



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
3.2.1	Impedância característica de trilhas	6
3.2.2	Plano de terra	6
4	PROJETO	8
4.1	Esquemático	8
4.2	PCB	10
4.2.1	Circuitos RF	10
4.2.2	Demais Circuitos	12
4.3	Software	12
4.3.1	STM32U5	12
4.3.2	Configurações do Teseo-LIV3f	13
4.4	Posicionamento no Carro	13
4.5	Bill of Materials	14
5	RESULTADOS	16
5.1	Precisão	16
5.2	Interferência de Fibra de Vidro	17
5.3	Comparação com a Núcleo GNSS da ST	17
6	CONCLUSÃO	18

1 INTRODUÇÃO

O subsistema de 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 dinâmicas.

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

- Qual foi 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 for 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 extraia 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 contra água e outros fatores ambientais externos

R1 surge da seguinte análise. Suponha que o carro está se deslocando em linha reta a $V = 50 \text{ km/h}$. Nesse caso, o carro percorre 14 metros a cada 1 segundo. Considerando que o carro tem aproximadamente 3 metros de comprimento, é interessante que a posição seja extraída no mínimo a cada comprimento do carro. Assim, amostrando-se a 5 Hz, extrai-se a coordenada do carro a cada 2,8 metros, e define-se 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 até 5 metros ainda é possível posicionar o carro na pista, permitindo a análise pretendida.

Por fim, R3 surge do teste de chuva (rain test), e para que a antena e a PCB não estejam muito expostas ao vento e a outros fatores ambientais quando o carro estiver se deslocando em altas velocidades.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Sinais GNSS têm frequência em torno de 1,5 GHz e são captados por antenas. Devido à alta frequência, é necessário considerar boas práticas de projeto de circuitos de RF (radiofrequência) para garantir o funcionamento correto do sistema. Além disso, os sinais GNSS são muito fracos, o que exige cuidados adicionais no projeto da placa.

Toda a fundamentação teórica está baseada nos documentos listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais referências usadas no projeto.

Documento	URL
Manual do Hardware Teseo-LIV3f da ST	Disponível em: < Link >
Manual do Software do Teseo-LIV3f da ST	Disponível em: < Link >
White Paper de boas práticas para layout de circuitos de RF	Disponível em: < Link >
Guia da ST para circuitos RF	Disponível em: < Link >
Tese de análise de antenas de patch cerâmica	Disponível em: < Link >

Um white paper é um documento técnico publicado por uma empresa que descreve detalhes de projeto e de implementação de um produto, sendo, portanto, uma fonte útil 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 permitividade dielétrica e um plano de terra na face oposta. A estrutura básica está exibida na Figura 1.

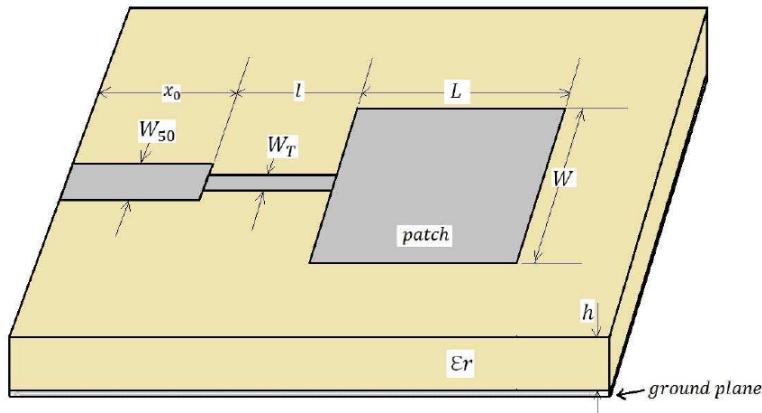


Figura 1 – Antena Patch Cerâmica.

A partir dos parâmetros físicos da antena obtém-se a resposta em frequência, que determina a faixa na qual a antena é eficiente. No caso do GNSS, a antena deve ser projetada para operar na faixa de 1,5 GHz, frequência na qual os sinais dos satélites GNSS são transmitidos.

A Figura 2 mostra a resposta em frequência de uma antena patch cerâmica típica para GNSS. Note que ela opera principalmente na faixa de interesse de 1,5 GHz. Esse comportamento reduz a recepção de sinais em outras bandas, evitando interferências de fontes como o LoRa, que opera em 900 MHz.

