



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 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 documentos exibidos 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 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.

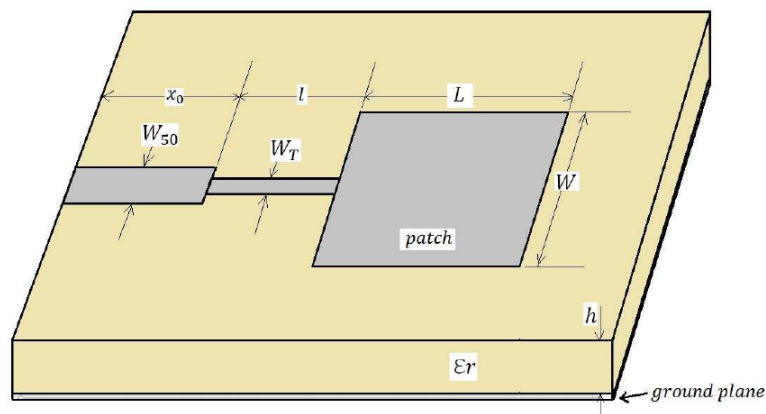


Figura 1 – Antena Patch Cerâmica.

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.

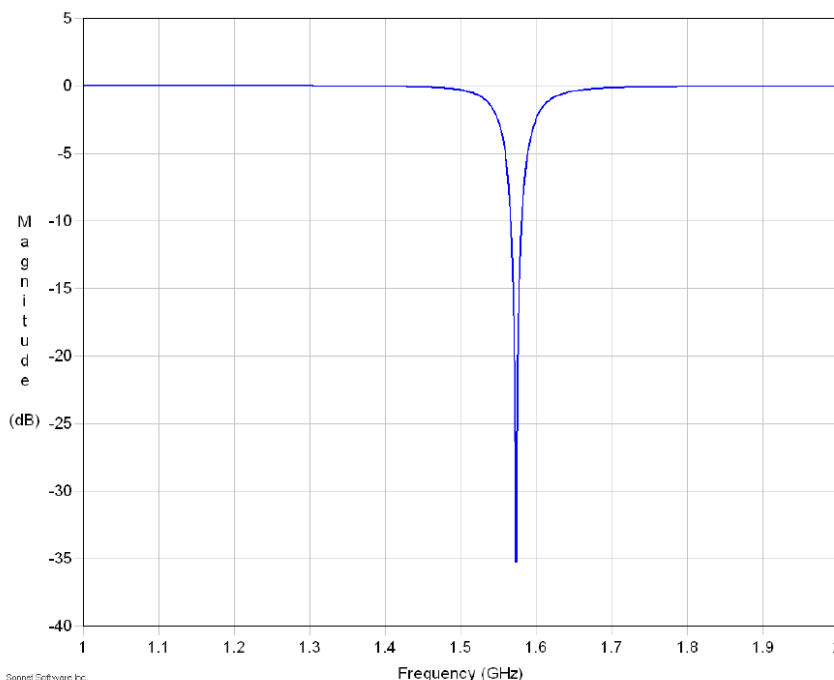


Figura 2 – Resposta em frequência de uma antena patch cerâmica para GNSS.

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

Condutores que transportam sinais de alta frequência (RF) devem tomar uma série de cuidados especiais, uma vez que nessa frequência capacitâncias e indutâncias parasitas podem afetar significativamente o desempenho do circuito.

3.2.1 Impedância Característica de Trilhas

A impedância caracterísitica 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 (Ohms)
- ϵ_r : Permissividade 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 ideal que as trilhas de RF possuam $Z_0 = 50 \Omega$. Como exemplo, considera uma trilha padrão usada pela equipe com o fabricante que nos patrocina. Temos os seguintes valores das constantes:

- $\epsilon_r = 4.5$: varia entre 3.5 e 5.5, então assumimos a média
- $h = 1.5$ mm: é altura da PCB, pois o fabricante só nos fornece PCBs de duas layers. Se tivesse PCB de quatro layers, poderia ser $h = 0.508$ mm
- $w = 0.254$ mm: largura de trilha default, podemos ajustar no EasyEDA
- $t = 0.35\mu$ m: valor padrão

o que resulta em $Z_0 = 129.78 \Omega$.

