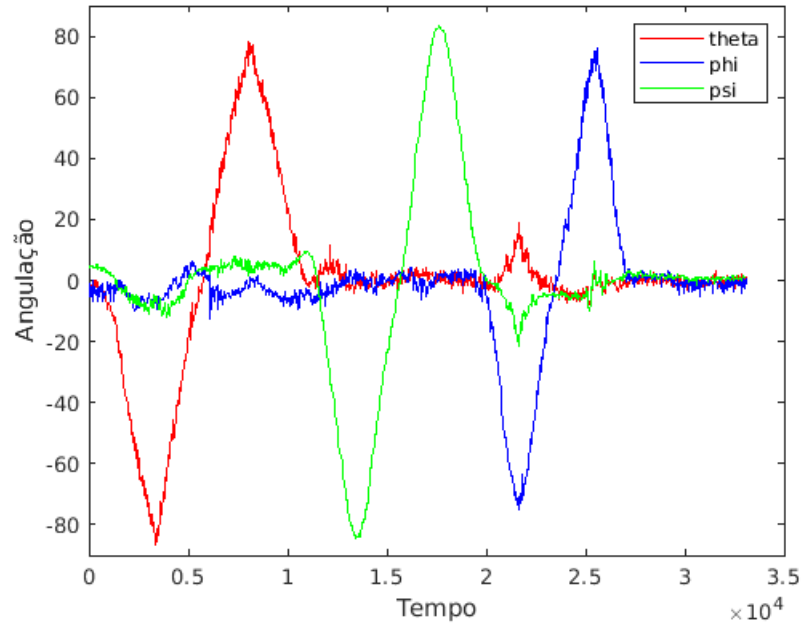


Figura 4.4: Em movimento: resultados do método da TRIAD.

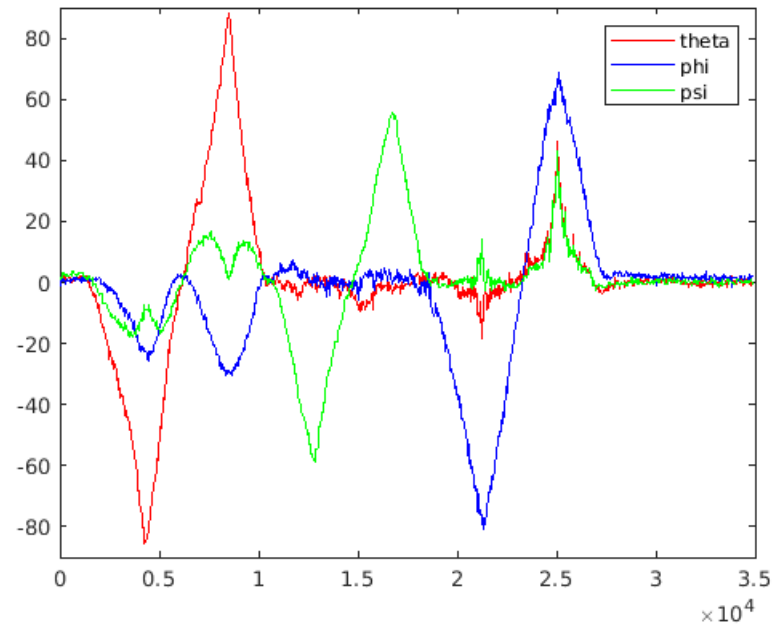


Figura 4.5: Em movimento: resultados do método da TRIAD (medida secundária).

