

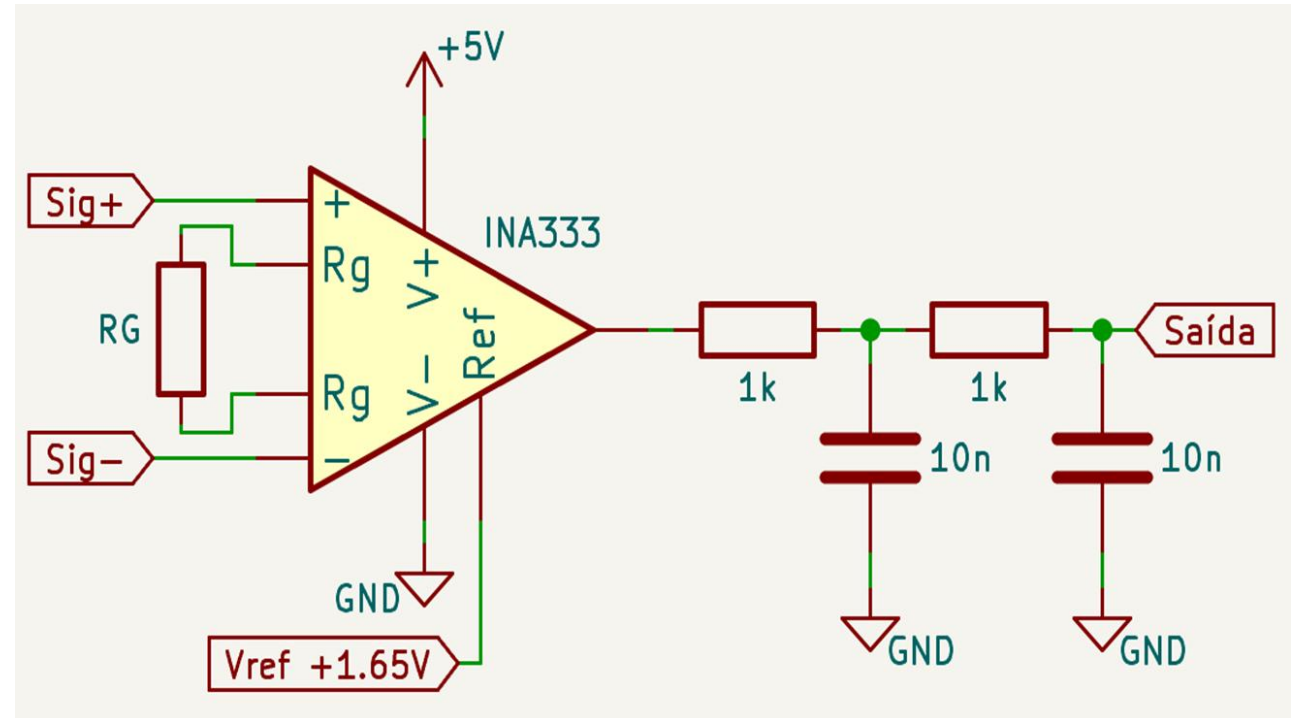
Circuito Base de Condicionamento com INA333

Estrutura base:

- Entrada diferencial → INA333
- Ganho ajustado por resistor R_G
- Referência de 1.65 V para centralizar a saída
- Alimentação: 0 - 5 V
- Saída com dois filtros RC ($1\text{ k}\Omega + 10\text{ nF}$) em cascata → 2ª ordem ($\sim 15.9\text{ kHz}$, 40 dB/década)
- Sinal final (0 - 3.3 V) enviado ao ADC do STM32

Vantagens do padrão unificado:

- Projeto modular e reutilizável
- Simples ajuste de ganho
- Leitura precisa de sinais AC ou DC
- Boa imunidade a ruído com filtragem em dois estágios
- O uso do INA333 garante, além da alta precisão, baixo offset e excelente rejeição de modo comum (CMRR)



Todos os sinais (temperatura, massa, corrente, tensão) são condicionados por uma estrutura comum baseada no INA333, variando apenas o circuito de entrada e o ganho.

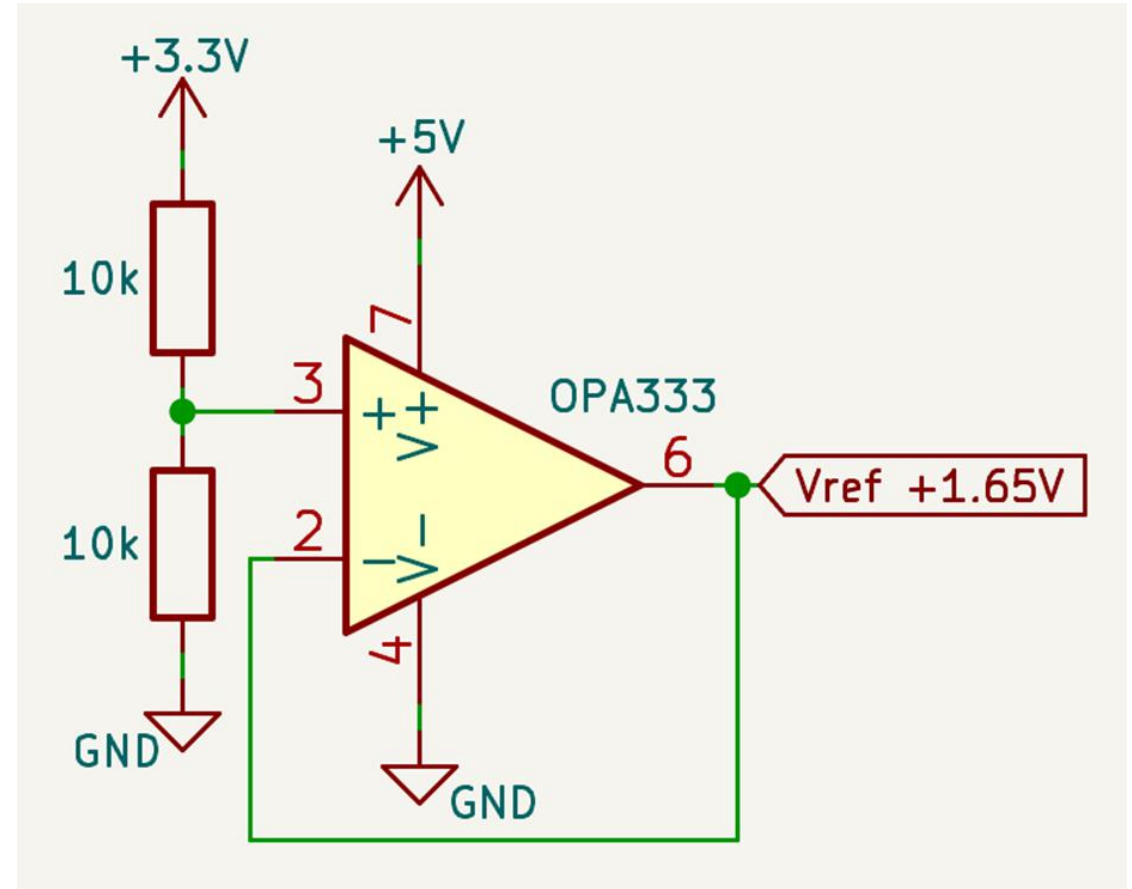
Geração da Referência de Offset ($V_{ref} = 1.65\text{ V}$)