É por esse motivo que PCBs de quatro layers são recomendadas: a distância entre as trilhas de RF e o plano de terra h abaixo é menor, de modo que é mais fácil obter $Z_0 = 50 \Omega$.

Além disso, para que não exista mudanças na impedância da trilha, é recomendado que os pads dos componentes de RF sejam do mesmo tamanho da trilha, evitando descontinuidades na largura da trilha. Para isso, use 0402 ou 0603 para que a largura dos pads e trilha seja a 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 abaixo. 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 da trilha.

Outro ponto essencial são as conexões do plano de terra. Devem ser usadas várias vias conectando o plano de terra superior ao inferior, de modo que a impedância entre os planos seja minimizada.

O plano de terra na camada das trilhas de RF também não pode estar muito próximo das trilhas de RF. Uma boa regra é manter uma distância entre o plano de 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.

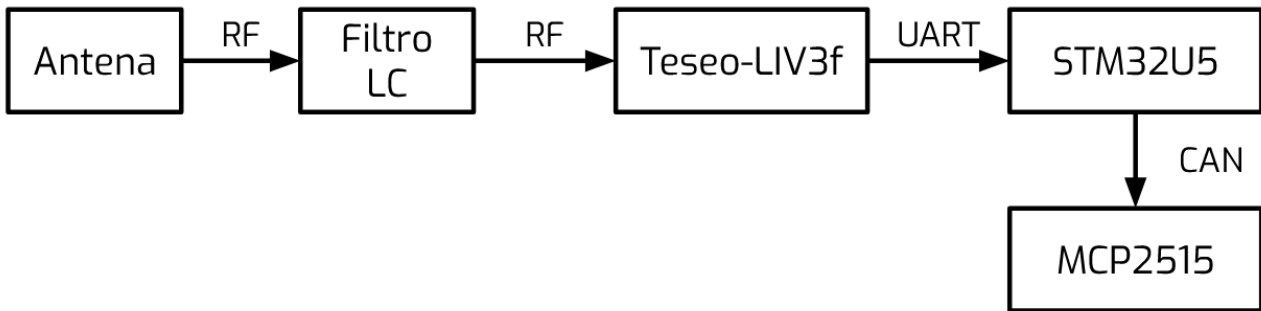


Figura 3 – Diagrama de blocos dos principais componentes da placa.

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 via UART usando o protocolo NMEA. O STM32U5 pode então enviar 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, e RF_IN é o que entra no Teseo para ser processado pelo módulo GNSS.

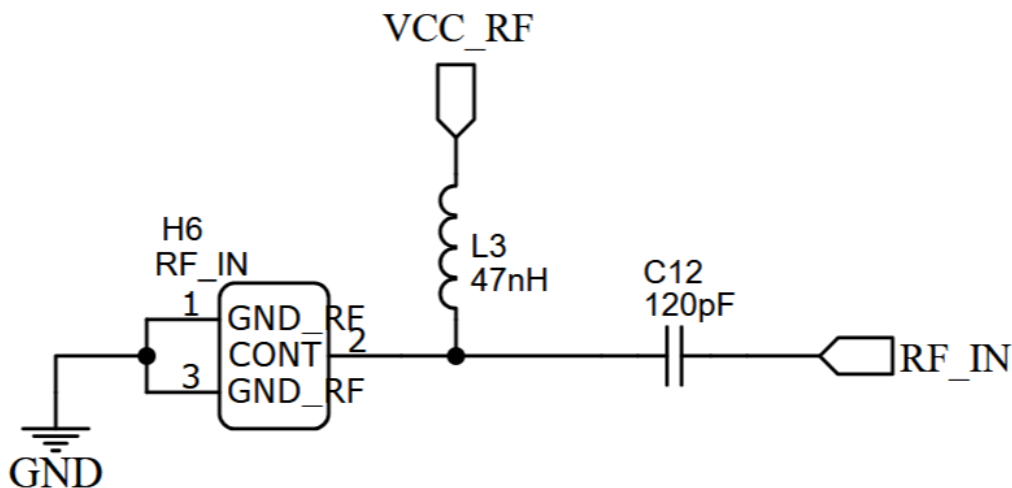


Figura 4 – Circuito de aquisição do sinal da antena.

