



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
FÓRMULA TESLA



Relatório: Validação IMU

Primeira Versão

Autores:

João Gabriel Abreu Megali

Lucas Martins Rocha

Lucas Oliveira Rodrigues

Raphael Henrique Braga Leivas

Belo Horizonte

14/12/2025

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
2	METODOLOGIA	3
3	TESTE	5
4	RESULTADOS	7
5	CONCLUSÃO	8
6	APÊNDICE	9

1 INTRODUÇÃO

Para a implementação dos controles dinâmicos, é fundamental que a equipe assegure que os sensores estejam devidamente calibrados e que suas medições sejam coerentes. Com esse objetivo, a equipe de Controle, em conjunto com a equipe de Aquisição de Dados, realizou testes utilizando o sensor desenvolvido internamente pela equipe, no caso, o IMU reserva.

O IMU é responsável por obter a taxa de guinada real do veículo, isto é, a velocidade angular com que o veículo rotaciona em torno de seu eixo vertical. Essa informação é essencial para a vetorização de torque, uma vez que ela é utilizada para calcular o erro que será passado para o controlador.

A Figura 1 mostra uma imagem da PCB do IMU usada no teste.



Figura 1 – IMU.

2 METODOLOGIA

Para verificar a precisão das medições do sensor, foi necessário determinar previamente um valor teórico de referência, que pudesse ser comparado ao valor efetivamente medido. Para derivar a expressão do valor teórico foi preciso recorrer ao Movimento Circular Uniforme. Na Figura 2 conseguimos ver a trajetória no formato de um círculo em vermelho com raio R , com uma variação angular e uma variação linear s .

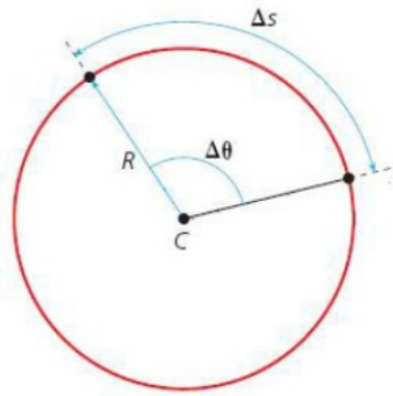


Figura 2 – Movimento Circular Uniforme.

A velocidade angular é definida como a variação angular dividida pelo tempo. Em uma volta completa, o corpo percorre 2π radianos em um período T .

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T} \quad (2.1)$$

Já a velocidade linear é dada pela distância linear percorrida dividida pelo tempo. Assim, em um movimento circular, a distância percorrida é o comprimento da circunferência, isto é, $2\pi R$, também dividido pelo período T .

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{2\pi R}{T} \quad (2.2)$$

Ao analisar essas duas definições em conjunto, obtém-se a relação clássica entre velocidade linear e velocidade angular que é dada pela Equação 2.3.

$$v = \omega R \quad (2.3)$$

Portanto, a relação que será utilizada nos testes para calcular o valor teórico será derivada da Equação 2.3, tendo em vista a definição da taxa de guinada que foi apresentada na introdução.

$$\dot{\Psi} = \frac{v}{R} \quad (2.4)$$

A distância total do percurso é obtida multiplicando-se o comprimento da circunferência pelo número de voltas realizadas.

$$D = 2\pi R \cdot (\text{número de voltas}) \quad (2.5)$$

A velocidade será obtida pelo o cálculo da velocidade média desenvolvida no percurso.

$$v = \frac{D}{\Delta t} \quad (2.6)$$

O erro em porcentagem entre o valor teórico, calculado pela Equação 4, e pelo obtido com o sensor do IMU será dado pela Equação 2.7.

$$\text{erro} = \frac{\text{medido} - \text{teórico}}{\text{teórico}} \cdot 100 \quad (2.7)$$

Para a realização dos testes, o IMU foi fixado no veículo de um dos membros da equipe, de modo a mantê-lo o mais imóvel possível e minimizar o efeito de vibrações que poderiam comprometer as medições. Até o momento, não foi possível testar o sensor no protótipo da equipe Fórmula Tesla UFMG.