Funcionamento do circuito:

- Gera uma tensão de 1.65 V estável para centralizar os sinais nos circuitos de condicionamento
- Divisor resistivo $10\text{k}/10\text{k}$ gera 1.65 V a partir de 3.3 V
- Essa tensão é aplicada à entrada não-inversora de um OPA333, como buffer
- A saída fornece V_{ref} com baixa impedância e alta estabilidade

Justificativas:

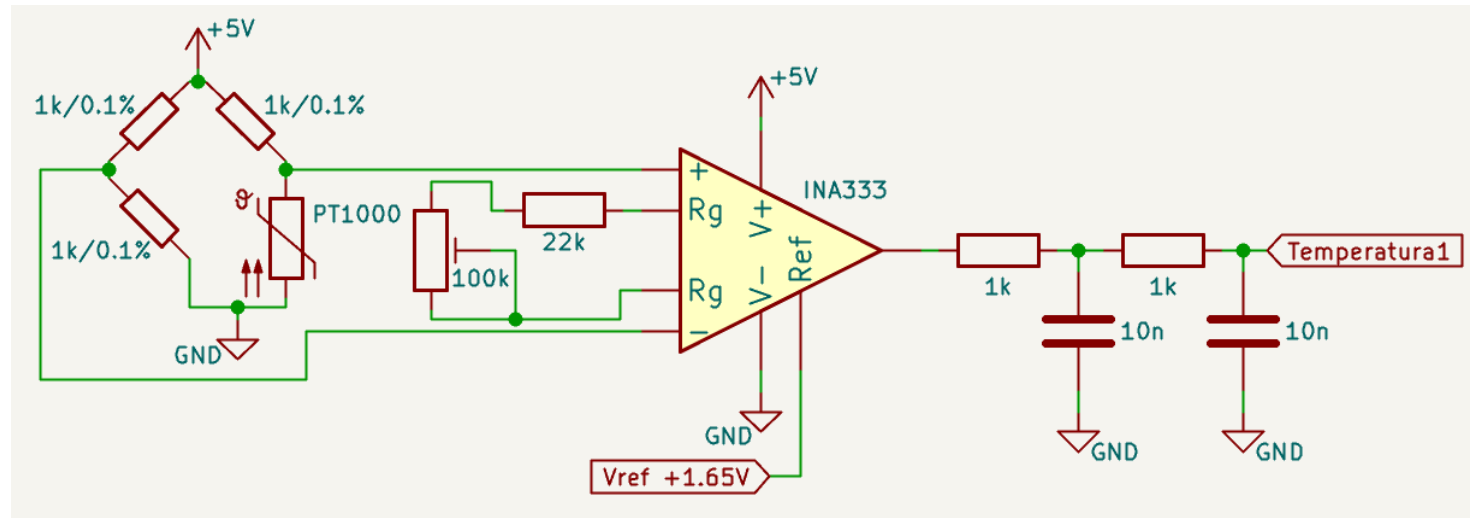
- Divisores resistivos puros têm alta impedância e sofrem variação com carga
- O buffer garante V_{ref} constante e confiável
- OPA333 foi escolhido por ser rail-to-rail, preciso e de baixo ruído — recomendado pelo datasheet do INA333



Circuito de Leitura de Temperatura

Descrição do Circuito:

- O sensor PT1000 é inserido em uma ponte de Wheatstone com resistores de $1\text{ k}\Omega$ / 0,1%
- O sinal diferencial da ponte é aplicado ao INA333, com ganho ajustável por trimpot de $100\text{ k}\Omega$ em série com resistor limitador de $22\text{ k}\Omega$
- O ganho é dimensionado para utilizar toda a faixa de 0–3.3 V de saída, compatível com o ADC
- O restante do condicionamento (offset, filtragem e alimentação) segue o circuito base padronizado



Justificativas:

- A ponte simétrica minimiza offset térmico e facilita a linearização
- O ganho ajustável permite calibração manual conforme a faixa de temperatura
- A saída do INA333 já está centrada com $V_{\text{ref}} = 1.65\text{ V}$, dispensando correções adicionais
- A filtragem antialiasing é herdada do circuito padrão, adequada para aquisição a 20 kHz

Cálculo do Ganho - Temperatura

1. Variação da Temperatura a ser lida:

$$-100^{\circ}\text{C} \text{ a } +100^{\circ}\text{C} \rightarrow \Delta T = 200^{\circ}\text{C}$$

2. Variação da Resistência do PT1000:

$$\Delta R = 1000 \cdot 0,00385 \cdot 100 = 385\Omega$$

3. Extremos de resistência do PT1000

$$R_1 = 1000 - 385 = 615\Omega$$

$$R_2 = 1000 + 385 = 1385\Omega$$

4. Tensão diferencial da ponte:

$$V_{diff} = V_B - V_A, \text{ onde: } V_A = 2,5V$$

$$V_{Bmax} \approx \left(\frac{1385}{2385} \times 5 \right) - 2,5 \approx 0,4V$$

$$V_{Bmin} \approx \left(\frac{615}{1615} \times 5 \right) - 2,5 \approx -0,6V$$

$$\Delta V_{diff} \approx 1V$$

5. Sinal desejado na saída do INA333:

$$V_{out} = 0 \rightarrow 3.3V \text{ centrado em } 1.65V$$

6. Fórmula do Ganho extraída do datasheet do INA333:

$$G = 1 + \frac{100k\Omega}{R_G}$$

7. Ganho necessário:

$$G = \frac{3.3V}{\Delta V_{diff}} = 3.3$$

8. Configuração selecionada:

Trimpot de 100K Ω + Resistor de 22K Ω

9. Faixa de Ganho:

$$G_{max} = 1 + \frac{100k\Omega}{22k\Omega} \approx 5,54 \times$$

$$G_{min} = 1 + \frac{100k\Omega}{122k\Omega} \approx 1,81 \times$$

3.3x está dentro da faixa de ajuste

Conversão ADC - Temperatura

1. Variação da Temperatura a ser lida:

$$-100^{\circ}\text{C} \text{ a } +100^{\circ}\text{C} \rightarrow \Delta T = 200^{\circ}\text{C}$$