Note que a antena é ativa, logo ela precisa 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, de modo que apenas a componente DC é enviada à antena para alimentá-la.

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

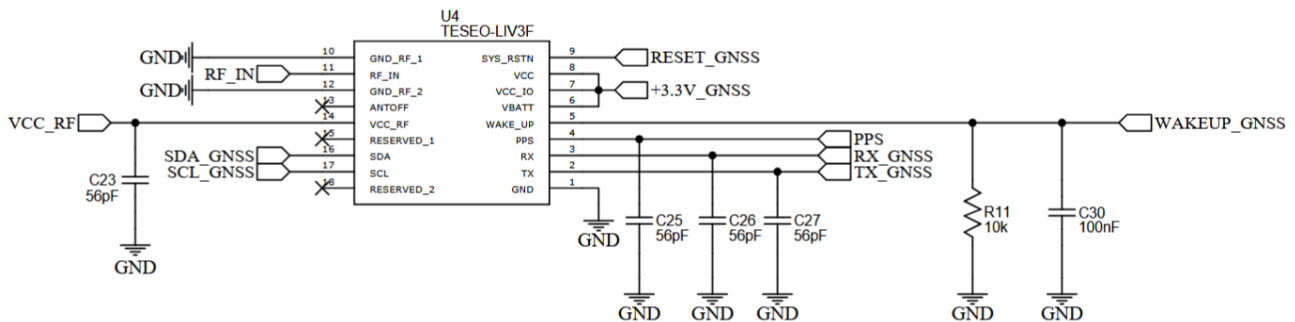


Figura 5 – Circuito do Teseo projetado.

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 de UART entre o STM e o Teseo.
- PPS: onda quadrada com período de 1 segundo emitida pelo módulo. Usada para piscar um LED, indicando que o Teseo está vivo.
- 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 é necessário 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 acoplamento, botões de reset / boot, programação) são iguais às demais placas da equipe, em particular o IMU que também usa o STM32U5. Assim, esses circuitos não serão detalhados aqui.

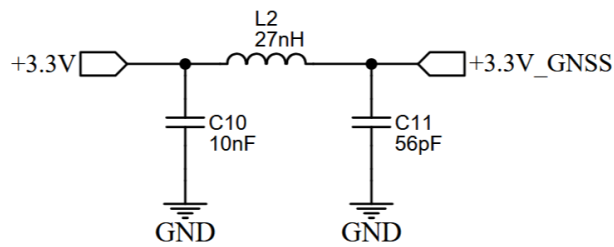


Figura 6 – Filtro para alimentação do Teseo.