Como orientação ao piloto, foi informado que não seria necessária uma alta velocidade, entretanto, seria importante manter uma velocidade constante e evitar o uso do freio. Os testes foram realizados nas rotatórias da própria UFMG, e os resultados serão apresentados a seguir.

3 TESTE

A configuração do IMU encontra-se na Tabela 1. Os fatores de escala devem ser multiplicados pelos dados crus do IMU salvos nos CSVs (somente o giroscópio nesse caso).

Tabela 1 – Configuração do IMU.

Parâmetro	Valor
Fator de escala do acelerômetro	0,244 / 1000
Fator de escala do giroscópio	70 / 1000
Eixo de análise	Z (giroscópio)
Alimentação	GLV de Pilha (16V)

O primeiro teste realizado foi na rotatória da INOVA, próximo do CPH. Nesse sentido, vale destacar que a via não era asfaltada o que gerou trepidações. Já o segundo teste foi realizado na rotatória da reitoria que é asfaltada. A Figura 3 mostra o mapa das rotatórias de teste.

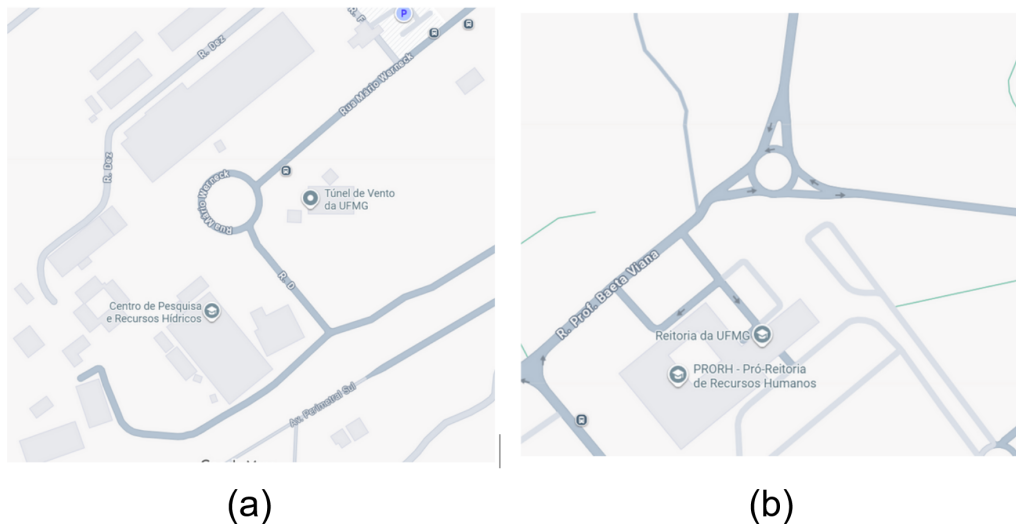


Figura 3 – Rotatórias de teste: (a) primeiro teste próximo do INOVA (CPH) e (b) segundo teste próximo da reitoria .

Os dados dos testes estão apresentados na Tabela 2. A distância total foi calculada utilizando a Equação 2.5 e a velocidade média a Equação 2.6.

Tabela 2 – Resultados dos Testes nas Rotatórias.

	INOVA	REITORIA
Raio (m)	15	7,25
Tempo (s)	187	25
Número de voltas	5	2
Distância total (m)	565,4866	91,357
Velocidade média (m/s)	3,0239	3,654

Os dados obtidos no teste podem ser acessados pelo Git da equipe Fórmula Tesla UFMG https://github.com/Tesla-UFMG/Data-Analysis/tree/master/data/validacao_imu_volta.

4 RESULTADOS

A Tabela 3 mostra os valores de taxa de guinada e erro calculados nos testes.