2. Coeficiente de conversão:

$$12 \text{ bits} = 4096 \text{ (0-4095)}$$

$$\frac{200^{\circ}}{4095} \approx 0,04884^{\circ}\text{C}/\text{count}$$

3. Offset de 1.65V (metade da faixa de 3.3v):

$$\frac{4095}{2} \approx 2047$$

4. Equação final:

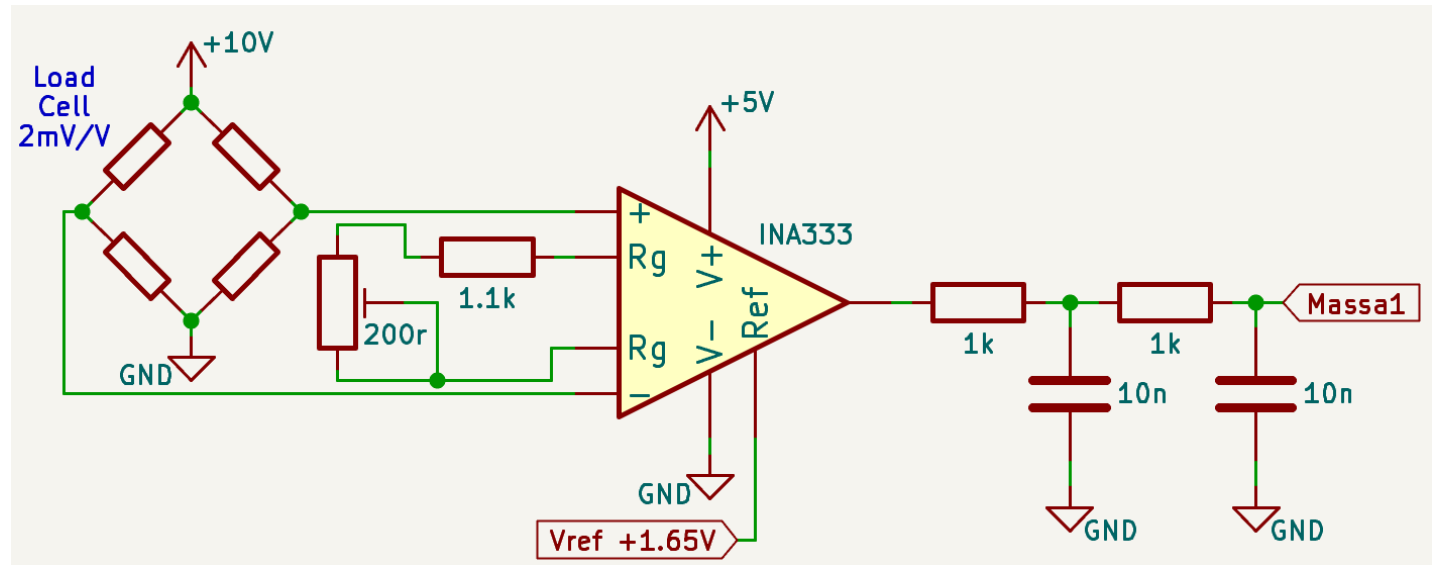
$$Temp(^{\circ}\text{C}) = (ADC_{raw} - offset) \times coef. conversão$$

$$\mathbf{Temp(^{\circ}\text{C}) = (ADC_{raw} - 2047) \times 0,04884}$$

Circuito de Leitura de Massa

Descrição do Circuito:

- A célula de carga é conectada em ponte completa e excitada com +10 V, ampliando a faixa útil para ± 20 mV
- O sinal diferencial da ponte é aplicado ao INA333 com ganho ajustável através de um trimpot de 1 k Ω em série com resistor fixo de 604 Ω
- O ganho é configurado para ocupar toda a faixa de saída de 0-3.3 V
- Offset, alimentação e filtragem seguem o circuito base padronizado



Justificativas:

- A excitação de 10 V aumenta a faixa de sinal útil e melhora a relação sinal/ruído
- O ajuste de ganho permite calibração fina de acordo com a célula instalada
- A ponte completa permite leitura bidirecional (tração e compressão), sem o uso de fonte simétrica.

