



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
FÓRMULA TESLA



Relatório: GNSS

Primeira Versão

Autores:

Raphael Henrique Braga Leivas

Belo Horizonte

19/12/2025

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
2	REQUISITOS DE PROJETO	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1	Antenas Patch Cerâmicas	4
3.2	Circuitos RF	5
4	METODOLOGIA	7
4.1	Revisão da Literatura	7
4.2	Especificação da Antena	7
4.3	Projeto do Circuito	7
4.4	Design da PCB	7
5	TESTE	8
6	RESULTADOS	10
7	CONCLUSÃO	11
8	APÊNDICE	12

1 INTRODUÇÃO

O subsistema da Aquisição de Dados surgiu no final de 2018 com o objetivo de coletar e armazenar dados importantes para o estudo do carro e que podem guiar melhorias nos projetos de todos os outros subsistemas. Dessa forma, os demais projetos da equipe podem ser validados e é possível obter um maior entendimento do funcionamento do carro durante os testes e provas dinâmicos.

Nesse sentido, o projeto do GNSS visa aquisitar as coordenadas geográficas do carro ao longo do tempo, de modo que as demais variáveis podem ser estudadas não somente em função do tempo, mas também em função da localização geográfica do carro. Assim, espera-se que perguntas como as abaixo podem ser respondidas:

- Qual a curva que apresentou maior estresse mecânico nas estruturas? (Extensometria + GNSS)
- Como está o perfil de descarga das células do acumulador a cada volta completa? (BMS + GNSS)
- Se foi detectado um comportamento inesperado do carro pelo piloto em uma curva específica, é possível analisar as variáveis do carro exatamente durante essa curva, uma vez que as variáveis estão em função da coordenada geográfica.

Todas essas perguntas poderiam ser respondidas se for possível construir uma tabela como a Tabela 1:

Tabela 1 – Uso das coordenadas geográficas na análise.

Timestamp	Latitude	Longitude	Corrente Shunt (A)	Tensão Acumulador (V)	...	Velocidade (km/h)
17855484156	-19.244548	-43.5658115	125	79.8	...	15.7
17855484166	-19.244548	-43.5658115	119	79.8	...	14.5
17855484176	-19.244549	-43.5658117	110	79.8	...	14.0
17855484189	-19.244549	-43.5658119	110	79.7	...	13.9

2 REQUISITOS DE PROJETO

Nesse contexto, o objetivo do projeto é desenvolver uma PCB que extrai as coordenadas geográficas do carro e as escreva no barramento CAN com os seguintes requisitos:

R1: Taxa de amostragem de 5 a 10 Hz;

R2: Erro máximo de medição de 5 metros;

R3: Posicionamento protegido de água e fatores ambientais externos

R1 surge da seguinte análise. Suponha que o carro está andando em linha reta a $V = 50$ km/h. Nesse caso, o carro percorre 14 metros a cada 1 segundo. Considerando que o carro tem aproximadamente 3 metros de comprimento, é interessante que seja extraído a posição no mínimo a cada um comprimento do carro. Assim, amostrando-se a 5 Hz, extrai-se a coordenada do carro a cada 2.8 metros, e é definido essa taxa como a frequência mínima de amostragem do GNSS.

R2 vem do fato de que a pista em que o carro se desloca tem aproximadamente 4 metros de largura. Assim, com um erro de um raio de 5 metros ainda é possível posicionar o carro na pista, realizando a análise da motivação.

Por fim, R3 surge da prova do rain test, e para a antena e PCB não estejam muito expostas ao vento e fatores ambientais quando o carro estiver se deslocando a altas velocidades.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Sinais de GNSS são sinais de 1.5 GHz extraídos de antenas. Por serem de alta frequência, temos que estudar práticas de circuitos de RF (Radio Frequency) para garantir o funcionamento correto do circuito. Além disso, sinais de GNSS são muito fracos, o que exige cuidados adicionais no projeto do circuito.

Toda a fundamentação teórica está baseada nos seguintes documentos principais:

- Manual do Hardware do Teseo-LIV3f da ST: https://drive.google.com/file/d/1f-_5UErfYuVgv-IKlNlQNE1Cbe42LFDT/view?usp=drive_link
- White Paper de boas práticas para layout de circuitos de RF: https://drive.google.com/file/d/17EAXY1Gev_J_ZbgDPay-ZY9WCtNQap2y/view?usp=drive_link
- Guia da ST para circuitos RF: https://drive.google.com/file/d/15d90DjYcKH08I-ajw5/view?usp=drive_link
- Tese de análise de antenas de patch cerâmica: https://drive.google.com/file/d/1AVxLt7DhbOgQ1vpqmCdneyk6QVYBsWJfR/view?usp=drive_link

Um White Paper é um documento publicado por uma empresa que aborda os detalhes técnicos de como um determinado produto é desenvolvido, sendo assim uma excelente fonte de informações para a equipe.