Tabela 3 – Cálculo da taxa de guinada e do erro

	INOVA	REITORIA
Taxa de guinada teórico (graus/s)	11,55	28,8
Taxa de guinada IMU (graus/s)	14,2	30,88
erro (%)	22,9	7

Vale destacar que o erro observado no teste realizado no INOVA pode ser atribuído ao grande número de voltas, uma vez que a velocidade tende a variar mais ao longo do percurso, além do pavimento, que introduz ruído adicional na medição. Ao considerar apenas uma janela correspondente a uma única volta e refazer os cálculos, obtém-se os dados da Tabela 4

Tabela 4 – Cálculo da taxa de guinada e erro considerando apenas uma volta

Parâmetro	INOVA (1 Volta)
Raio (m)	15
Tempo (s)	26
Número de voltas	1
Distância total (m)	94,247
Velocidade média (m/s)	3,624
Taxa de guinada teórico (graus/s)	13,846
Taxa de guinada IMU (graus/s)	14,1
erro (%)	1,83

5 CONCLUSÃO

O sensor da IMU mostrou-se bastante preciso e confiável. Vale destacar, porém, que a aplicação de um filtro sobre sua medição é recomendada para atenuar o ruído, uma vez que a componente integral do controlador da vetorização de torque tende a acumular esses erros ao longo do tempo.

6 APÊNDICE

Gráficos relevantes aos testes estão exibidos no Apêndice abaixo.