Cálculo do Ganho - Massa

1. Variação da saída da célula:

$$-20mV \text{ a } +20mV \rightarrow \Delta V = 40mV$$

2. Sinal desejado na saída do INA333:

$$V_{out} = 0 \rightarrow 3.3V \text{ centrado em } 1.65V$$

3. Ganho necessário:

$$G = \frac{3.3V}{\Delta V} = \frac{3.3V}{40mV} = 82.5$$

4. Configuração selecionada:

Trimpot de 200Ω + Resistor de 1.1KΩ

5. Faixa de Ganho:

$$G_{max} = 1 + \frac{100k\Omega}{1.1k\Omega} \approx 91,9 \times$$

$$G_{min} = 1 + \frac{100k\Omega}{1.3k\Omega} \approx 77,9 \times$$

82,5x está dentro da faixa de ajuste

Conversão ADC - Massa

1. Variação da Massa a ser lida:

$$-500kg \text{ a } +500kg \rightarrow \Delta M = 1000kg$$

2. Coeficiente de conversão:

$$12 \text{ bits} = 4096 \text{ (0-4095)}$$

$$\frac{1000kg}{4095} \approx 0,24420kg/count$$

3. Offset de 1.65V (metade da faixa de 3.3v):

$$\frac{4095}{2} \approx 2047$$

4. Equação final:

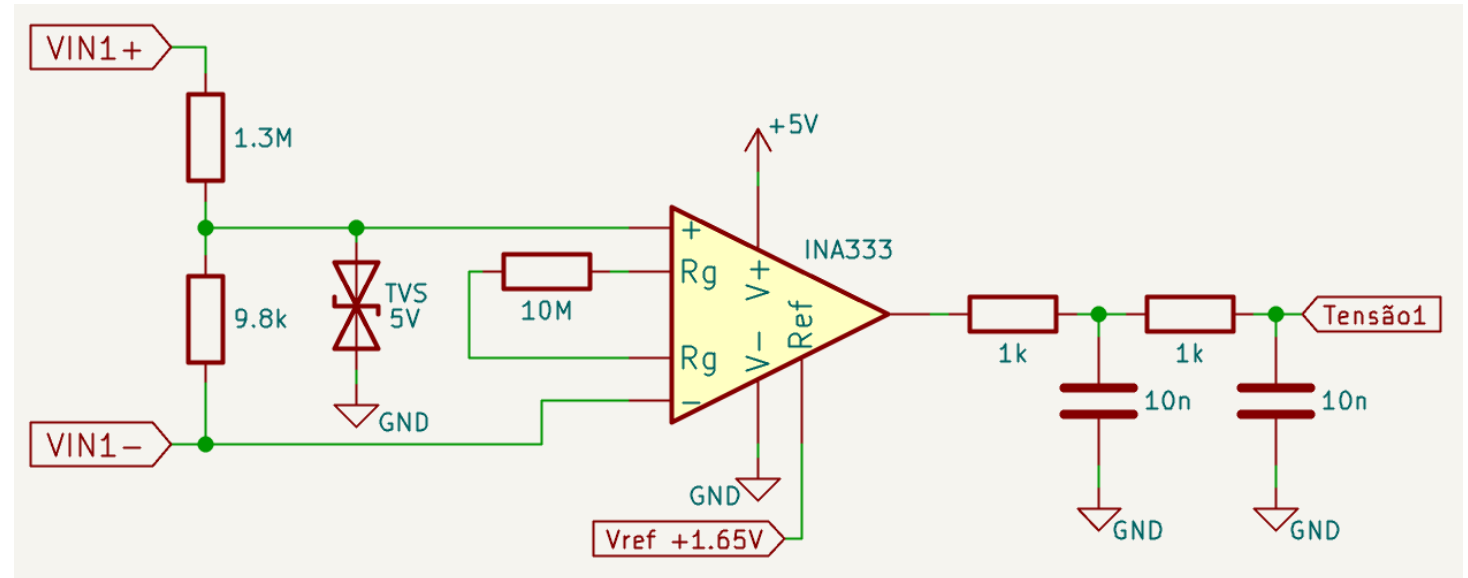
$$Massa(kg) = (ADC_{raw} - offset) \times coef. conversão$$

$$Massa(kg) = (ADC_{raw} - 2047) \times 0,24420$$

Circuito de Leitura de Tensão

Descrição do Circuito:

- Um divisor resistivo ($1.3\text{ M}\Omega$ / $10\text{ k}\Omega$) atenua o sinal AC ou DC de até $\pm 220\text{ V}$ para a faixa $\pm 1.65\text{ V}$
- Um diodo TVS de 5 V protege a entrada contra surtos e transientes
- O sinal atenuado é aplicado ao INA333 com ganho fixo ($G = 1$), pois não há necessidade de ganho no sinal.
- A saída é filtrada e enviada ao ADC com faixa final de $0\text{--}3.3\text{ V}$, centrada em 1.65 V
- Alimentação, offset e filtragem seguem o circuito base padronizado



Justificativas:

- O divisor resistivo dimensionado garante a leitura de tensões elevadas com segurança e linearidade
- O ganho unitário do INA333 evita distorções e fornece alta impedância de entrada
- O TVS protege o circuito contra sobretensões acidentais

Cálculo da Atenuação - Tensão

1. Tensão máxima de entrada

$$V_{in} = \pm 220V$$

$$\Delta V_{in} = 440V$$

2. Sinal desejado na saída do INA333:

$$V_{out} = 0 \rightarrow 3.3V \text{ centrado em } 1.65V$$

3. Atenuação necessária:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1.65V}{220V} = 0,0075$$

4. Relação entre resistores no divisor:

$$\frac{R1}{R2} = \frac{1 - 0,0075}{0,0075} \approx 132,3$$

5. Configuração selecionada:

$$R1 = 1.3M\Omega \quad R2 = 9,8k\Omega$$

R1 é 162.6x > R2, atendendo o

requisito mínimo da relação de 132,3x

5. Tensão resultante ao medir 220V:

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{9,8k\Omega}{1.3M\Omega + 9,8k} = 1,64V$$

1,64 V está dentro do limite de 1,65 V

Conversão ADC - Tensão

1. Variação da Tensão a ser lida:

$$-220V a +220V \rightarrow \Delta V = 440V$$

2. Coeficiente de conversão:

$$12 \text{ bits} = 4096 (0-4095)$$

$$\frac{440V}{4095} \approx 0,1075V/count$$

3. Offset de 1.65V (metade da faixa de 3.3v):

$$\frac{4095}{2} \approx 2047$$

4. Equação final:

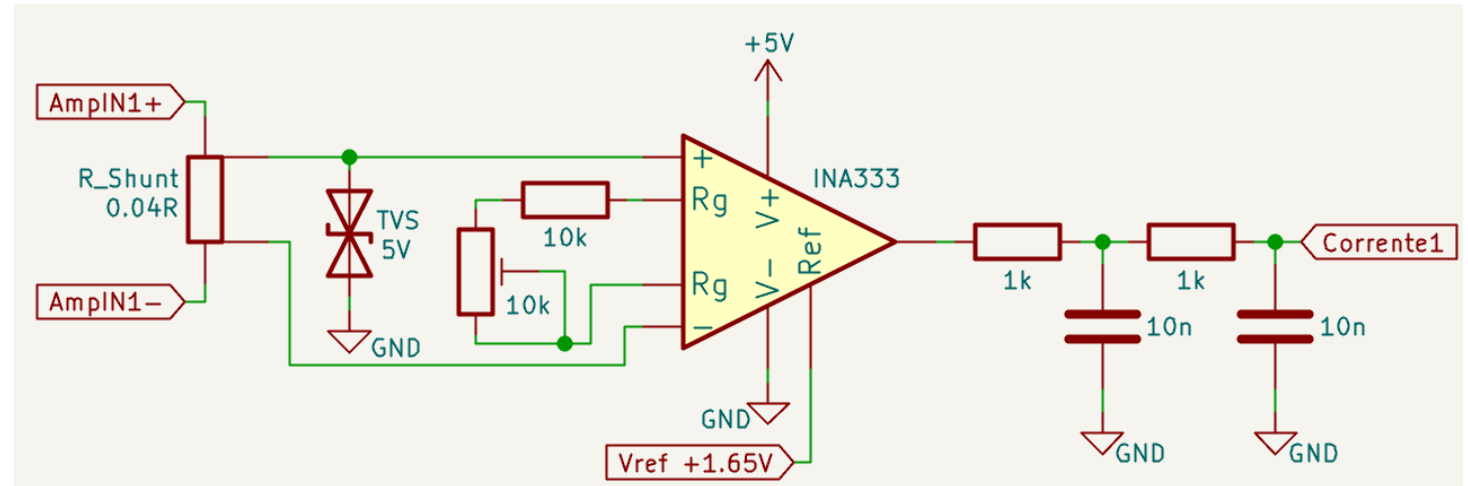
$$Tensão(V) = (ADC_{raw} - offset) \times coef.conversão$$

$$Tensão(V) = (ADC_{raw} - 2047) \times 0,1075$$

Circuito de Leitura de Corrente

Descrição do Circuito:

- A corrente é medida por um resistor shunt de $0.04\ \Omega$, posicionado em série com a carga
- A queda de tensão diferencial no shunt é amplificada por um INA333 com ganho ajustável via trimpot de $10\ \text{k}\Omega$ em série com resistor de $10\ \text{k}\Omega$
- O sinal de saída é centrado em $1.65\ \text{V}$ com swing de até $3.3\ \text{V}$, adequado para leitura bipolar no ADC
- A saída do INA é filtrada por dois estágios RC e conectada ao ADC do STM32
- Offset, alimentação e filtragem seguem o circuito base padronizado



Justificativas:

- A medição por shunt é simples, precisa e de baixa interferência
- O valor baixo de resistência minimiza perdas e aquecimento
- O ajuste de ganho permite calibrar o circuito para diferentes faixas de corrente

Cálculo do Ganho - Corrente

1. Tensão máxima do Shunt

$$V_{shunt} = 0.04\Omega \times \pm 5A = \pm 200mV$$

$$\Delta V_{shunt} = 400mV$$

2. Sinal desejado na saída do INA333:

$$V_{out} = 0 \rightarrow 3.3V \text{ centrado em } 1.65V$$

3. Ganho necessário:

$$G = \frac{V_{out}}{V_{shunt}} = \frac{1.65V}{200mV} = 8,25$$

4. Configuração selecionada:

Trimpot de 10k Ω + Resistor de 10K Ω

5. Faixa de Ganho:

$$G_{max} = 1 + \frac{100k\Omega}{10k\Omega} \approx 11 \times$$

$$G_{min} = 1 + \frac{100k\Omega}{20k\Omega} \approx 6 \times$$

8,25x está dentro da faixa de ajuste

Conversão ADC - Corrente

1. Variação da Corrente a ser lida:

$$-5A \text{ a } +5A \rightarrow \Delta A = 10A$$

2. Coeficiente de conversão:

$$12 \text{ bits} = 4096 \text{ (0-4095)}$$

$$\frac{10A}{4095} \approx 0,002442A/count$$

3. Offset de 1.65V (metade da faixa de 3.3v):

$$\frac{4095}{2} \approx 2047$$

4. Equação final:

$$Corrente(A) = (ADC_{raw} - offset) \times coef. conversão$$

$$\textbf{Corrente(A) = (ADC_{raw} - 2047) \times 0,002442}$$

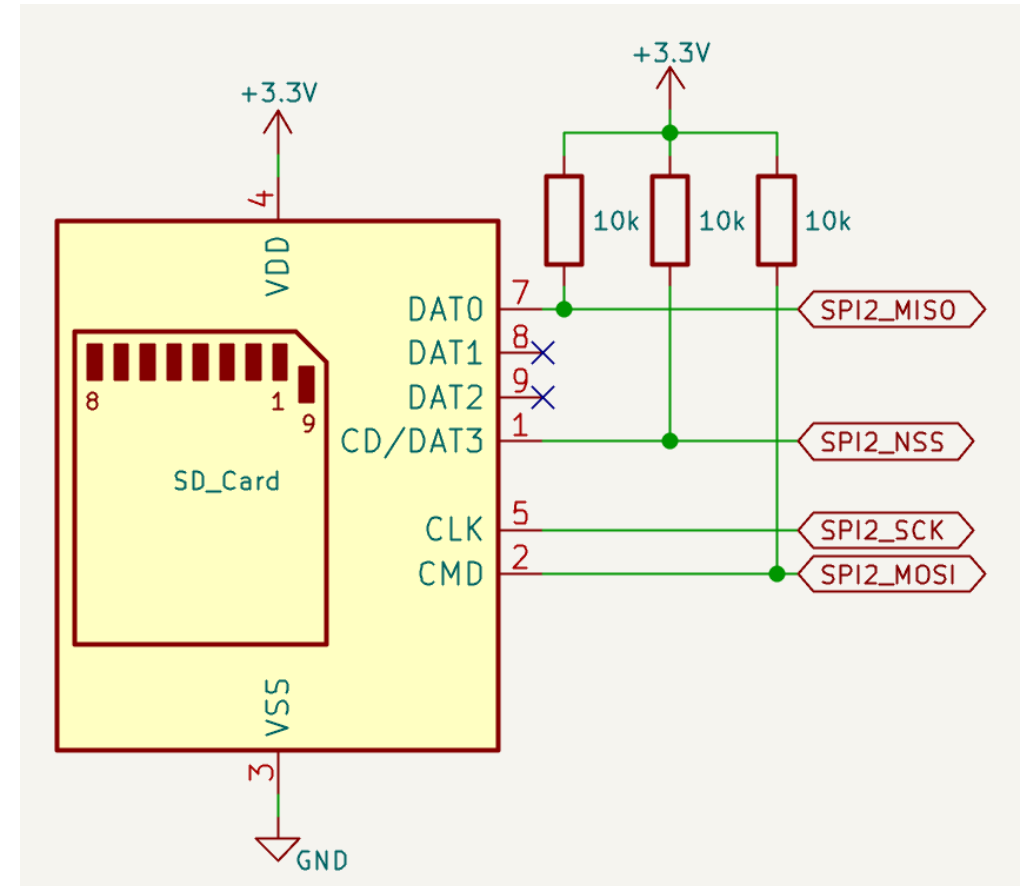
Circuito de Interface STM32 - Cartão SD

Funcionamento do circuito:

- O cartão SD é utilizado no modo SPI
- Os sinais SPI2_MISO, SPI2_MOSI, SPI2_SCK e SPI2_NSS do STM32 são conectados aos pinos correspondentes do cartão SD
- Resistores de pull-up de 10 k Ω são conectados às linhas MISO, MOSI e NSS, conforme recomendação do padrão SD para garantir nível lógico alto em repouso
- A alimentação é feita com +3.3 V, e o GND é comum entre o STM32 e o cartão SD

Justificativas:

- O modo SPI é amplamente suportado por microcontroladores e simplifica a comunicação com o cartão
- Os resistores de pull-up garantem inicialização correta e estabilidade nas linhas de dados
- A interface SPI2 (pinos 25 a 28 do STM32F103C8T6) é ideal por estar livre e acessível nesse microcontrolador