3.1 Antenas Patch Cerâmicas

A antena patch cerâmica é um tipo de antena de microfita compacta, formada por um elemento metálico (patch) sobre um substrato cerâmico de alta permissividade dielétrica e um plano de terra na face oposta. A estrutura básica está exibida na Figura 1.

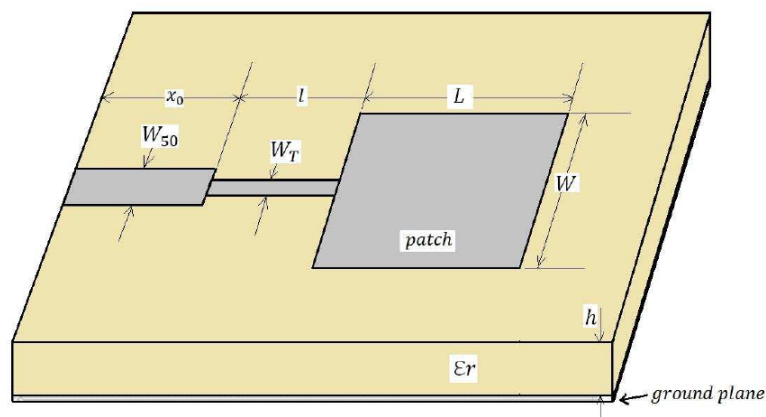


Figura 1 – Antena Patch Cerâmica.

A partir dos valores da estrutura física da antena, ela apresenta uma determinada resposta em frequência, de modo que ela consegue capturar e transmitir sinais em uma faixa de frequência específica. No caso do GNSS, a antena deve ser projetada para operar na faixa de 1.5 GHz, que é a frequência em que os sinais de satélites GNSS são transmitidos.

A Figura 2 mostra a resposta em frequência de uma antena patch cerâmica típica para GNSS. Note que ela opera apenas na faixa de interesse de 1.5 GHz em que os satélites enviam os sinais. Além disso, esse comportamento evita interferência de outros sinais em frequências diferentes, como o LoRa que opera em 900 MHz.

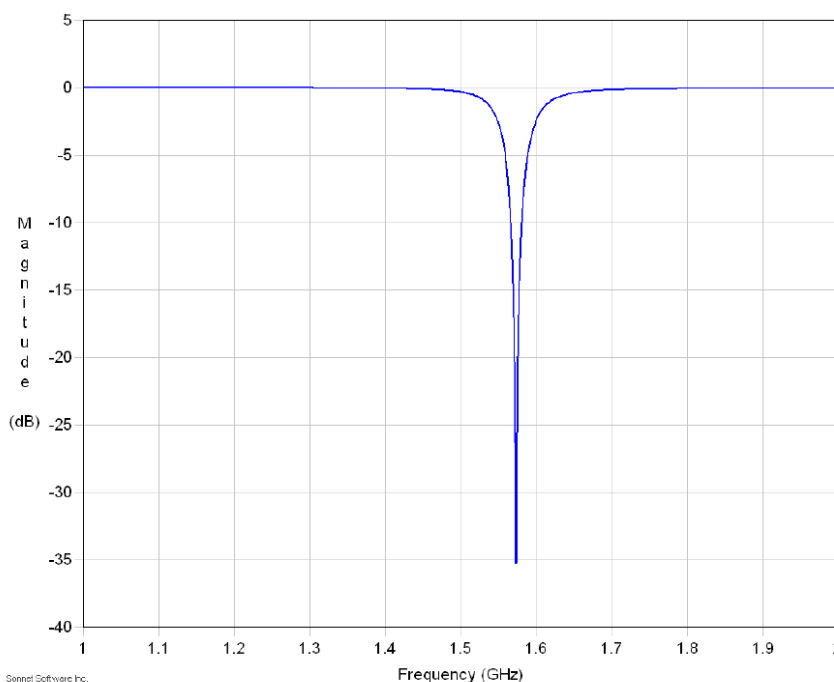


Figura 2 – Resposta em frequência de uma antena patch cerâmica para GNSS.