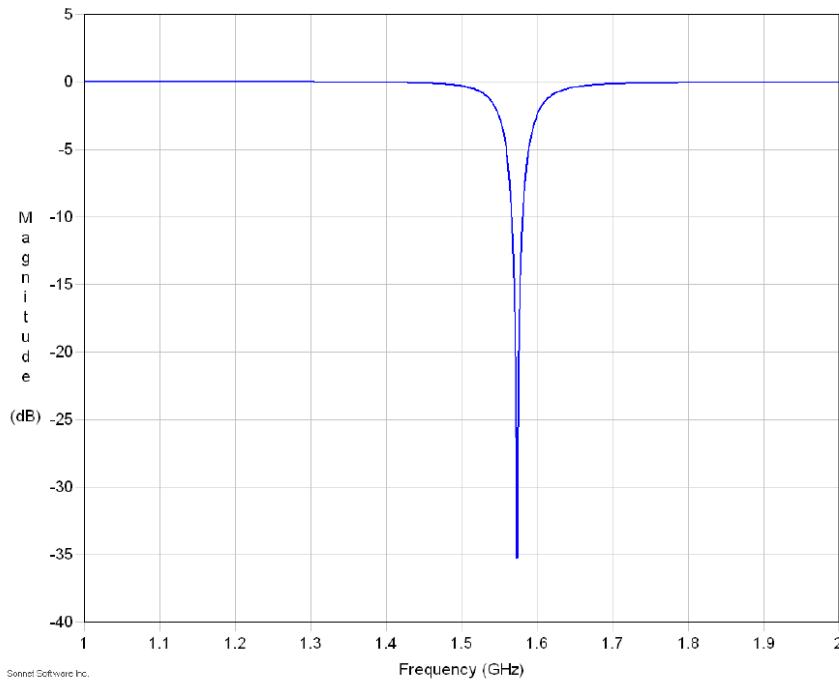


Figura 2 – Resposta em frequência de uma antena patch cerâmica para GNSS.

Antenas de patch cerâmica podem ser classificadas como ativas ou passivas:

- Ativas: apresentam amplificador LNA embutido na antena, de modo que o sinal que chega à placa já se apresenta amplificado; basta encaminhá-lo ao módulo GNSS (no nosso caso, o Teseo-LIV3f) através de um filtro pi (será explicado mais adiante).
- Passivas: não possuem amplificador embutido; o sinal deve ser amplificado na 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 link a seguir, uma antena de patch cerâmica ativa é desmontada, mostrando o circuito interno que amplifica o sinal: <https://www.youtube.com/watch?v=s-jFprdDcM4>.

3.2 Circuitos RF

Condutores que transportam sinais de alta frequência (RF) exigem cuidados específicos, pois, nessas frequências, capacitâncias e indutâncias parasitas podem afetar significativamente o desempenho do circuito.

3.2.1 Impedância característica de trilhas

A impedância característica de uma trilha é dada pela Equação (3.1):

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98h}{0.8w + t} \right) \quad (3.1)$$

onde:

- Z_0 : impedância característica da trilha (Ω)
- ϵ_r : permitividade relativa do material da PCB
- h : espessura do dielétrico (distância entre a trilha e o plano de terra) (mm)
- w : largura da trilha (mm)
- t : espessura da trilha (mm)

Para circuitos GNSS, é desejável que as trilhas de RF apresentem $Z_0 = 50 \Omega$. Como exemplo, consideremos uma trilha padrão usada pela equipe, fornecida pelo fabricante que nos patrocina. Temos os seguintes valores adotados:

- $\epsilon_r = 4.5$: varia entre 3,5 e 5,5; assumimos a média.
- $h = 1.5$ mm: altura do dielétrico para placas de duas camadas (fornecidas pelo fabricante). Se a placa fosse de quatro camadas, poderia ser $h = 0.508$ mm.
- $w = 0.254$ mm: largura de trilha padrão; pode ser ajustada no roteador (EasyEDA).
- $t = 0.35 \mu m$: espessura do condutor (valor padrão informado).

Isso resulta em $Z_0 = 129,78 \Omega$.

Por esse motivo, placas de circuito impresso (PCBs) de quatro camadas são recomendadas: a distância h entre as trilhas de RF e o plano de terra é menor, facilitando a obtenção de $Z_0 = 50 \Omega$.

Além disso, para evitar mudanças na impedância da trilha, recomenda-se que os pads dos componentes de RF tenham largura compatível com a das trilhas, evitando descontinuidades. Prefira tamanhos como 0402 ou 0603, para que a largura dos pads e das trilhas seja o mais próxima possível.

3.2.2 Plano de terra

Como visto na Equação (3.1), a impedância característica de uma trilha depende do plano de terra situado abaixo dela. Portanto, é essencial que o plano de terra seja contínuo, sem cortes, fendas ou trilhas passando imediatamente por baixo das trilhas de RF, para que a impedância característica não varie ao longo do trajeto.

Outro ponto importante são as conexões do plano de terra: recomenda-se o uso de múltiplas vias que conectem o plano superior ao inferior, de modo a reduzir a indutância e a impedância entre as camadas.

O plano de terra na camada das trilhas de RF também não deve ficar muito distante nem muito próximo às trilhas de RF. Uma regra prática é manter a distância entre o plano de terra (GND) e a trilha, no mínimo, igual à largura da trilha.

4 PROJETO

A Figura 3 mostra um diagrama de blocos com os principais componentes do projeto e sua função básica.