4.2 PCB

4.2.1 Circuitos RF

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

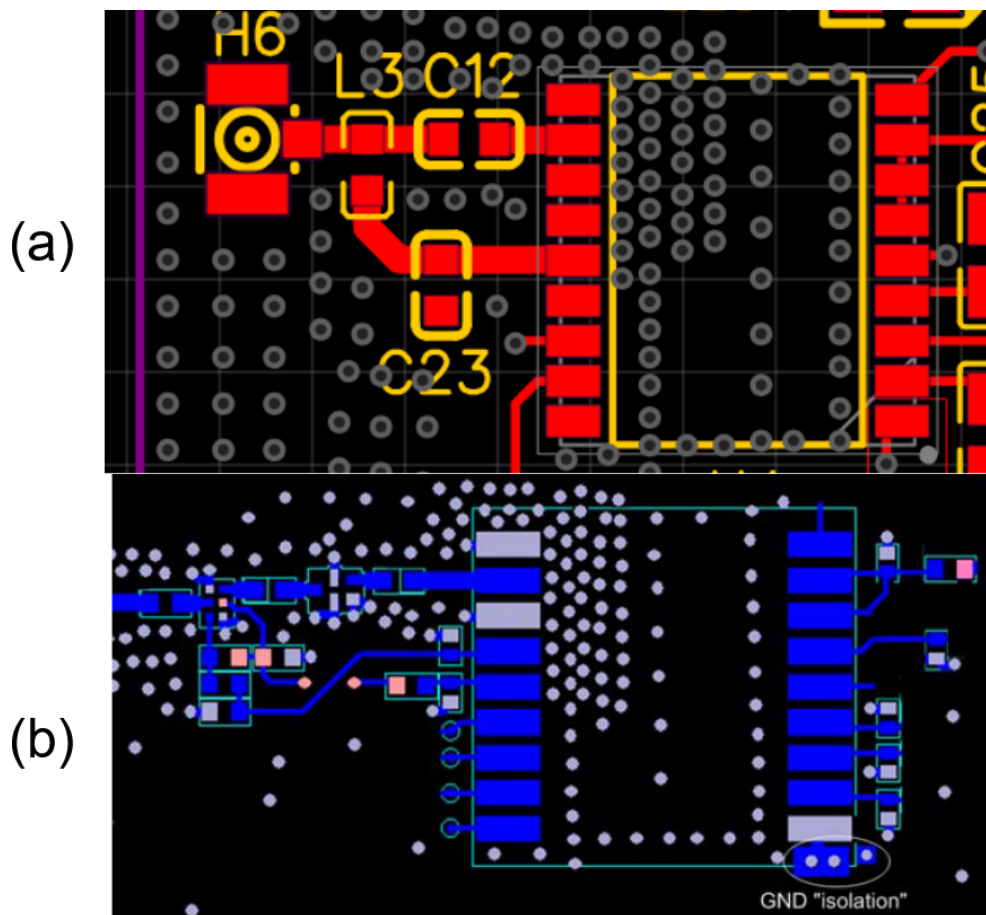


Figura 7 – Layout das trilhas de RF na placa (a) implementado e (b) recomendado pela ST.

Algumas observações importantes sobre a Figura 7:

- Os componentes das trilhas de RF são 0603 para terem a mesma largura da trilha
- L3 está posicionado em T com a trilha, como 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 layers (nosso caso) e $Z_0 = 55.47 \Omega$ para quatro layers com 0.508 mm entre as layers externas e intermediárias (cenário ideal, que não é o nosso caso pois o patrocinador só imprime PCBs de duas layers)
- Note que não há trilhas passando embaixo 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:

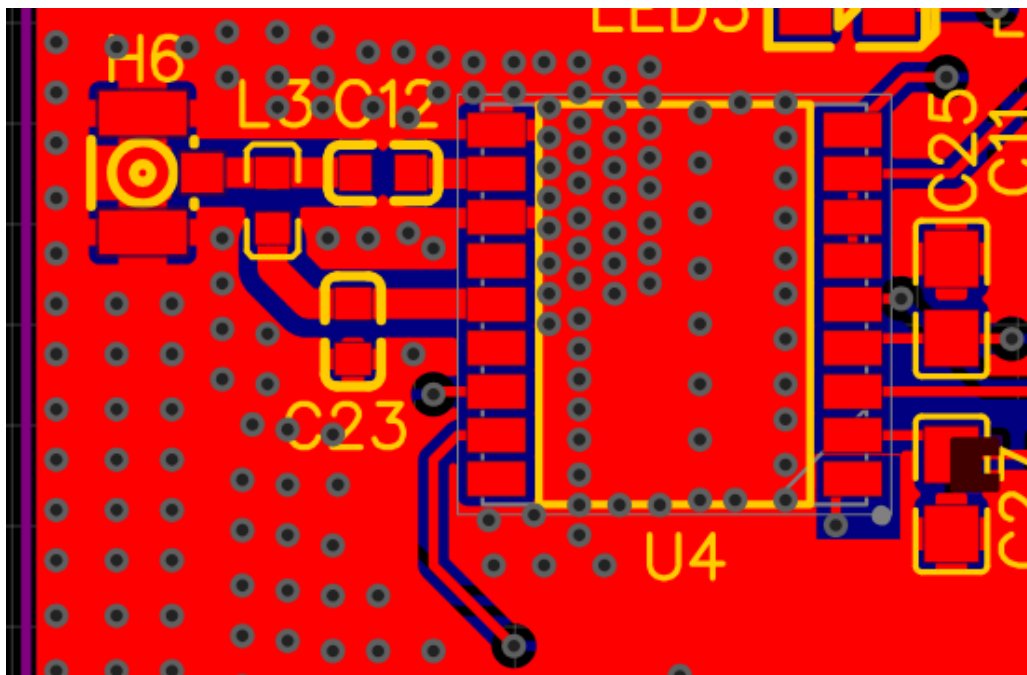


Figura 8 – Layout das trilhas de RF na placa com os planos de GND exibidos.