Antenas de patch cerâmicas podem ainda ser classificadas como ativas ou passivas:

- Ativas: apresentam amplificador LNA embutido na antena, de modo que o sinal enviado à placa já chega amplificado, e basta enviá-lo a um módulo GNSS (no nosso, caso, o Teseo-LIV3f) através de um filtro pi (será explicado mais a frente).
- Passivas: não possuem amplificador embutido, de modo que o sinal deve ser amplificado na própria placa antes de chegar ao módulo GNSS.

O amplificador LNA comumente usado é o MAX2659 <https://www.digikey.com.br/pt/products/detail/analog-devices-inc-maxim-integrated/MAX2659ELT-T/2062078>. No seguinte link uma antena de patch cerâmica ativa é desmontada, exibindo o circuito interno que amplifica o sinal <https://www.youtube.com/watch?v=s-jFprdDcM4>.

3.2 Circuitos RF

Uma série de cuidados devem ser tomados no projeto de circuitos RF, listados abaixo:

-

4 METODOLOGIA

4.1 Revisão da Literatura

Inicialmente, foi desenvolvido um estudo sobre o projeto realizado na temporada de 2025, junto a uma pesquisa sobre o protocolo de comunicação CAN e conversas com ex-membro. Nessa fase, todas as fontes de pesquisa foram documentadas em um relatório bibliográfico.

A partir disso, têm-se um entendimento dos componentes necessários para a montagem da placa e os desafios que serão enfrentados durante o seu desenvolvimento. Além disso, uma projeção financeira foi realizada a partir dos componentes apresentados no projeto anterior.

4.2 Especificação da Antena

4.3 Projeto do Circuito

Em seguida, os circuitos do projeto serão desenvolvidos e simulados no software *LTspice*, designado para simular circuitos eletrônicos. Nessa etapa, calcula-se uma alteração nos componentes e circuitos da IsoCAN 2025, e também, um entendimento da causa de não conclusão da placa. Essas mudanças serão documentadas em um relatório técnico.

4.4 Design da PCB

Logo após o dimensionamento, o esquemático dos circuitos será feito através da plataforma *EasyEDA*, no qual também será realizado o design da placa de circuito impresso (PCB) com 2 camadas (layers). Nessa etapa, também será desenvolvido um relatório parcial da IsoCAN.

5 TESTE

A configuração do IMU encontra-se na Tabela 2. Os fatores de escala devem ser multiplicados pelos dados crus do IMU salvos nos CSVs (somente o giroscópio nesse caso).

Tabela 2 – 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 3. A distância total foi calculada utilizando a Equação ?? e a velocidade média a Equação ??.

Tabela 3 – 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.

6 RESULTADOS

A Tabela 4 mostra os valores de taxa de guinada e erro calculados nos testes.

Tabela 4 – 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 5

Tabela 5 – 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

7 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.

8 APÊNDICE

Gráficos relevantes aos testes estão exibidos no Apêndice abaixo.