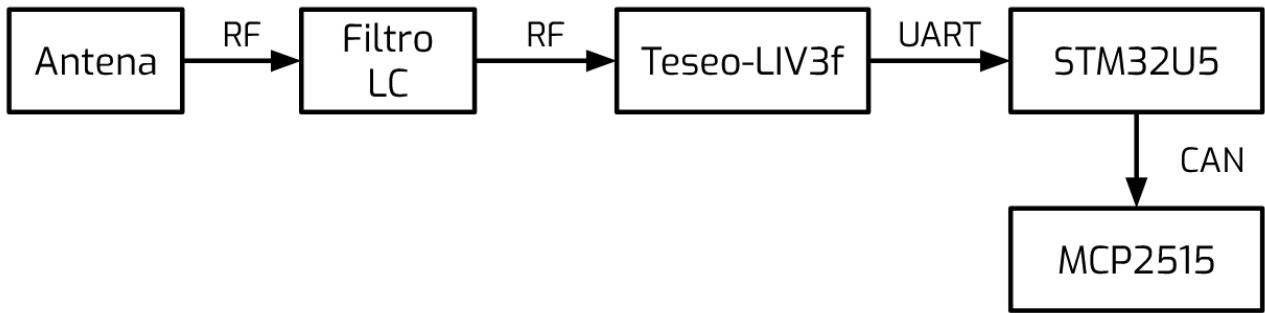


Figura 3 – Diagrama de blocos dos principais componentes da placa.

Em essência, a antena capta o sinal GNSS, que é filtrado e enviado ao módulo Teseo. O Teseo processa o sinal e envia os dados de posição ao microcontrolador STM32U5 por UART, usando o protocolo NMEA. O STM32U5 pode então encaminhar esses dados via CAN para o restante do carro através do MCP2515 conectado ao barramento CAN.

4.1 Esquemático

A Figura 4 mostra o circuito de aquisição do sinal da antena. O sinal entra pelo conector H6, um conector IPEX padrão para antenas GNSS. Em seguida, ele passa pelo filtro LC composto por L3 e C12, cujos valores estão especificados no manual do hardware da ST. O sinal VCC_RF vem do Teseo; RF_IN é o sinal de RF que entra no Teseo para ser processado pelo módulo GNSS.

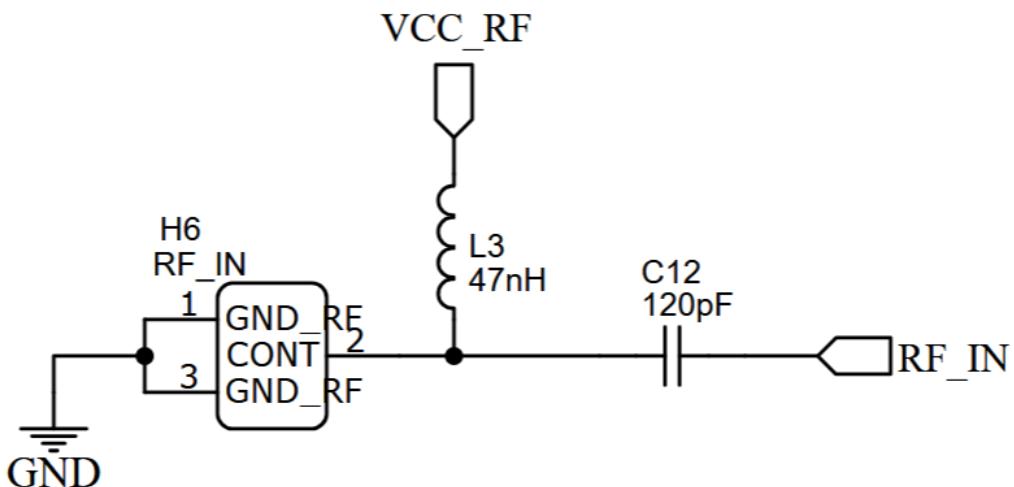


Figura 4 – Circuito de aquisição do sinal da antena.

Observe que a antena é ativa e, portanto, necessita de alimentação. Tanto a alimentação quanto o sinal passam pelo mesmo pino CONT (2) em H6. O capacitor C11 bloqueia a componente DC do sinal, de modo que apenas o sinal RF é enviado ao Teseo. O indutor L3 bloqueia a componente RF, fazendo com que apenas a componente DC seja enviada à antena para alimentá-la.

A Figura 5 mostra o circuito do Teseo projetado; novamente, ele segue quase à risca o que está prescrito no manual do hardware.

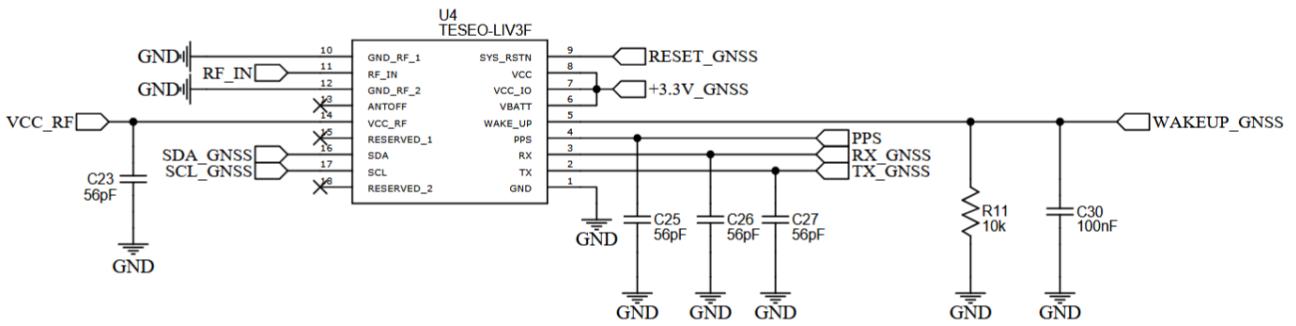


Figura 5 – Circuito do Teseo projetado.

