



# MEDIDOR DE CORRIENTE AISLADO PARA ACELERADOR DE PARTÍCULAS

**PABLO CRIADO ASENSIO**

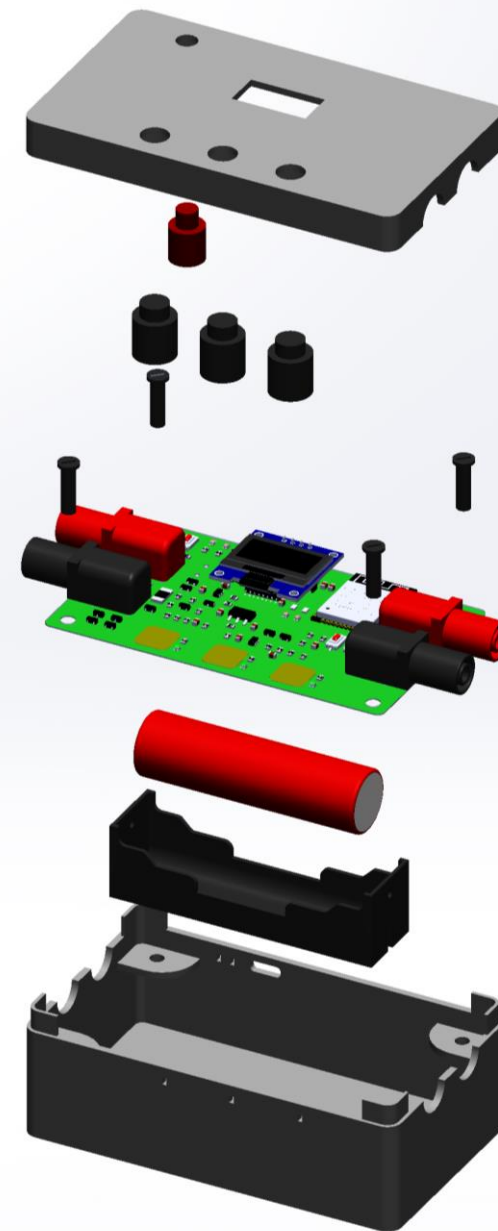
Tutor: Andrés M. Roldán Aranda

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

UNIVERSIDAD DE GRANADA

CURSO 2023/2024

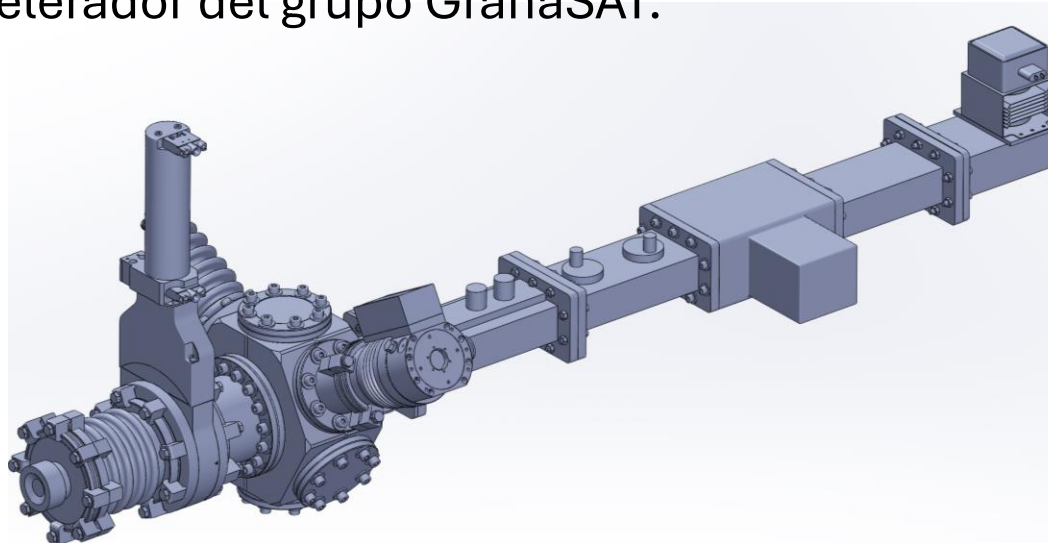


# ÍNDICE

1. Introducción
2. Requisitos
3. Análisis de un medidor de corriente comercial
4. Rediseño del medidor de corriente
5. Conclusiones