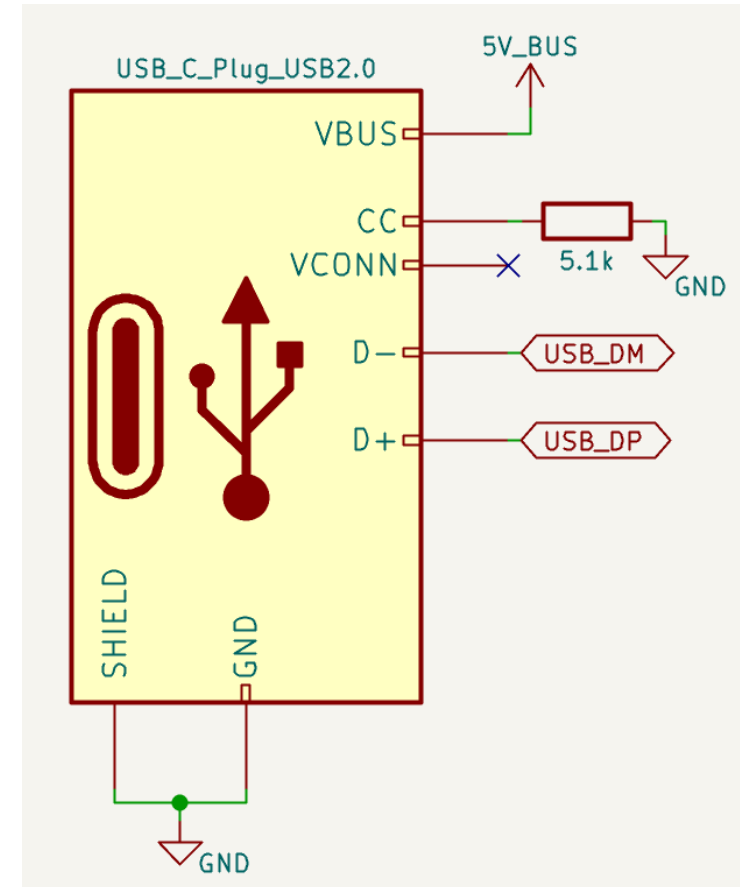
Conexão USB – Dados e Alimentação

Funcionamento do circuito:

- O conector USB-C é utilizado no modo USB 2.0, com linhas D+ e D- conectadas diretamente ao microcontrolador para comunicação de dados
- A linha VBUS fornece 5 V para alimentação de circuitos periféricos
- Um resistor de 5.1 k Ω conecta a linha CC ao GND, sinalizando ao dispositivo host que este é um dispositivo consumidor
- Os pinos SHIELD e GND são conectados ao GND comum do sistema

Justificativas:

- A interface USB 2.0 é amplamente compatível e suficiente para comunicação serial de baixa/média velocidade
- O resistor de 5.1 k Ω no pino CC é essencial para ativar corretamente a fonte de 5 V no host USB-C
- A estrutura garante alimentação segura e comunicação direta com o microcontrolador



Circuito Conversor Boost 5 V para 12.6 V

Funcionamento do circuito:

- O circuito eleva a tensão de 5 V do USB para 12.6 V utilizando um conversor boost com feedback resistivo
- A regulação da tensão de saída é feita por um divisor conectado ao pino FB do CI
- A entrada e a saída são filtradas para garantir estabilidade e baixo ruído

Justificativas:

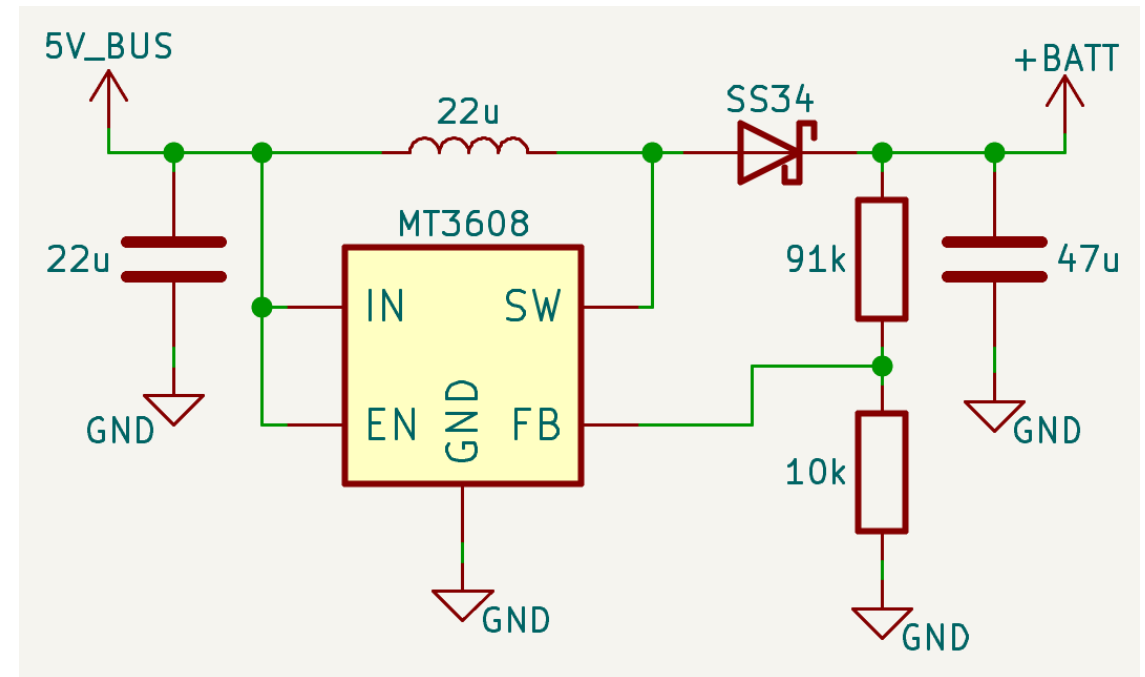
- O MT3608 é compacto, eficiente e ideal para aplicações de elevação de tensão com baixa corrente
- A topologia boost é eficiente, compacta e de baixo custo. É amplamente utilizada em sistemas embarcados
- A saída de 12.6 V permite carregar um pack de baterias Li-ion 3S (3 × 4.2 V)

1. Fórmula de saída (datasheet do MT3608):

$$V_{out} = 1,25 \times \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)$$