As principais interfaces da Figura 5 estão listadas abaixo:

- VCC_RF: alimentação do sinal RF.
- RF_IN: sinal RF que entra no Teseo.
- SDA_GNSS: linha de dados I2C entre o STM e o Teseo.
- SCL_GNSS: linha de clock I2C entre o STM e o Teseo.
- RX/TX_GNSS: linhas UART entre o STM e o Teseo.
- PPS: pulso com período de 1 segundo emitido pelo módulo; pode ser usado para indicar, por exemplo, que o Teseo está operando.
- WAKEUP_GNSS: pino usado para acordar o módulo de um estado de baixo consumo (ativo em 5 V).
- RESET_GNSS: pino para resetar o Teseo (ativo em 0 V).

Note que não são necessários resistores pull-up no I2C, uma vez que eles já estão presentes internamente no Teseo. Os filtros de 56 pF estão especificados no manual.

A alimentação do Teseo usa o 3.3 V da placa, passando por um filtro pi exibido na Figura 6, especificado no manual do hardware da ST.

Os demais circuitos da placa — alimentação GLV, comunicação CAN e circuitos auxiliares do STM (capacitores de desacoplamento, botões de reset/boot, programação) — são semelhantes aos das demais placas da equipe, em particular o IMU, que também usa o STM32U5. Assim, esses circuitos não serão detalhados aqui.

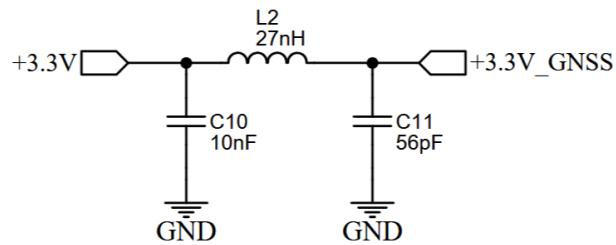


Figura 6 – Filtro para alimentação do Teseo.

4.2 PCB

4.2.1 Circuitos RF

A Figura 7 (a) mostra o layout das trilhas de RF usadas no projeto, comparado com o layout recomendado pela ST na Figura 7 (b).