- Não há trilhas passando embaixo do Teseo e embaixo dos circuitos de RF, conforme recomendado
- O plano de GND no bottom layer cobre toda a área abaixo do circuito de RF de forma contínua
- A distância entre as trilhas RF e o plano de terra no top layer é 0.508 mm
- A "isolação" no pino 1 do Teseo no canto inferior direito é feita com somente uma via (manual diz que pode ser feito com uma ou duas), manualmente adicionando uma região sólida de keep-out depois que o plano de GND é feito no EasyEDA

Note que as trilhas no canto direito do Teseo não são de alta frequência, e portanto possuem largura default 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 layers, ao contrário das demais placas da equipe que em geral posicionam componentes apenas no top layer. Componentes "altos" estão no top layer para não atrapalharem o encapsulamento, enquanto componentes pequenos e de baixa relevância estão no bottom layer para minimizar o tamanho da placa. Todos os conectores estão no top layer no canto direito para facilitar o acesso dos chicotes quando a placa estiver no carro.

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

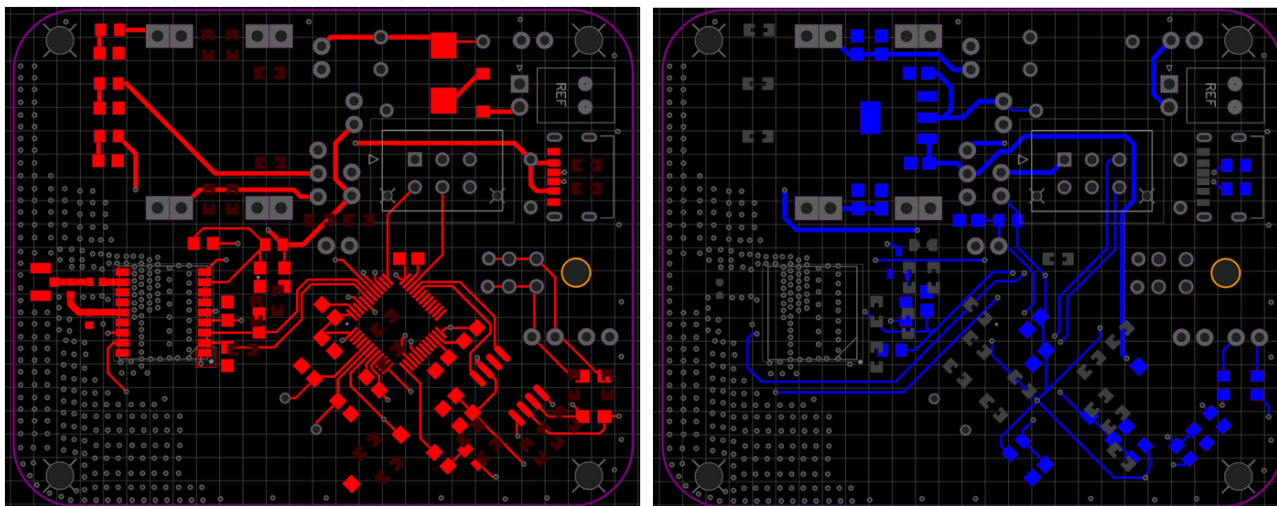


Figura 9 – Top (vermelho) e bottom (azul) layers da placa.

Em suma, no top layer estão posicionados: todos os conectores, regulador 5 V do GLV, todo o circuito RF, LEDs indicadores, maior parte dos circuitos do STM32U5, todos os jumpers. No bottom layer estão posicionados: regulador 3.3 V, parte do circuito da CAN, alguns capacitores de acoplamento do STM32U5 e capacitores de filtro da alimentação.

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 que a alimentação do Teseo é de 10 mils pois é de baixa potência.

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

Usando freeRTOS, é possível que uma thread processe as strings NMEA e atualize a estrutura de dados global, enquanto outra thread sempre pega a estrutura de dados atual e a escreve no CAN. É importante que a thread de processamento da UART opera na mesma taxa de amostragem em que o Teseo está configurado.