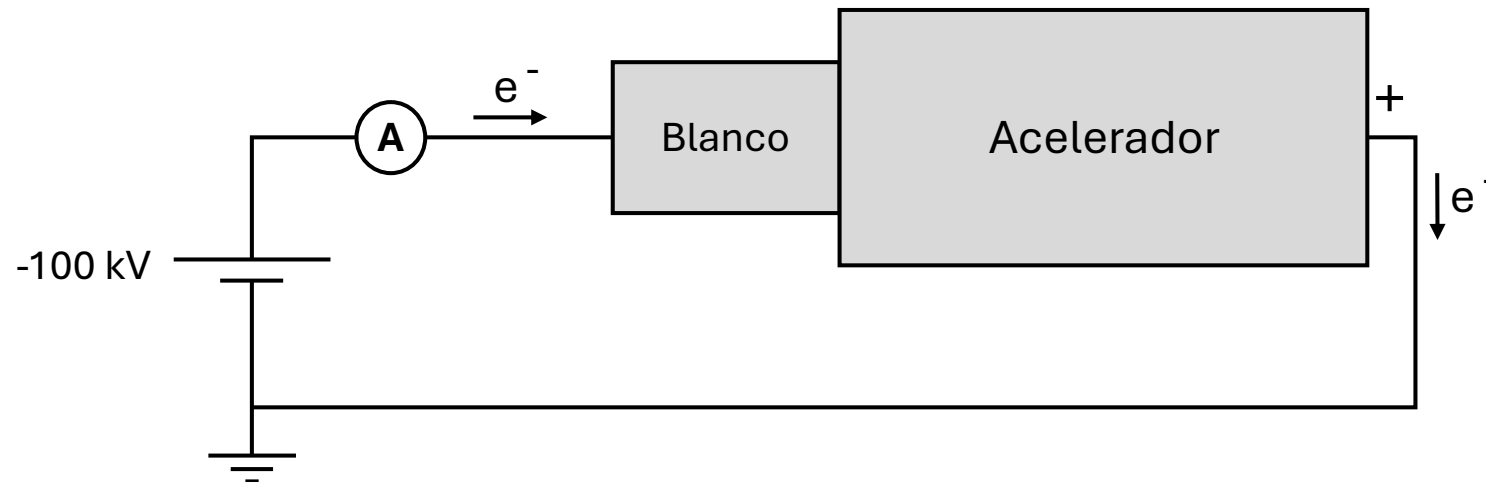
# 1. Introducción

- Aceleradores de partículas
  - Aceleran partículas a velocidades muy altas para colisionarlas
  - Están polarizados con alto voltaje (decenas de kV) y distintas frecuencias
  - La circulación de cargas genera una corriente que se debe monitorizar
  - Modelo 3D del acelerador del grupo GranaSAT:



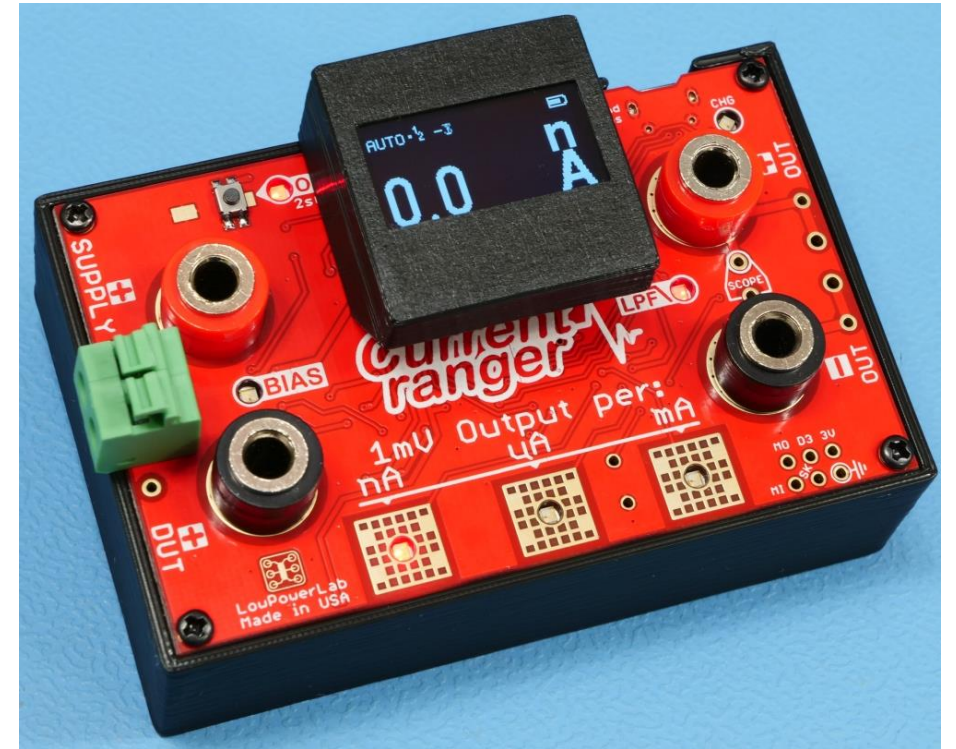
# 1. Introducción

- Monitorización de corriente
  - Necesaria para realizar los experimentos y mantener la seguridad
  - Útil para encontrar perturbaciones e interferencias externas
  - Esquema de conexión de un amperímetro con el acelerador de partículas:



# 1. Introducción

- Amperímetro comercial
  - CurrentRanger R3, desarrollado por LowPowerLab
  - Medición de corrientes entre nA y mA
  - Diversas funcionalidades (auto rango, medidas bidireccionales, disintos formatos de registro de datos)



## 2. Requisitos

- Requisitos de hardware

Ref.	Requerimientos
H.1	Comunicación Bluetooth.
H.2	Comunicación USB 2.0.
H.3	Botón para encendido/apagado
H.4	Pantalla OLED con interfaz I2C.
H.5	Alimentación mediante USB-C (5 V).
H.6	Alimentación mediante batería Li-Ion (3.7 V) y cargador USB-C.
H.7	Medición de corrientes entre nA y mA.
H.8	Protección contra alto voltaje de entrada.
H.9	Conexiones para medir de forma externa el voltaje de salida.

## 2. Requisitos

- Requisitos de firmware

Ref.	Requerimientos
F.1	Control y lectura por puerto serie.
F.2	Control y lectura por Bluetooth.
F.3	Buffer de mediciones para obtener señales de alta frecuencia.
F.4	Almacenamiento de variables de funcionamiento en memoria no volátil.
F.5	Librería de Python para controlar el dispositivo y descargar los valores de las mediciones.