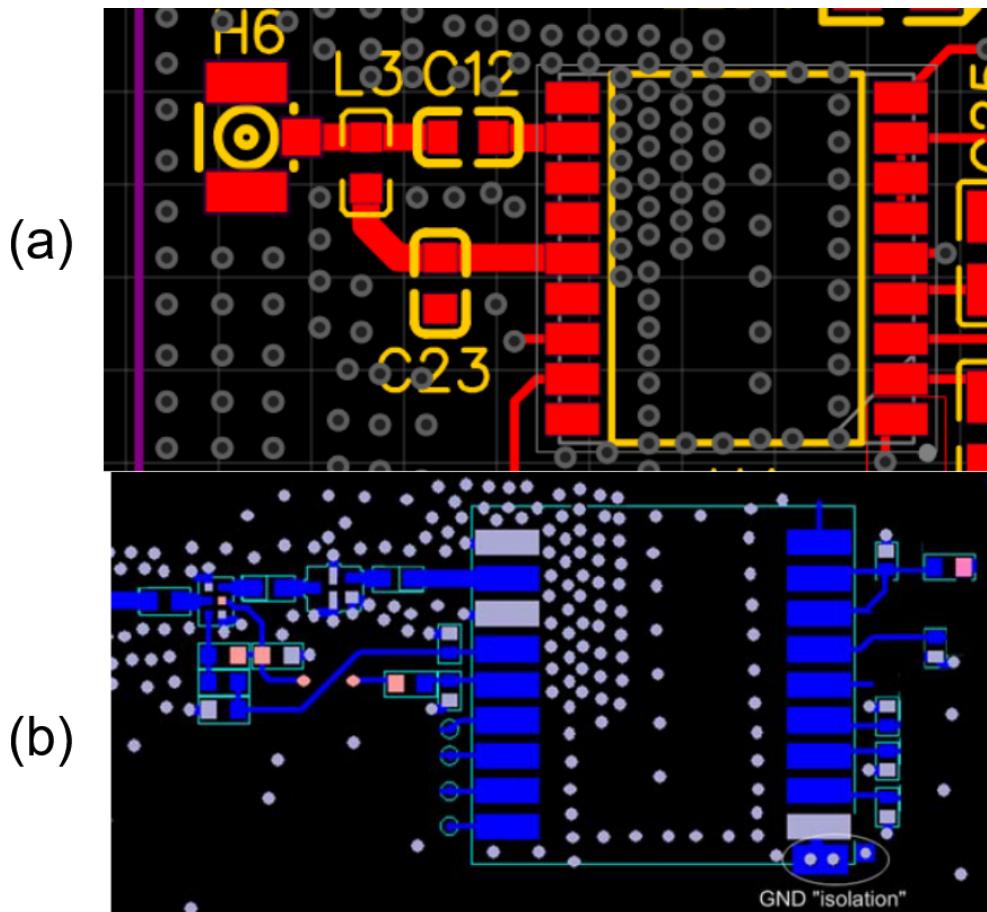


Figura 7 – Layout das trilhas de RF na placa (a) implementado e (b) recomendado pela ST.

Algumas observações importantes sobre a Figura 7:

- Os componentes das trilhas de RF estão em encapsulamento 0603, para terem largura compatível com a trilha.
- L3 está posicionado em T com a trilha, conforme sugerido no manual.

- A largura das trilhas de RF é 0,762 mm (30 mils). Isso resulta em $Z_0 = 94,2 \Omega$ para uma PCB de duas camadas (nossa caso) e $Z_0 = 55,47 \Omega$ para quatro camadas com 0,508 mm entre as camadas externas e intermediárias (cenário ideal, que não é o nosso caso, pois o patrocinador só imprime PCBs de duas camadas).
- Não há trilhas passando por baixo do Teseo, conforme recomendado.
- O posicionamento das múltiplas vias segue o layout recomendado.

A Figura 8 mostra o layout com ambos planos de GND exibidos. Mais observações importantes sobre a Figura 8 estão listadas abaixo:

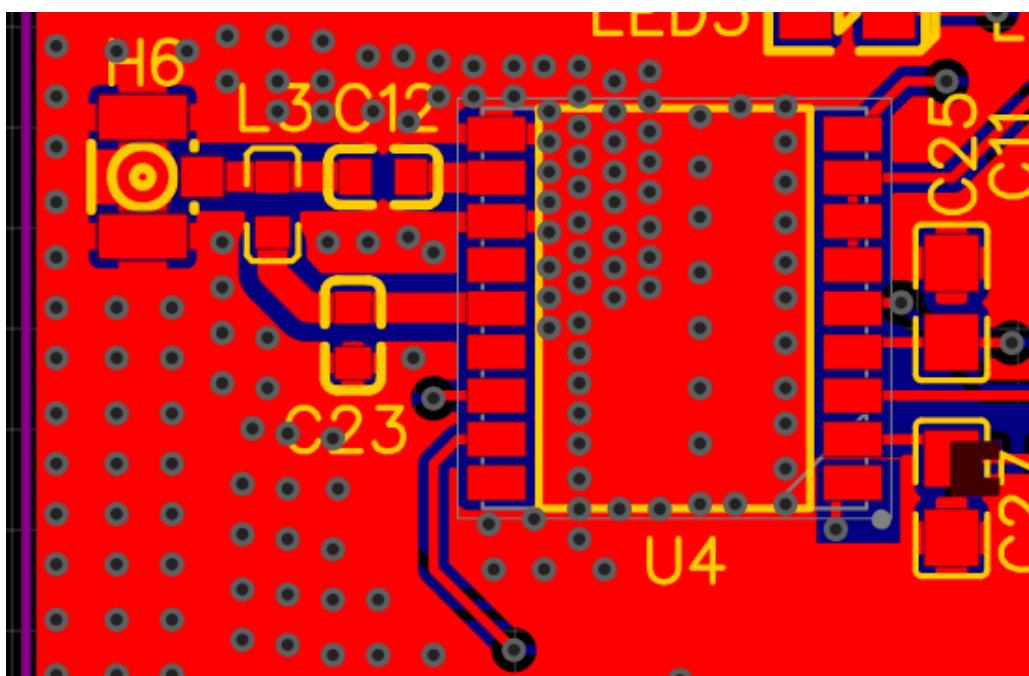


Figura 8 – Layout das trilhas de RF na placa com os planos de GND exibidos.

- Não há trilhas passando embaixo do Teseo e embaixo dos circuitos de RF, conforme recomendado
- O plano de GND na camada inferior cobre toda a área abaixo do circuito de RF de forma contínua.
- A distância entre as trilhas RF e o plano de terra na camada superior é 0,508 mm.
- A isolação no pino 1 do Teseo (canto inferior direito) é feita com apenas uma via (o manual indica que pode ser uma ou duas); foi adicionada manualmente uma região sólida de keep-out após a criação do plano de GND no EasyEDA.

Observe que as trilhas no canto direito do Teseo não são de alta frequência e, portanto, possuem largura padrão de 0,254 mm e não precisam seguir as diversas recomendações do manual.