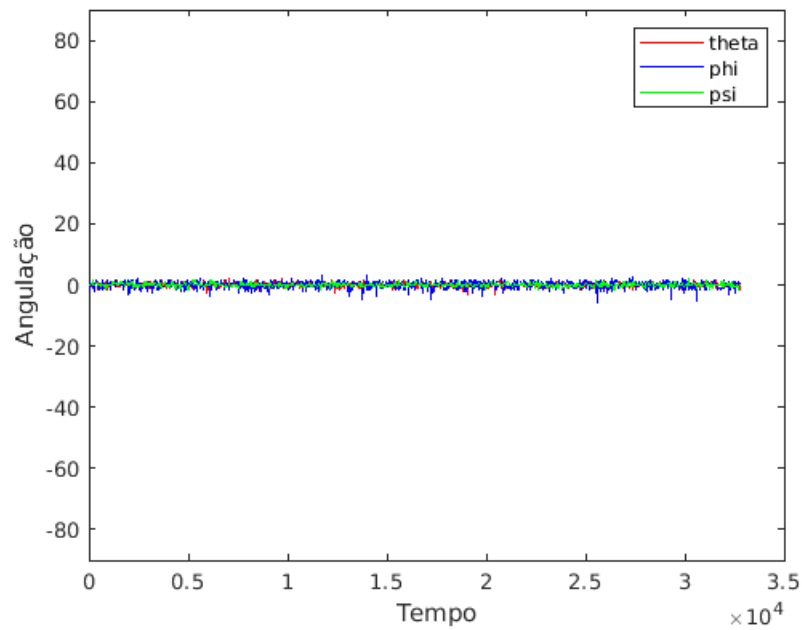


Figura 4.6: Parado: resultados do método da TRIAD.

Para o método da TRIAD os resultados certamente se mostraram condizentes com o esperado, mesmo que possua um certo nível ruído presente, representando o ocorrido na realidade

#### 4.2.2 Integração por Trapézios

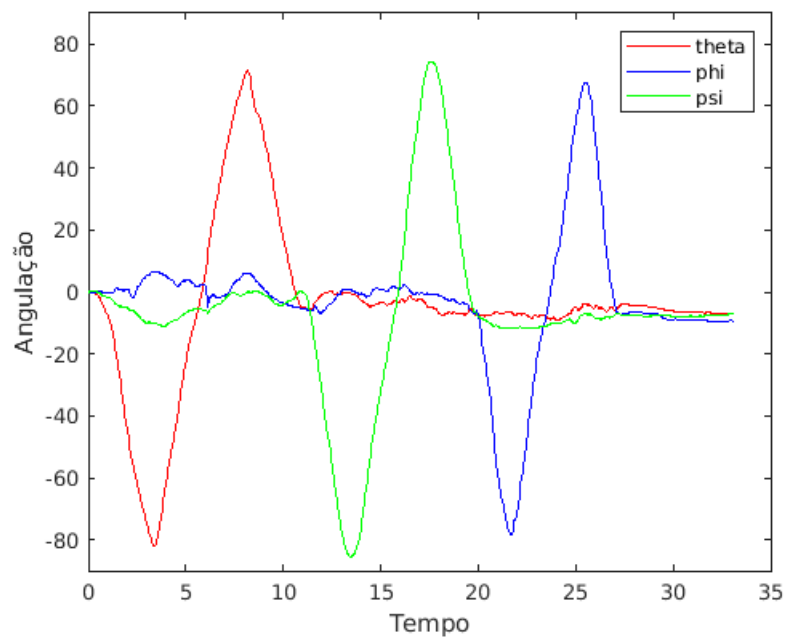


Figura 4.7: Em movimento: resultados do método de integração por Trapézio.

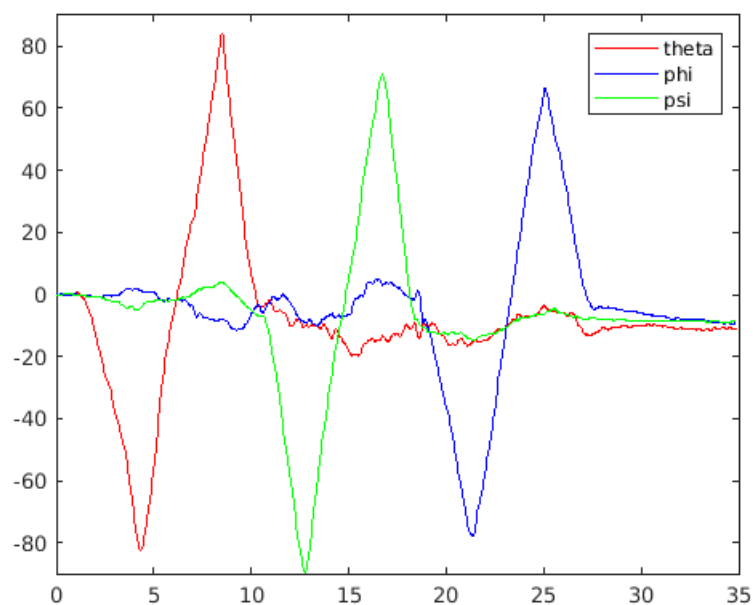


Figura 4.8: Em movimento: resultados do método de integração por Trapézio (medida secundária).