## 2. Requisitos

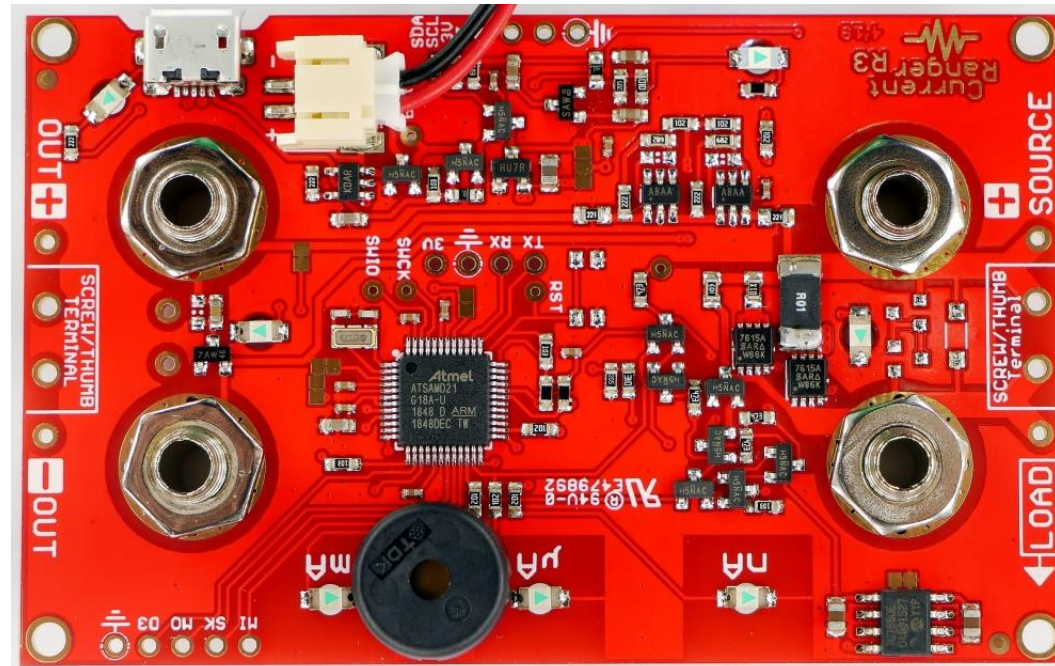
- Requisitos mecánicos

Ref.	Requerimientos
M.1	Carcasa para proteger la PCB que facilite las conexiones y el manejo por el usuario.
M.2	Conectores tipo banana para entrada de corriente y salida de voltaje.
M.3	Conector USB-C
M.4	Pantalla que muestre el estado del medidor.
M.5	Tornillos M4 para sujeción de la PCB a la carcasa.
M.6	Soporte para batería en la carcasa.

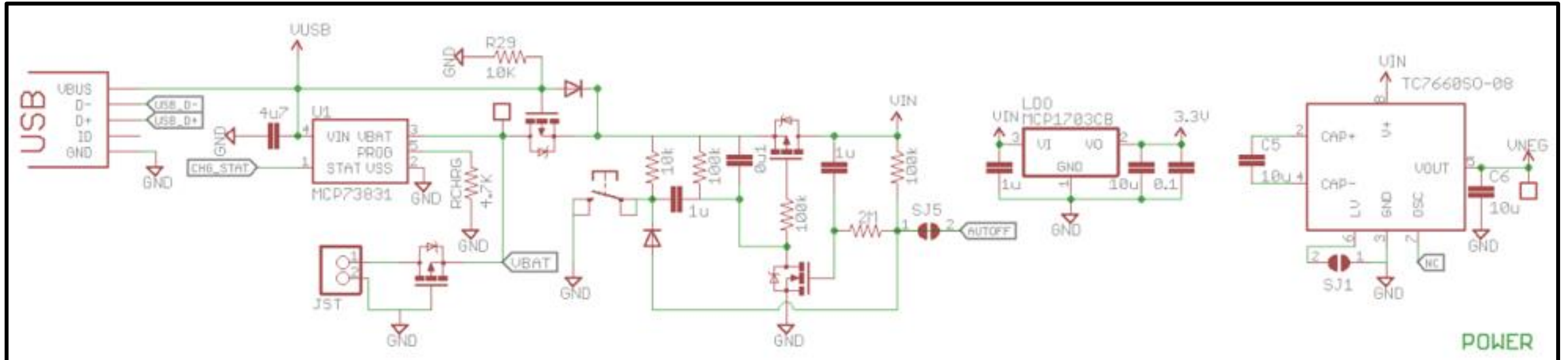


# 3. Análisis medidor de corriente comercial

- CurrentRanger R3
  - Tercera versión del producto desarrollado por LowPowerLab
  - Análisis hardware y software
  - Vista de PCB:

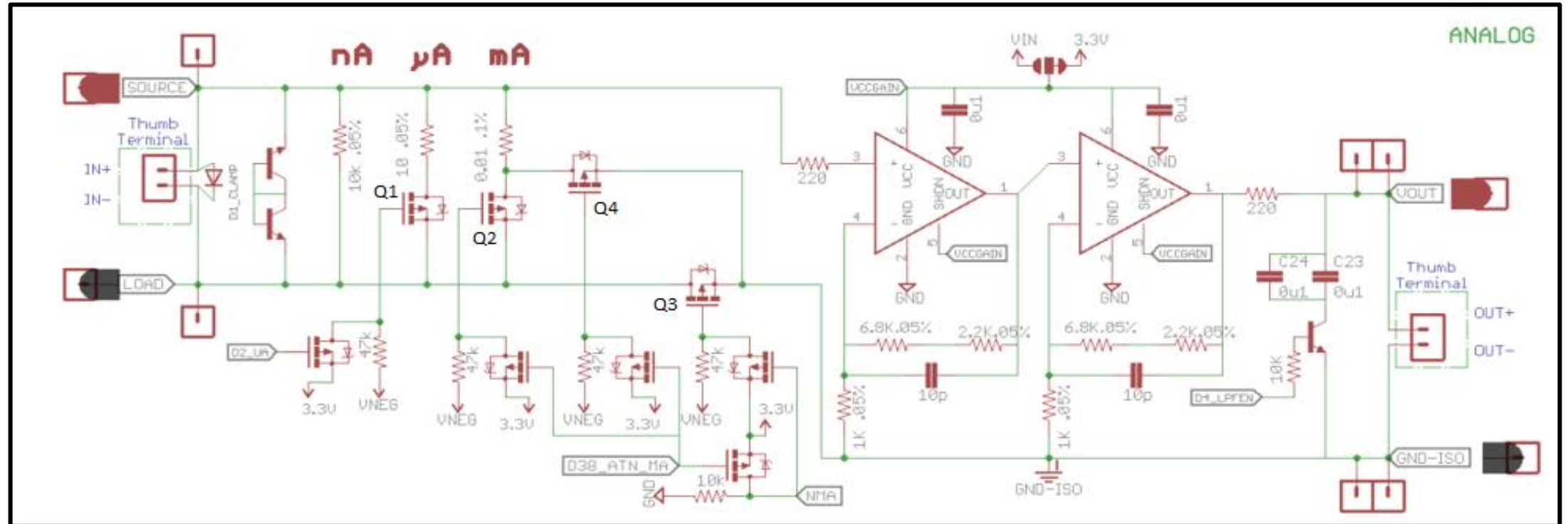


### 3.1. Análisis hardware



- Alimentación: USB Micro-B o batería de litio de 3.7 V
- PMOS para protección
- Circuito de encendido/apagado
- Generación de **3.3 V** y **-VIN**