2. Tensão de saída do circuito:

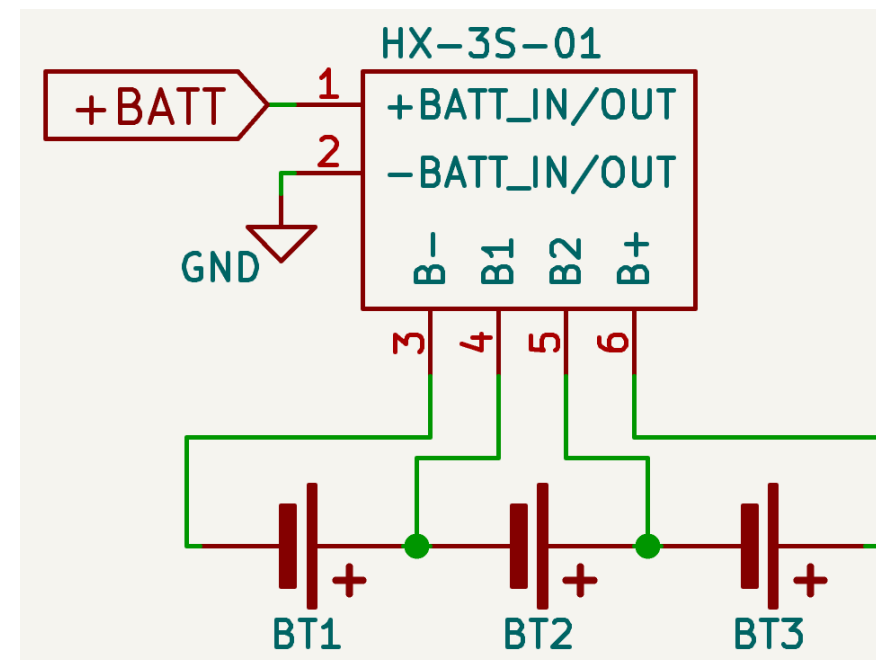
$$V_{out} = 1,25 \times \left(1 + \frac{91k\Omega}{10k\Omega}\right) = 12,625V$$



Circuito para Carregamento das Baterias (BMS 3S)

Funcionamento do circuito:

- Utiliza-se o módulo HX-3S-01, projetado para packs de 3 células Li-ion (3S) alimentado pelos 12.6 V (3×4.2 V)
- As células são conectadas em série, com fios de monitoramento ligados aos terminais B-, B1, B2 e B+
- O módulo controla automaticamente a carga e descarga além do balanceamento das células
- A entrada e a saída do sistema compartilham os pinos +BATT_IN/OUT e -BATT_IN/OUT, facilitando a conexão
- Com proteção contra sobretensão, subtensão e sobrecorrente
- Uma chave ON/OFF é responsável por ligar o circuito



Justificativas:

- O uso do BMS HX-3S-01 garante segurança na carga e descarga de baterias Li-ion
- O balanceamento passivo mantém as células sempre niveladas, maior vida útil do pack
- O módulo tem baixo custo e fácil implementação
- O uso de um módulo pronto reduz a complexidade do projeto
- A topologia atende com folga esse projeto, pois suporta até 5A



Reguladores Lineares (3.3V/5V/10V)

Funcionamento do circuito:

- Utiliza-se reguladores AMS1117 para gerar tensões de 3.3 V, 5 V e 10 V, a partir da alimentação de 12.6 V, acionada pela chave ON/OFF
- Os modelos fixos (3.3 V e 5 V) possuem apenas capacitor de entrada e saída para estabilidade, por não existir um fixo para 10V, foi selecionado o modelo ajustável
- A versão ajustável utiliza um divisor resistivo, com trimpot, entre o pino de saída e o pino ADJ

Justificativas:

- O AMS1117 é um LDO simples, estável e adequado para correntes moderadas
- A regulação linear garante ruído mínimo nas linhas de alimentação
- A topologia é de baixo custo e facilmente integrável a sistemas alimentados por barramento boost e baterias

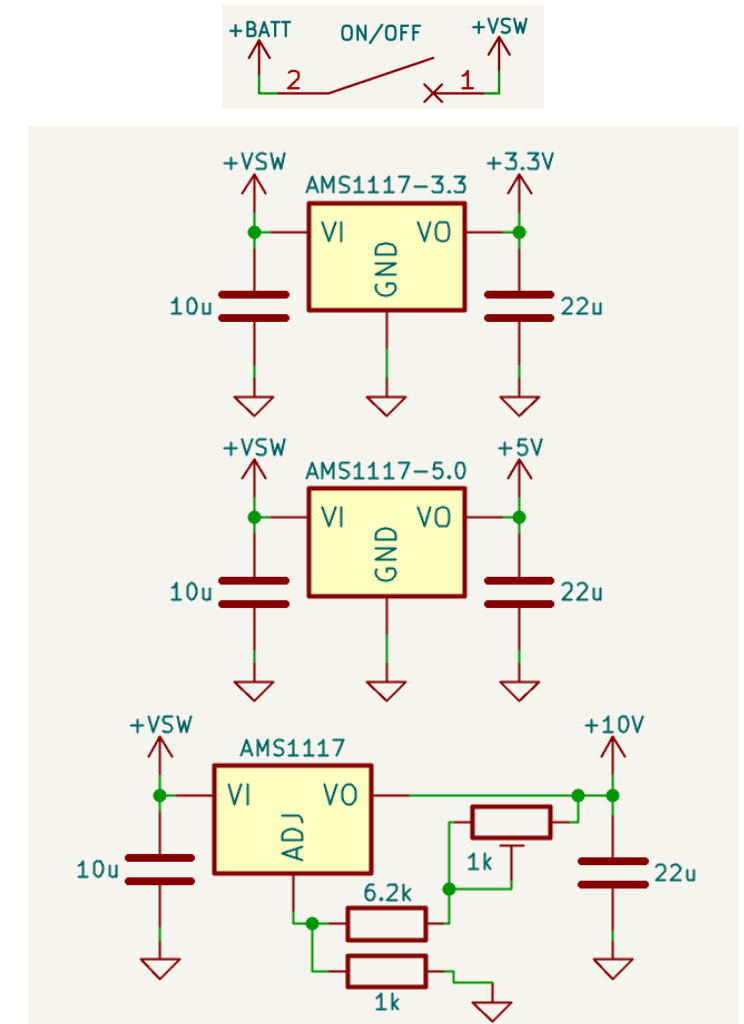
1. Fórmula de saída (datasheet do AMS1117):

$$V_{out} = 1,25 \times \left(1 + \frac{R1}{R2}\right)$$

2. Tensão de saída do circuito:

$$V_{out_{min}} = 1,25 \times \left(1 + \frac{7.2k\Omega}{8.2k\Omega}\right) = 10,25V$$

$$V_{out_{max}} = 1,25 \times \left(1 + \frac{6.2k\Omega}{8.2k\Omega}\right) = 9V$$