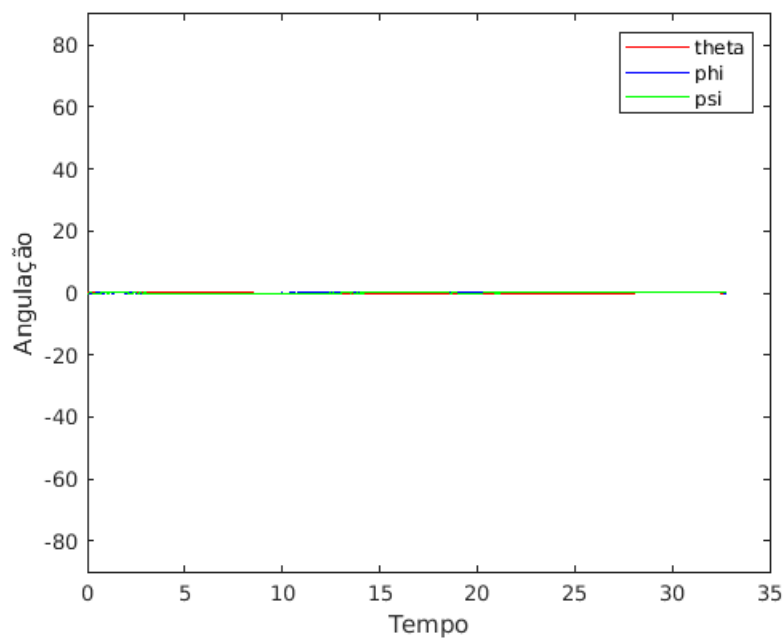


Figura 4.9: Parado: resultados do método de integração por Trapézio.

O método de integração por trapézio apresenta comportamento semelhante ao método anterior e, devido ao uso do método e função apropriados, é possível reduzir significativamente o nível de ruído presente na informação.

### 4.2.3 Quatérnions

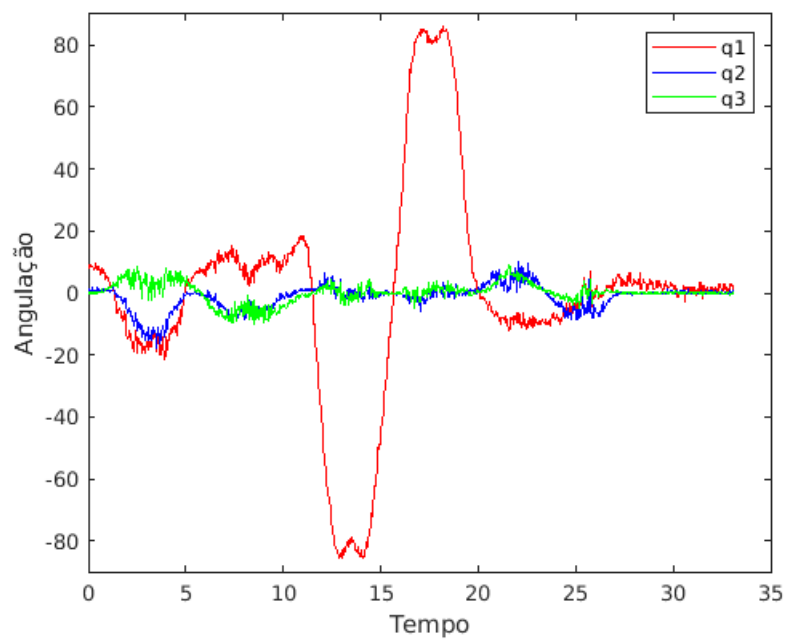


Figura 4.10: Em movimento: resultados do método do Quatérnion.