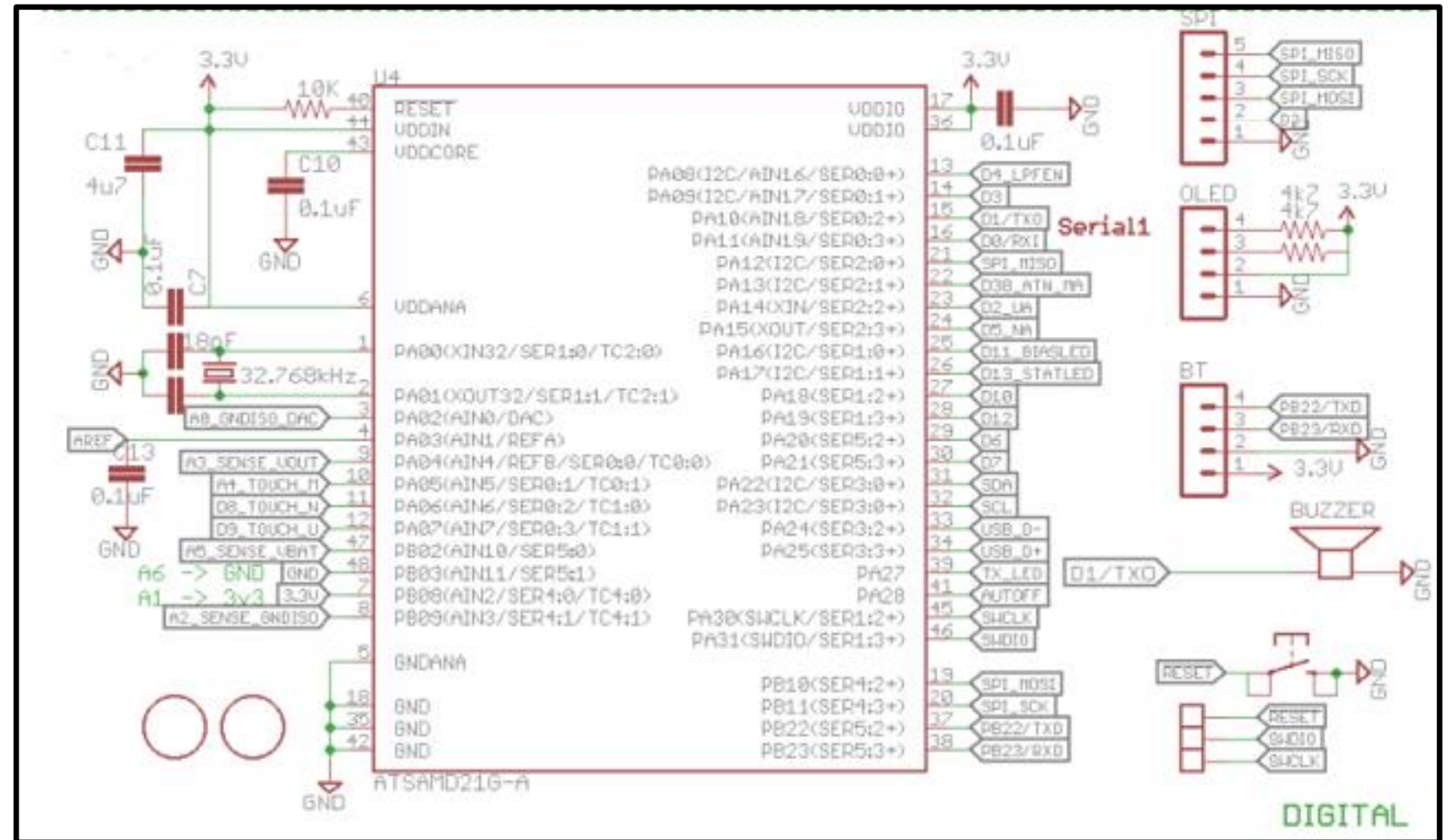
### 3.1. Análisis hardware



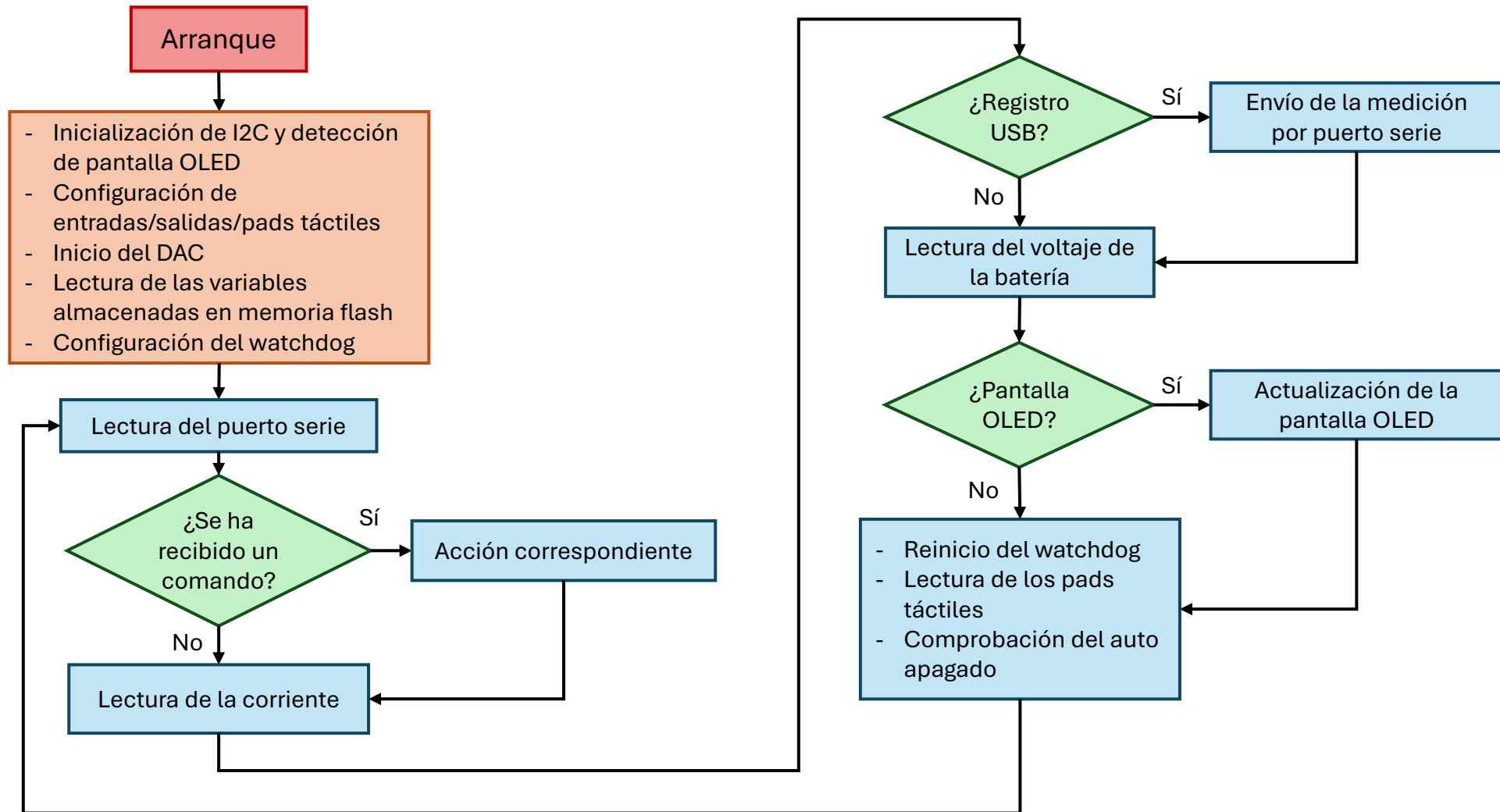
- Nanoamperios: Q3 cerrado
- Microamperios: Q1 y Q3 cerrados
- Miliamperios: Q2 y Q4 cerrados
- Dos amplificadores con ganancia 10 en cascada