4.2.2 Demais Circuitos

O posicionamento do restante do circuito é feito em duas camadas, ao contrário das demais placas da equipe, que em geral posicionam componentes apenas na camada superior. Componentes “altos” estão na camada superior para não atrapalharem o encapsulamento, enquanto componentes pequenos e de menor relevância estão na camada inferior para minimizar o tamanho da placa. Todos os conectores estão na camada superior, no canto direito, para facilitar o acesso dos chicotes quando a placa estiver instalada no carro.

A Figura 9 destaca os top e bottom layers da placa.

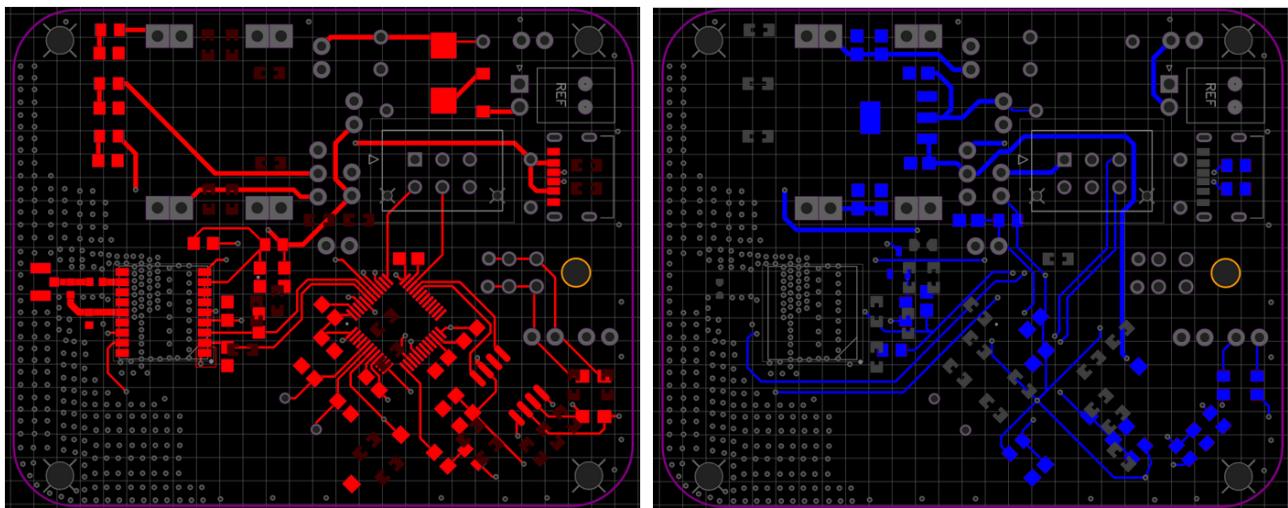


Figura 9 – Camada superior (vermelho) e camada inferior (azul) da placa.

Em suma, na camada superior estão posicionados todos os conectores, o regulador 5 V do GLV, todo o circuito RF, LEDs indicadores, a maior parte dos circuitos do STM32U5 e todos os jumpers. Na camada inferior estão posicionados o regulador 3,3 V, parte do circuito da CAN, alguns capacitores de desacoplamento do STM32U5 e capacitores de filtro da alimentação.

As trilhas de alimentação possuem largura de 20 mils (0,508 mm), enquanto as demais trilhas de sinal (exceto as de RF) possuem largura de 10 mils (0,254 mm). Note-se que a trilha de alimentação do Teseo tem 10 mils porque a corrente é baixa.

4.3 Software

4.3.1 STM32U5

O código executado pelo STM32U5 deve executar as seguintes funções.

1. Salvar as strings NMEA recebidas do Teseo via UART em um buffer
2. Processar as strings NMEA para extrair os dados de posição (latitude, longitude)
3. Atualizar uma estrutura de dados (struct) global com os dados de posição
4. Enviar os dados struct através do periférico FDCAN para o restante do carro

Com o FreeRTOS, uma tarefa pode processar as strings NMEA e atualizar a estrutura de dados global, enquanto outra tarefa periodicamente lê essa estrutura atual e a escreve no CAN. É importante que a tarefa de processamento da UART opere na mesma taxa de amostragem em que o Teseo está configurado.

As strings NMEA enviadas pelo Teseo têm o formato exibido na Figura 10. Basta criar um código em C que as processe e extraia as variáveis de latitude e longitude, bem como verifique se o fix é válido; caso contrário, a mensagem deve ser descartada.

```
$GPRMC,123242.000,A,1954.310955,04355.66349,W,0,1,0,0,190925,,A*6C
$GPGGA,123242.000,1954.310955,04355.66349,W,1,05,2.0,849.36,M,-5.7,M,,*71
$GPVTG,0,0,T,,M,0,1,N,0,1,K,A*0D
$GNGSA,A,3,11,06,24,.....,6,0,2,0,5,6*2B
$GNGSA,A,3,74,84,.....,6,0,2,0,5,6*24
$GPGSV,1,1,04,24,54,224,31,11,52,036,42,06,48,102,24,19,30,147,25*79
$GLGSV,2,1,05,85,71,011,84,49,141,30,74,45,144,34,75,23,204,*6F
$GLGSV,2,2,05,86,14,342,.....*5E
$GPGLL,1954.310955,04355.66349,W,123242.000,A,A*5C
$PSTMCPU,100.00,-1,49*7E
```

Figura 10 – Strings NMEA enviadas pelo Teseo via UART.