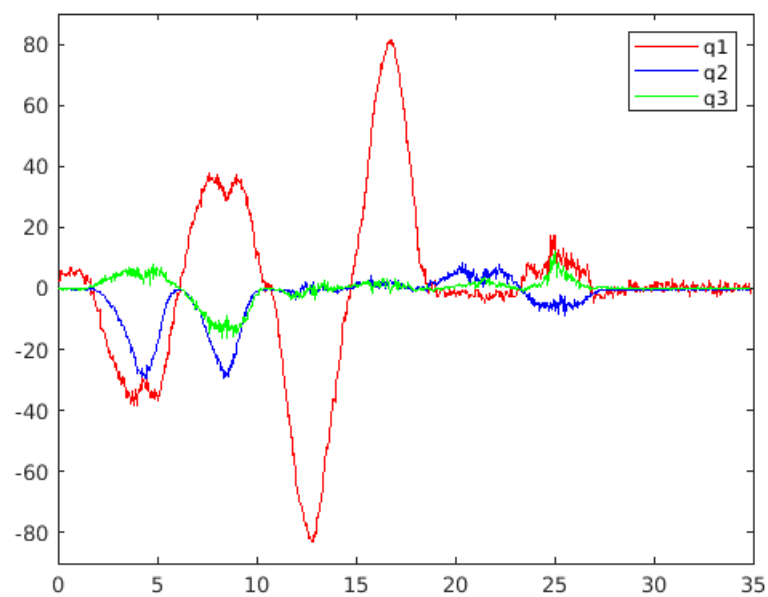


Figura 4.11: Em movimento: resultados do método do Quatérnion (medida secundária).

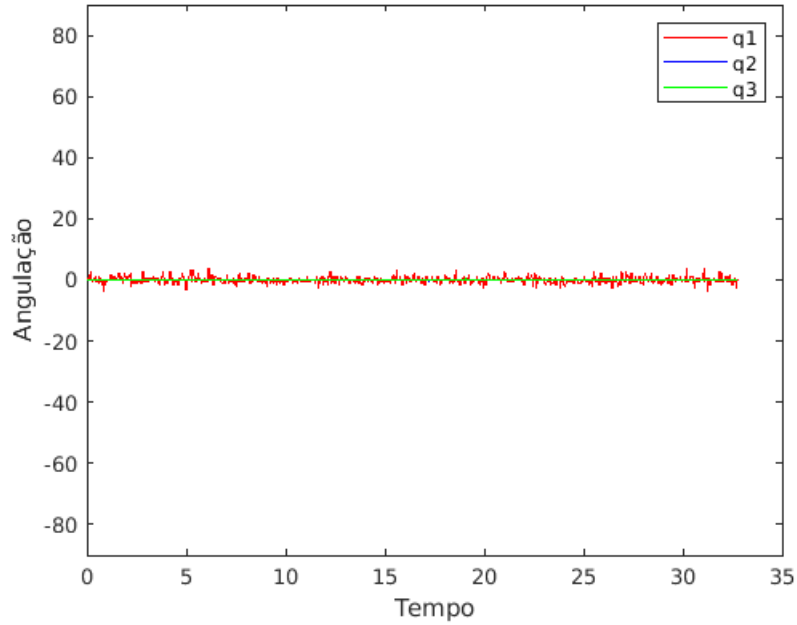


Figura 4.12: Parado: resultados do método do Quatérnion.

O método dos quatérnions conforme já mencionado anteriormente se mostrou um certo desafio em termos de implementação, contudo, de certa forma, também é capaz de refletir o comportamento de rotação da placa, assim como seu estado parado.