# 3.1. Análisis hardware

- Microcontrolador ATSAMD21G18
- Pulsador de RESET
- Conectores: I2C (OLED), SPI, UART (Bluetooth)
- Oscilador externo
- Comunicación USB



## 3.2. Análisis software



## 3.2. Análisis software

- Modos de operación
  - mA /  $\mu$ A / nA
  - Auto apagado
  - Registro USB / Bluetooth
  - Formato
  - Velocidad ADC (16, 64 o 256 muestras)
  - Valores *pads* táctiles
  - Filtro paso bajo
  - Auto rango

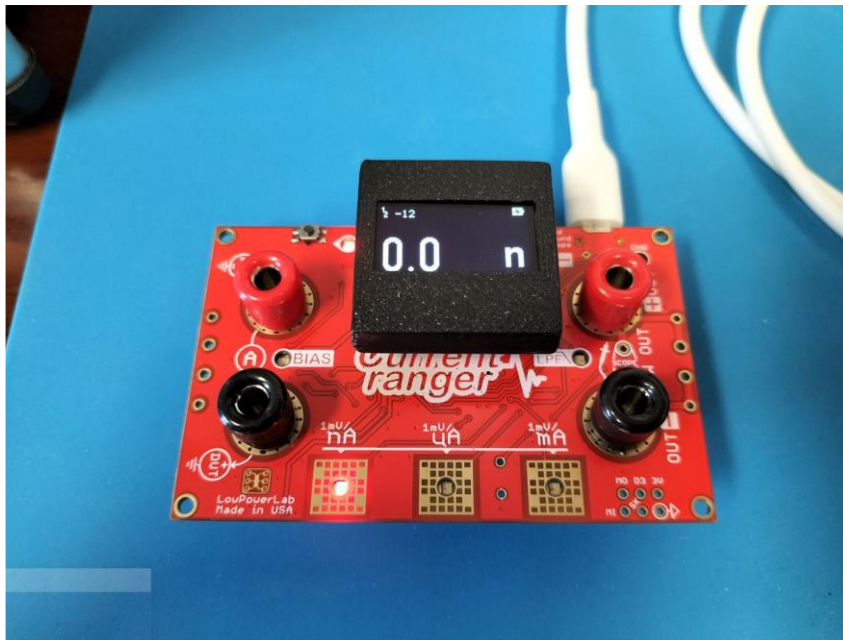


- Comandos

Comando	Descripción	Devuelve
a	Cambia modo de auto apagado.	Modo de auto apagado actual
b	Conmuta modo Bluetooth.	Aviso de activado/desactivado.
f	Cambia formato de datos impresos.	Formato actual.
g	Conmuta indicación de rango por GPIO.	Aviso de activado/desactivado.
r	Reinicia en <i>bootloader</i> .	Aviso de reinicio.
s	Cambia número de muestras del ADC.	Modo de ADC actual.
t	Conmuta información de depuración de los <i>pads</i> táctiles.	Aviso de activado/desactivado.
u	Conmuta modo USB.	Aviso de activado/desactivado.
<	Reduce valor del LDO (-1 mV).	Valor actual del LDO.
>	Aumenta valor del LDO (+1 mV).	Valor actual del LDO.
+	Aumenta valor de la ganancia (+1).	Valor actual de la ganancia.
-	Reduce valor de la ganancia (-1).	Valor actual de la ganancia.
*	Aumenta valor del <i>offset</i> (+1).	Valor actual del <i>offset</i> .
/	Reduce valor del <i>offset</i> (-1).	Valor actual del <i>offset</i> .
1	Rango en mA.	Nada.
2	Rango en $\mu$ A.	Nada.
3	Rango en nA.	Nada.
4	Conmuta el LPF.	Nada.
5	Conmuta el modo BIAS.	Nada.
6	Conmuta el modo auto rango.	Nada.
?	Imprime valores de calibración y menú de comandos.	Información del dispositivo y lista de comandos.