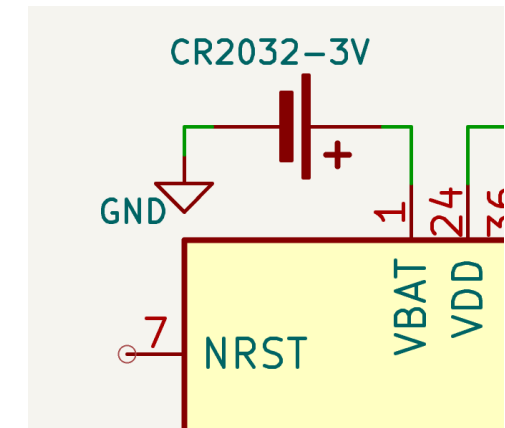
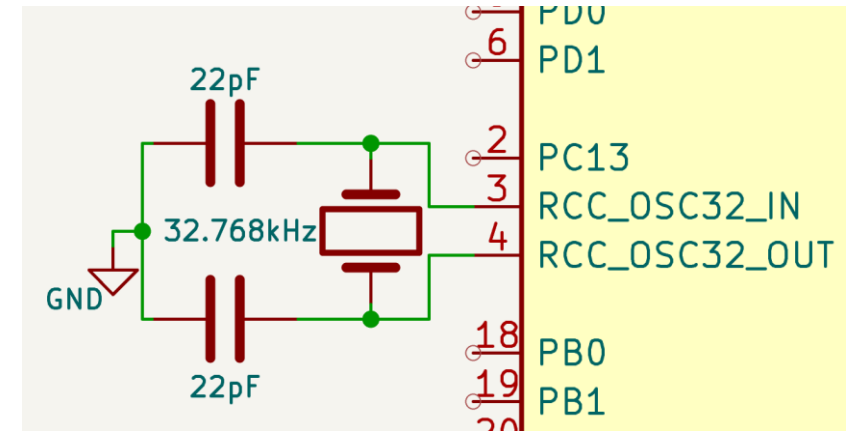
Circuito Gerador de Tempo (RTC)

Funcionamento do circuito:

- O circuito utiliza um cristal de 32.768 kHz conectado aos pinos RCC_OSC32_IN e RCC_OSC32_OUT do STM32
- Dois capacitores de 22 pF são conectados entre os terminais do cristal e o GND para garantir o funcionamento do cristal e a estabilidade de oscilação
- Essa configuração fornece clock para o RTC interno do STM32, permitindo operação precisa com baixo consumo
- O circuito opera independentemente da alimentação principal, possibilitando uso com bateria de backup

Justificativas:

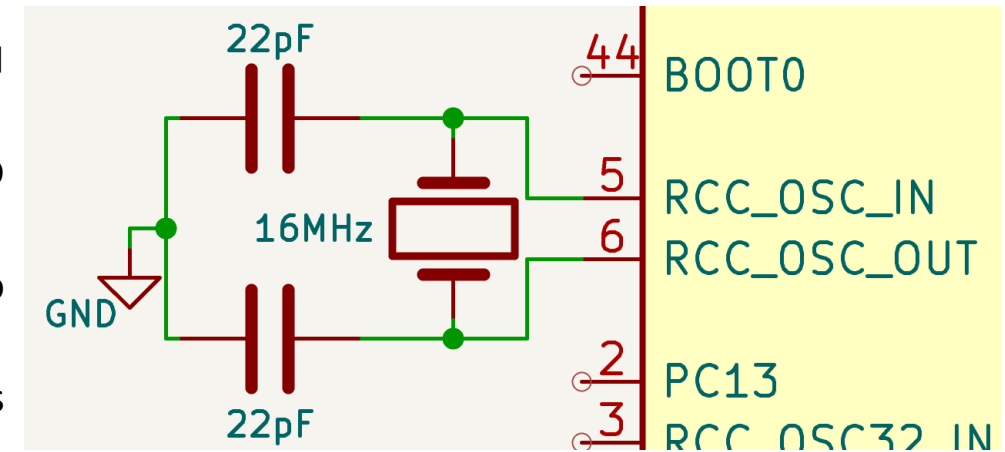
- O cristal de 32.768 kHz é o padrão para aplicações de tempo real (ex: relógios, timers, loggers)
- O uso do RTC interno do STM32 elimina a necessidade de CIs externos como o DS3231
- O baixo consumo de energia permite operação contínua com bateria tipo moeda



Oscilador Externo de Alta Frequência (16 MHz)

Funcionamento do circuito:

- O circuito utiliza um cristal de 16 MHz conectado aos pinos RCC_OSC_IN e RCC_OSC_OUT do STM32
- Capacitores de 22 pF conectados entre os terminais do cristal e GND garantindo o funcionamento e a estabilidade de oscilação do cristal
- Essa configuração fornece o clock principal do sistema, utilizado pelo núcleo do microcontrolador e seus periféricos
- O cristal é posicionado fisicamente próximo ao STM32, com trilhas curtas e simétricas, para minimizar ruídos



Justificativas:

- O uso de cristal externo proporciona maior estabilidade de frequência em comparação ao oscilador interno (HSI)
- O cristal não é tão afetado por variações de temperatura, o que garante precisão em ambientes industriais ou externos
- A frequência de 16 MHz é adequada para operação plena do STM32, permitindo uso de timers com precisão
- Segue as recomendações da ST para aplicações com exigência de precisão ou comunicação serial crítica (USB, UART, etc.)

STM32F103C8T6

Características do sistema:

- O STM32F103C8T6 é o núcleo central do sistema, interligando sensores, interface de comunicação, RTC e periféricos
- A alimentação principal é feita com 3.3 V, com bateria (CR2032) para o RTC
- Sinais analógicos são lidos nos canais do ADC_1
- O cartão SD é acessado via barramento SPI2
- A comunicação USB é feita pela interface nativa do STM32
- Cristais externos fornecem clock estável

Justificativas:

- Microcontrolador robusto e amplamente suportado, com documentação e bibliotecas
- Possui ADC de 12 bits com múltiplos canais, ideal para leituras simultâneas
- Suporte a cristal externo e RTC interno
- Diversas interfaces nativas (USB, UART, SPI, I2C, etc)
- Baixo consumo, ideal para aplicações embarcadas alimentadas por bateria
- Custo acessível e de fácil acesso no mercado