#### 4.2.4 Comparativo dos dados

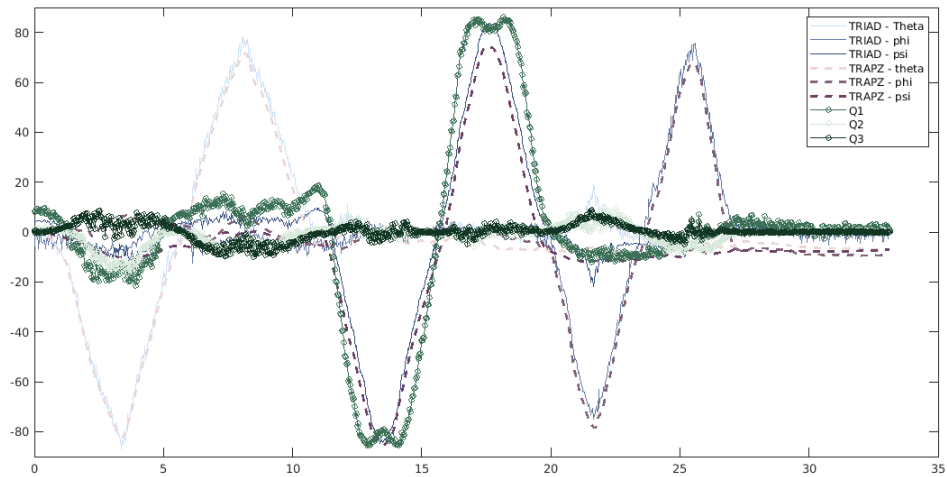


Figura 4.13: Movimento: comparativo entre todos os resultados.

Abaixo são mostrados os erros absolutos entre os dados, tomando o método do trapézio com referência, haja visto que há uma alta quantidade de dados, foi realizada a média e moda dos erros calculados a fim de determinar a existência de pontos altamente discrepantes, ou seja, calcula-se a média e moda, dado mais frequente.

| Ângulo   | Erro Absoluto (Média) | Erro Absoluto (Moda) |
|----------|-----------------------|----------------------|
| $\theta$ | 2.78 %                | 0 %                  |
| $\phi$   | 433.32 %              | 0 %                  |
| $\psi$   | 15.74 %               | 0 %                  |

Tabela 4.1: Relação entre Triad - Trapézio (comparativo entre erros).

| Ângulo   | Erro Absoluto (Média) | Erro Absoluto (Moda) |
|----------|-----------------------|----------------------|
| $\theta$ | 27.88 %               | 0 %                  |
| $\phi$   | 114.80 %              | 0 %                  |
| $\psi$   | 9.75 %                | 0 %                  |

Tabela 4.2: Relação entre Quatérnion - Trapézio (comparativo entre erros).

## 5 Conclusão

Neste projeto foram estimadas as matrizes de rotação de atitude de um veículo espacial, utilizando-se de métodos como TRIAD, Integração por trapézios e Quatérnions, com as implementações numéricas devidamente realizadas com auxílio do software MATLAB.

Por meio da análise dos resultados supracitados a integração por trapézios e TRIAD se mostraram o de mais fácil implementação. De modo que a TRIAD necessitou de dois principais dados advindos do acelerômetro e magnetômetro enquanto que a integração por trapézios recebe os dados do giroscópio, existindo um menor nível ruído no processo de integração, devido a função utilizada, aos dados e métodos que foram capazes de filtrar melhor os *inputs*.

Já os resultados estimados pelo método dos quatérnions, que conta como *input* a matriz de rotação da TRIAD, não mostraram-se tão assertivos, pois era esperado obter resultados similares aos métodos previamente implementados, logo no presente projeto este se apresenta como o primeiro ponto de melhoria.

Uma vez que as interferências propositalmente inseridas no método experimental não demonstraram um impacto substancial na tomada de dados, conforme discutido na seção 4.1, sugere-se implementar as seguintes melhorias: incluir a tomada de dados de outras possíveis fontes de interferência, como ondas magnéticas por meio do uso de um ímã; isolar a placa em um ambiente mais controlado, minimizando a influência de ondas eletromagnéticas, sonoras e campos magnéticos.

Portanto, os resultados deste trabalho mostraram a relevância da correta implementação dos algoritmos para determinação de atitude, sua importância no meio Aeroespacial e possíveis melhorias que podem ser feitas para futuros trabalhos.



## Referências

- 1 MATLAB: Método de integração por trapézio. 2021. Disponível em:  
<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/trapz.html#bua4lr9>.
- 2 EULER Matrix 123. 2022. Disponível em:  
[https://en.wikiversity.org/wiki/PlanetPhysics/Euler\\_123\\_Sequence](https://en.wikiversity.org/wiki/PlanetPhysics/Euler_123_Sequence).