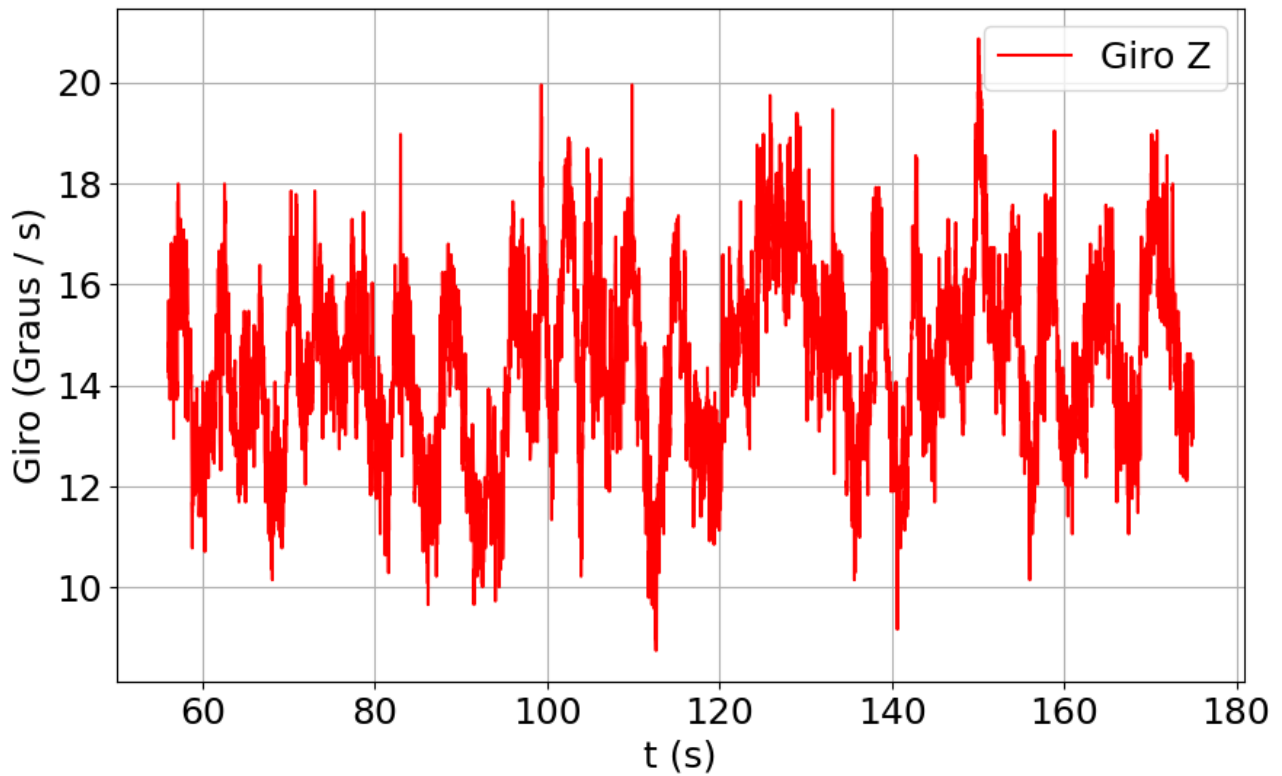


Figura 4 – A análise considera as cinco voltas completas na rotatória da INOVA. O processamento retorna dois valores, o primeiro correspondente à taxa de guinada média em graus por segundo (graus/s) e o segundo em radianos por segundo (rad/s).

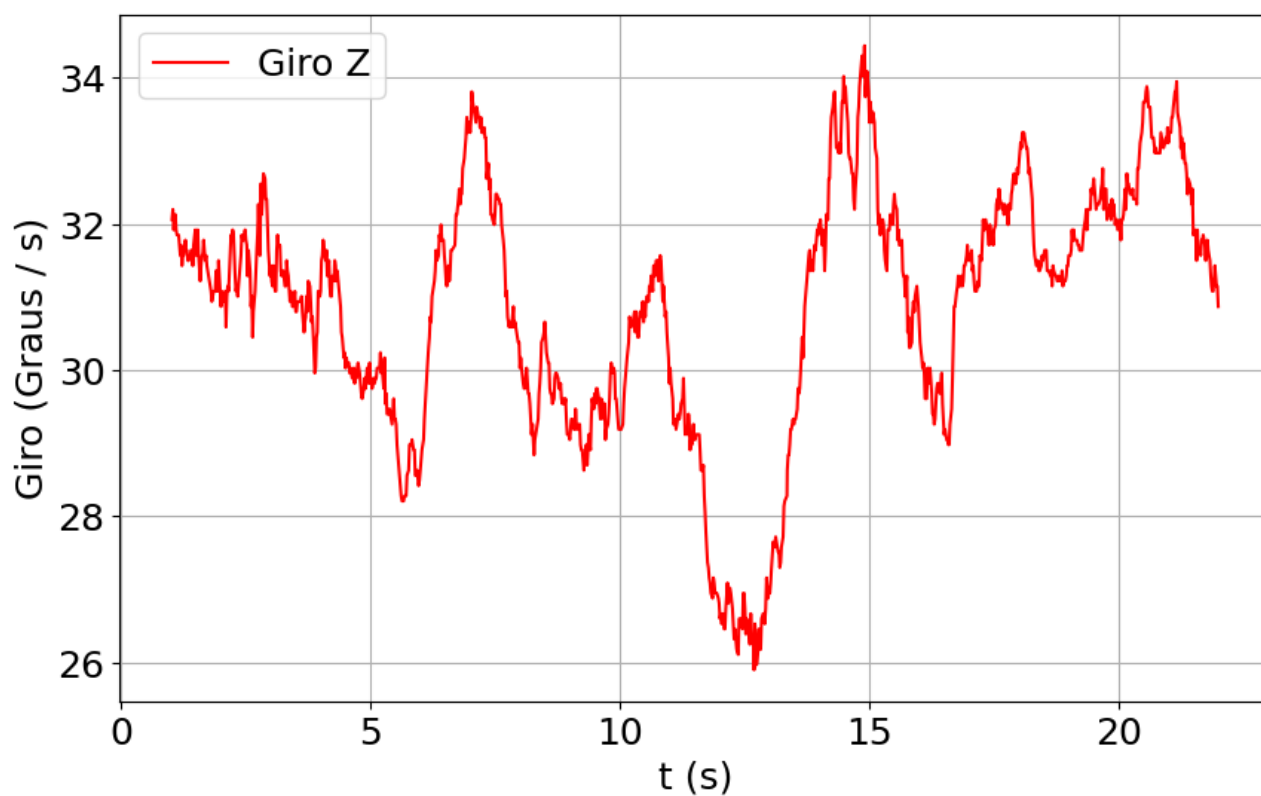


Figura 5 – A análise considera as duas voltas na rotatória da reitoria. O processamento retorna dois valores, o primeiro correspondente à taxa de guinada média em graus por segundo e o segundo em radianos por segundo.