4.3.2 Configurações do Teseo-LIV3f

O Teseo possui uma memória interna configurável onde é possível salvar diversos parâmetros de operação, como explicado na seção 2.2.2 do manual do software. Em particular, duas configurações são importantes para atender aos requisitos do projeto:

1. Aumentar baud rate para 115200: \$PSTMSETPAR,3102,0x9
2. Aumentar taxa de amostragem para 5 Hz: \$PSTMSETPAR,1303,0.2

Os comandos acima devem ser enviados via UART para o Teseo. Eles ainda não foram testados. Se o Teseo parar de funcionar após enviar esses comandos, é possível resetar os parâmetros para os valores de fábrica com o comando: \$PSTMRESTOREPAR (não testado ainda).

4.4 Posicionamento no Carro

Devido aos componentes na camada inferior, o encapsulamento deve prever um ressalto de 5 mm nos quatro cantos, onde são colocados os parafusos (ou fitas-trava).

Em relação ao posicionamento no carro, é planejado posicionar a placa no bico do carro, perto de onde atualmente fica a placa de freio. Assim, tanto a placa quanto a antena ficarão embaixo do bico, que segundo nossos estudos, não afetará o sinal de GNSS por ser de fibra de vidro.

A Figura 11 mostra a localização da placa no chassis.

Dessa forma, os chicotes entram pelo canto esquerdo e a antena fica à direita na Figura 11. Ainda é necessário realizar testes em bancada para verificar experimentalmente se a fibra de vidro do bico efetivamente não atenua o sinal GNSS.

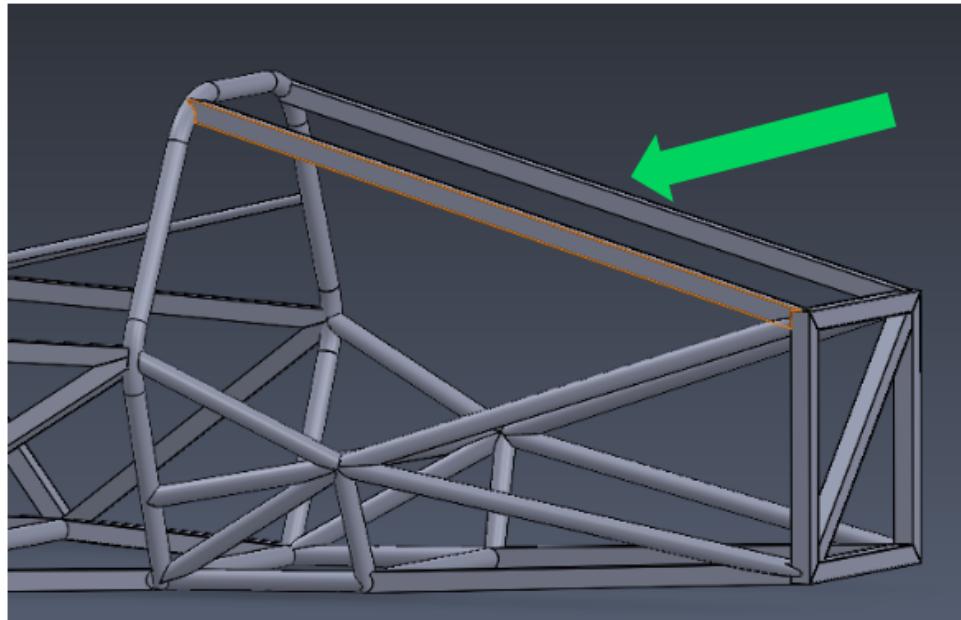


Figura 11 – Planejamento inicial do posicionamento da placa no carro.

4.5 Bill of Materials

A BOM do projeto está exibida na Tabela 3. O custo total previsto é de R\$ 97,00, sem contar os componentes patrocinados (STM32U5, Teseo e antenas) e sem considerar os custos que serão diluídos na compra conjunta com outras placas.

Tabela 3 – Bill of Materials do projeto.