As strings NMEA enviadas pelo Teseo tem o formato exibido na Figura 10. Basta criar um código em C que as processa e extrai as variáveis de latitude e longitude, bem como se o fix é válido - se o fix é inválido, deve-se descartar a mensagem.

```
$GPRMC,123242.000,A,1954.31095,S,04355.66349,W,0.1,0.0,190925,,A*6C
$GPGGA,123242.000,1954.31095,S,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,11,04,24,54,224,31,11,52,036,42,06,48,102,24,19,30,147,25*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,1954.31095,S,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 no bottom layer, o encapsulamento deve prever um ressalto de 5 mm nos 4 cantos onde são passados 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 a localização da placa no chassi.

Dessa forma, o 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.

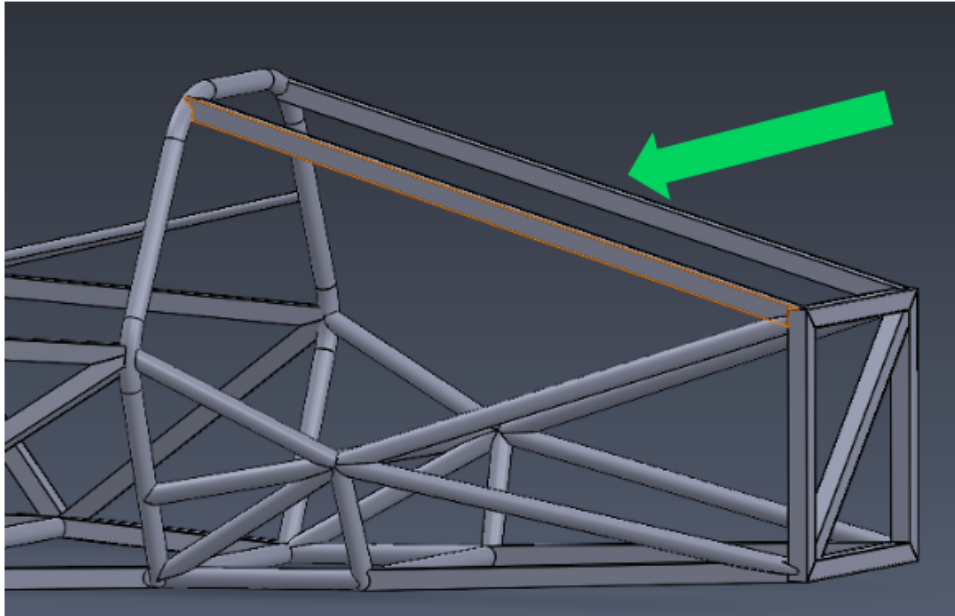


Figura 11 – Planejamento inicial do posicionamento da placa no carro.

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 em conjunto 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
Conector	TYPE-C 6PIN	1	0,05
Antena Conector	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

Essa seção aborda testes realizados com uma placa antiga de GNSS desenvolvida pela equipe em 2020, que utiliza um circuito praticamente idêntico ao da placa projetado, 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 embaixo das árvores que ficam atrás do Bloco 4, do lado do estacionamento da Eng, em frente ao Coltec. Segundo o Google Earth, estamos posicionados em:

- 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 ela com essa parte rosa virada 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 se encontram no drive da equipe: https://docs.google.com/document/d/1_DcsvIPrMl5WaGMswOeWJAnK461f2M6uIb7Qwf03SD4/edit?usp=sharing.

Os resultados obtidos estão sumarizados na Figura 13. Note que esse teste já atende ao requisito R2 da precisão do GNSS.

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

	Google Earth	Obtained	Error
Latitude	19.8713 3 S	19.8713 5 S	3.8 m
Longitude	43.963 09 W	43.963 12 W	
Altitude	821 m	819.28 m	2.72 m

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

- Estiver dentro de uma sala ou oficina
- Perto de algum prédio alto

sendo esse o motivo pelo qual o teste foi feito nas árvores do Coltec, longe de qualquer prédio e com boa visibilidade para o 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 projetado com base em diversas fontes e manuais, além de seguir o circuito da placa antiga da equipe que já apresenta uma boa precisão em certas condições.

Além disso, o layout da placa propõe uma série de melhorias em relação à placa antiga, com um maior cuidado em relação à impedância das trilhas de RF e roteamento dessas trilhas.

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