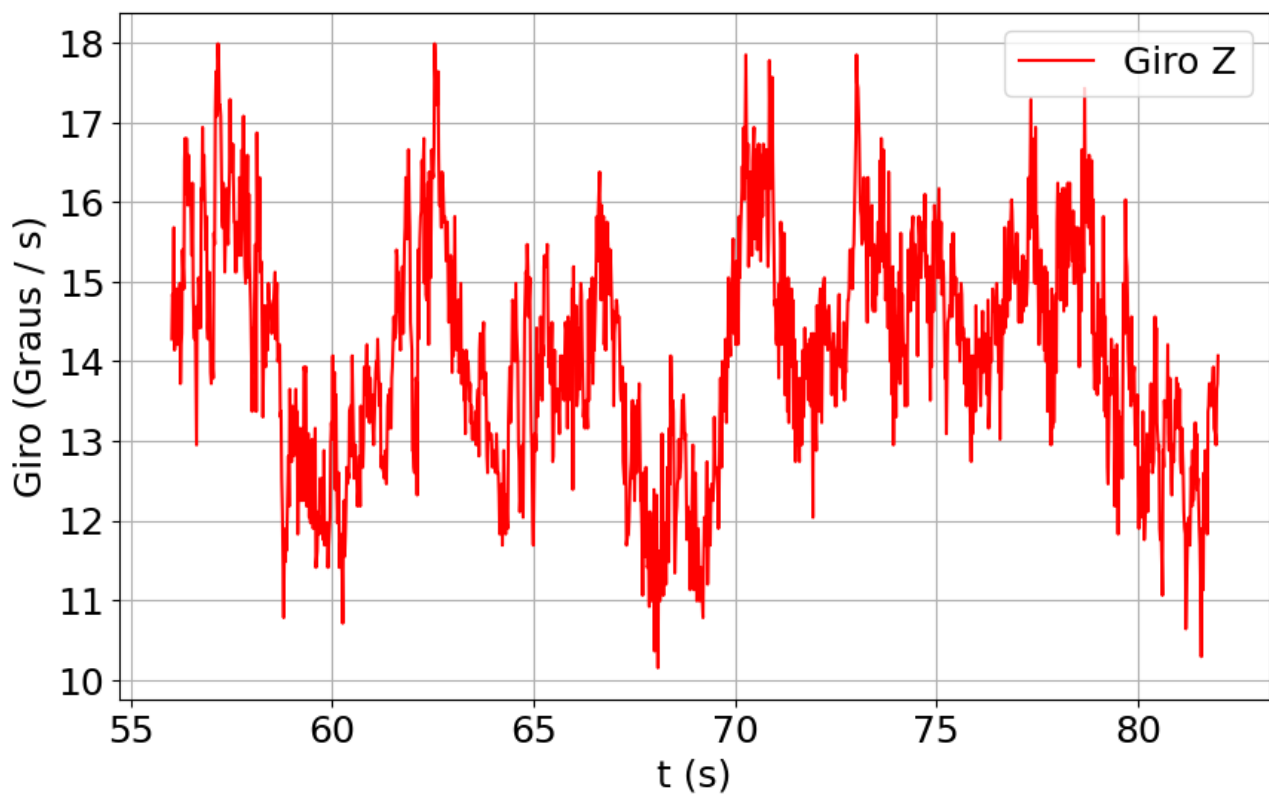


Figura 6 – A análise considera apenas uma volta completa na rotatória da INOVA. O processamento retorna dois valores, o primeiro correspondente à taxa de guinada média em graus por segundo (graus/s) e o segundo em radianos por segundo (rad/s).