Nome	Especificação	Qtd.	Preço Total (\$)
LED	LED-RED	6	0,006
Choke	CHOKE-SRF4532-1	1	0,6
Regulador 3V3	LM1117MPX-3.3v	1	0,4
Regulador 5V	Module_MP1584EN	1	3,41
Diodo	RS1M	1	0,57
Conversor CAN	MCP2515-I/SO	1	1,57
Fusível	500 mA Fuse 2410	1	0,12
Cristal	8 MHz	1	0,07
BJT	MUN2214T1G	1	0,03
C0805	1uF	5	0,046
C0805	10uF	1	0,01
C0805	22uF	1	0,02
C0805	100nF	11	0,044
C0805	10nF	1	0,006
C0805	56pF	4	0,02
C0805	4.7uF	1	0,02
C0805	22pF	2	0,02
Cap Eletrolítico	100uF / 35V	1	0,06
C0402	120pF	1	0,002
C0402	56pF	1	0,001
C0603	120pF	1	0,004
C0603	56pF	1	0,003
L0805	27nH	1	0,135
L0402	47nH	1	0,05
L0603	47nH	1	0,04
R0805	4k7	5	0,01
R0805	60R	2	0,004
R0805	10k	7	0,014
R0805	5k1	2	0,004
R0805	0R	1	0,002
Conecotor	TYPE-C 6PIN	1	0,05
Antena Conecotor	KH-IPEX	3	0,21
Botao SMD	K2-3.6×6.1	2	0,14
Jumper	PTH 2 vias	5	
Jumper	PTH 3 vias	1	
Header	PTH 2 vias	2	
Nanofit 2 x 1 90 graus	GLV	1	
Microfit 2 x 2 90 graus	CAN	1	
Nanofit 3 x 02	PROGG	1	
Header	PTH 3 x 02 vias	1	
STM32U5			(patrocínio)
Teseo-LIV3f			(patrocínio)
Antena	BT-580		24,69
Antena	BT-0001		35,00
Total			R\$ 97,00

5 RESULTADOS

Esta seção descreve testes realizados com uma placa antiga de GNSS desenvolvida pela equipe em 2020, que utiliza um circuito praticamente idêntico ao da placa projetada, mudando apenas o layout da PCB. O objetivo dos testes é validar o funcionamento do circuito e obter dados de desempenho do GNSS.

5.1 Precisão

O teste foi realizado debaixo das árvores atrás do Bloco 4, ao lado do estacionamento da Eng, em frente ao Coltec. De acordo com o Google Earth, a posição registrada foi:

- Latitude: 19° 52' 16" Sul = 19.87133 S
- Longitude: 43° 57' 46" Oeste = 43.96309 W
- Altitude: 821 m

A antena está conectada à placa verde do GNSS desenvolvida antes de 2022 (Módulo GNSS 2.0 - EasyEDA > Aquisição de Dados 2020 > Módulo GNSS 2.0 > PCB Placa GNSS 2.0), como mostra a imagem abaixo. Deixe-a com a parte rosa voltada para o céu. A Figura 12 exibe o circuito usado no teste.

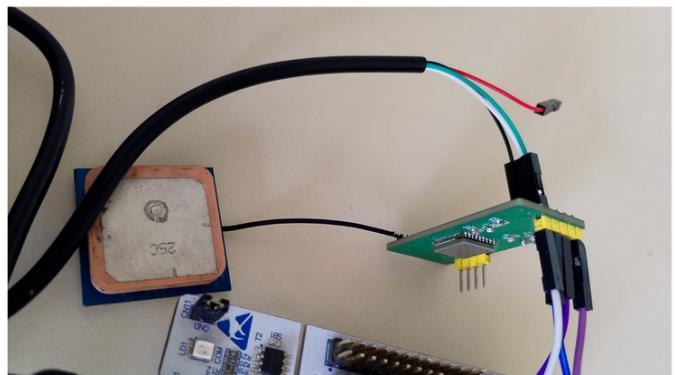


Figura 12 – Circuito de teste da placa antiga da equipe.

Mais detalhes de como reproduzir o teste encontram-se no drive da equipe: https://docs.google.com/document/d/1_DcsvIPrM15WaGMswOeWJAnK461f2M6uIb7Qwf03SD4/edit?usp=sharing.

Os resultados obtidos estão resumidos na Figura 13. Observe que esse teste já atende ao requisito R2 de precisão do GNSS.

Além disso, foi verificado que o circuito e a antena não conseguem captar os sinais dos satélites se:

	Google Earth	Obtained	Error
Latitude	19.87133 S	19.87135 S	
Longitude	43.96309 W	43.96312 W	3.8 m
Altitude	821 m	819.28 m	2.72 m

Figura 13 – Resultado obtido no teste de precisão da placa antiga.

- estiverem dentro de uma sala ou oficina;
- estiverem perto de algum prédio alto.

Por esse motivo, o teste foi realizado nas árvores do Coltec, longe de quaisquer edificações e com boa visibilidade do céu.

5.2 Interferência de Fibra de Vidro

(completar)

5.3 Comparação com a Núcleo GNSS da ST

(completar - nova nucleo só chegou ontem 19/12/25)

6 CONCLUSÃO

Tendo em vista os objetivos do projeto, foi possível projetar uma placa para adquirir as coordenadas geográficas do carro a partir de GNSS. O circuito foi concebido com base em diversas fontes e manuais, além de seguir o esquema da placa antiga da equipe, que já apresenta boa precisão em determinadas condições.

O layout proposto introduz melhorias em relação à placa antiga, com maior cuidado quanto à impedância e ao roteamento das trilhas de RF.

Mais testes são necessários para aferir a interferência da fibra de vidro e para testar efetivamente a placa completa quando a fabricação da placa for concluída e os componentes chegarem.