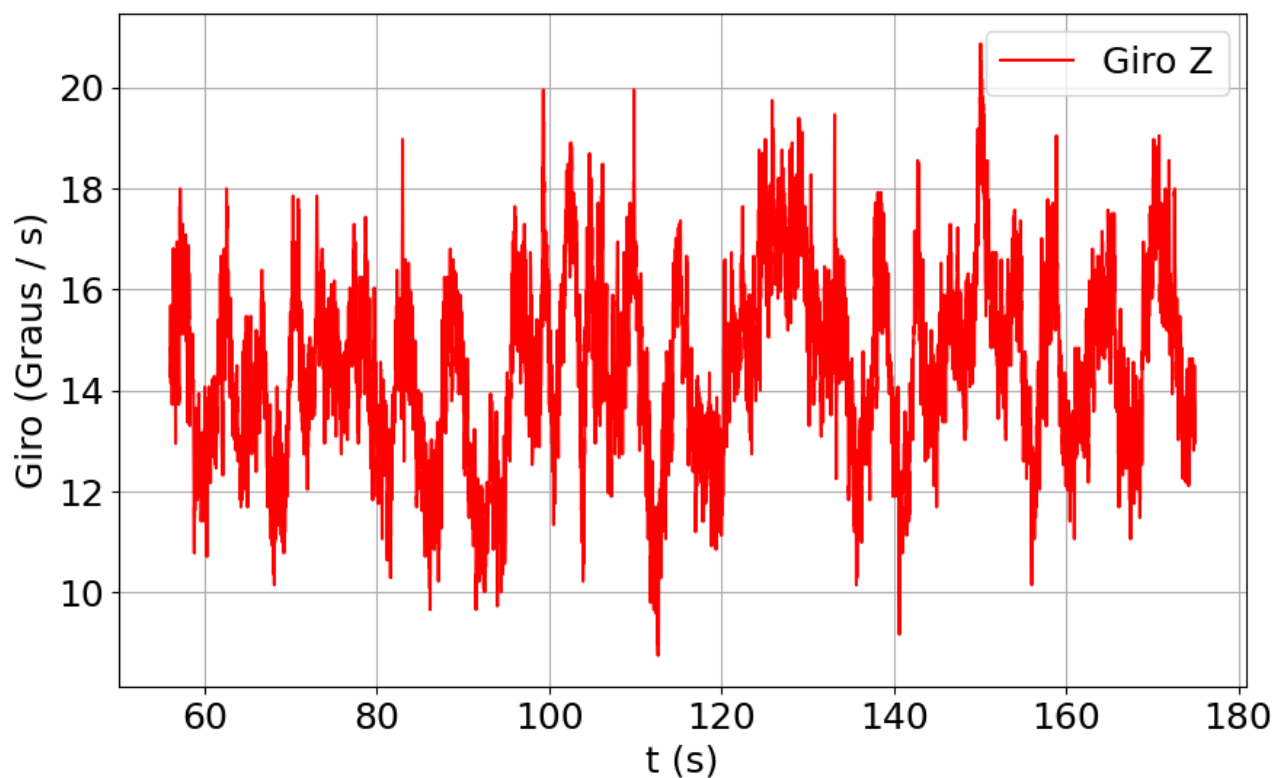


Figura 4 – A análise considera as cinco voltas completas na rotatória da INOVA. O processamento retorna dois valores, o primeiro correspondente à taxa de guinada média em graus por segundo (graus/s) e o segundo em radianos por segundo (rad/s).

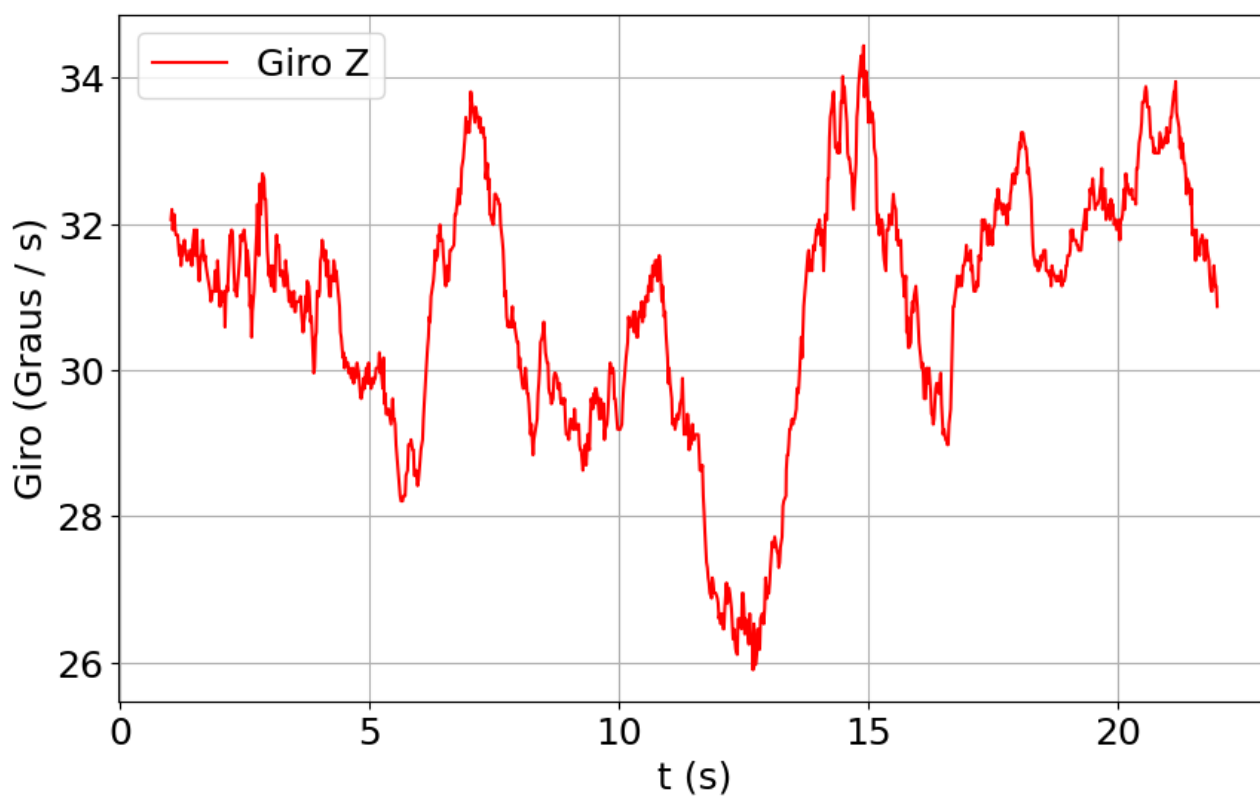


Figura 5 – A análise considera as duas voltas na rotatória da reitoria. O processamento retorna dois valores, o primeiro correspondente à taxa de guinada média em graus por segundo e o segundo em radianos por segundo.

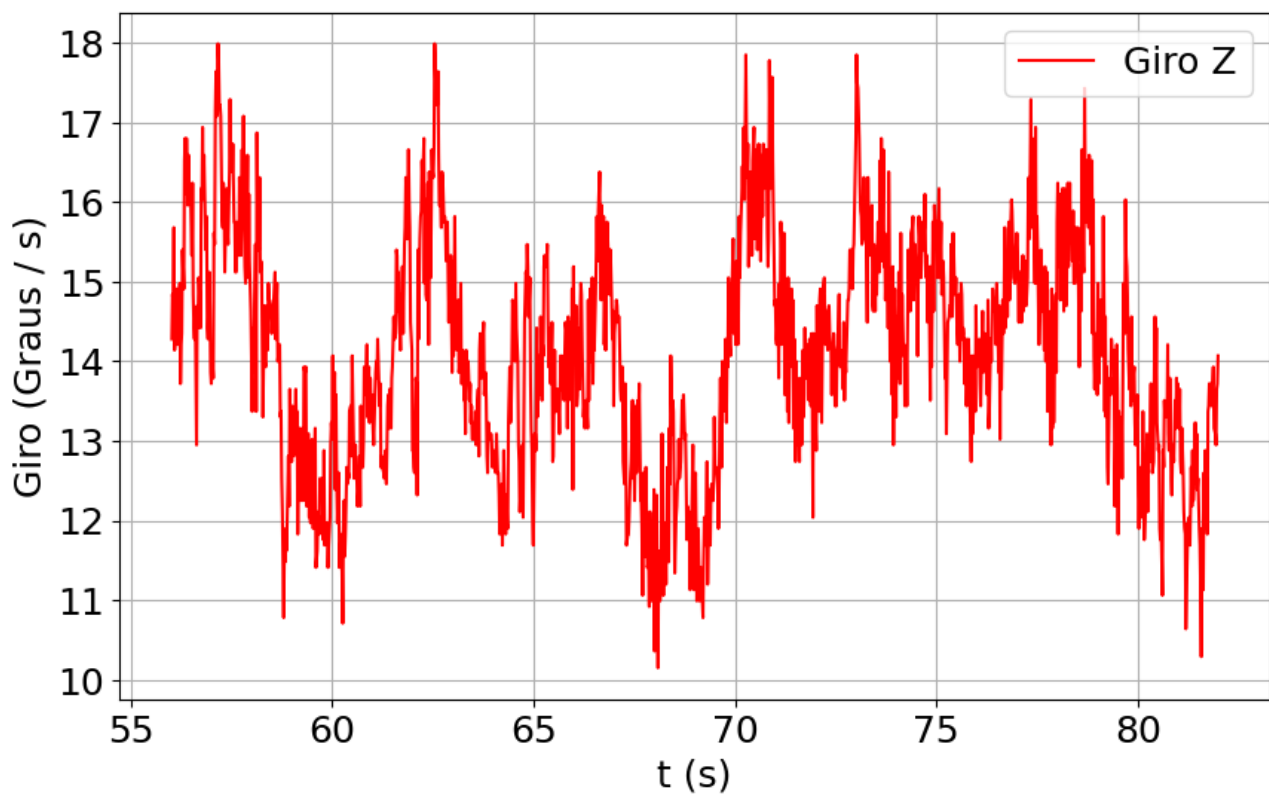


Figura 6 – A análise considera apenas uma volta completa na rotatória da INOVA. O processamento retorna dois valores, o primeiro correspondente à taxa de guinada média em graus por segundo (graus/s) e o segundo em radianos por segundo (rad/s).