## 3.3. Pruebas de funcionamiento

- Primera conexión



```
COM4
?
Enviar

CurrentRanger R3 (firmware v. 1.1.3)

ADC calibration values:
Offset=0
Gain=2048
LDO=3.285

EEPROM Settings:
LoggingFormat=0
ADCSamplingSpeed=0
AutoOff=600
BT Logging: 0
USB Logging: 0

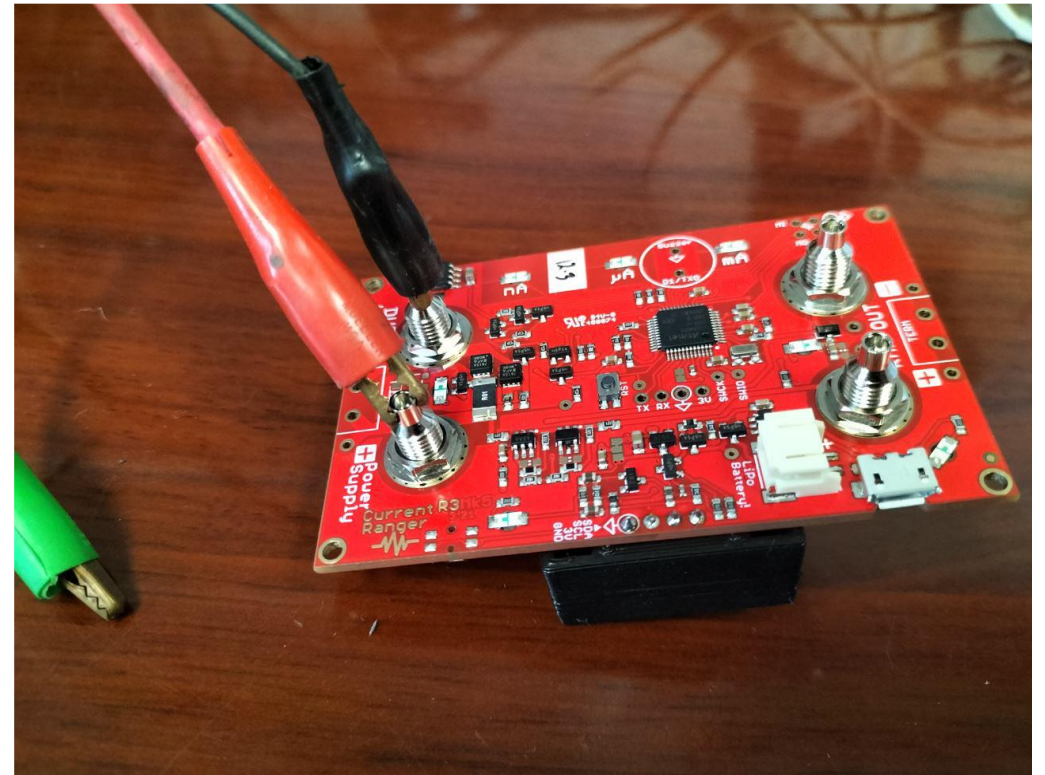
a = cycle Auto-Off function
b = toggle BT/serial logging (230400baud)
f = cycle serial logging formats (exponent,nA,uA,mA/raw-ADC)
g = toggle GPIO range indication (SCK=mA,MISO=uA,MOSI=nA)
r = reboot into bootloader
s = cycle ADC sampling speeds (0=average,faster,slower)
t = toggle touchpad serial output debug info
u = toggle USB/serial logging
< = Calibrate LDO value (-1mV)
> = Calibrate LDO value (+1mV)
+ = Calibrate GAIN value (+1)
- = Calibrate GAIN value (-1)
* = Calibrate OFFSET value (+1)
/ = Calibrate OFFSET value (-1)
1 = range to MilliAmps (mA)
2 = range to MicroAmps (uA)
3 = range to NanoAmps (nA)
4 = toggle Low Pass Filter (LPF)
5 = toggle BIAS (disables AutoRanging)
6 = toggle AutoRanging (disables BIAS)
? = Print this menu and calib info

☒ Autoscroll ☐ Mostrar marca temporal Nueva línea 500000 baudio Limpiar salida
```



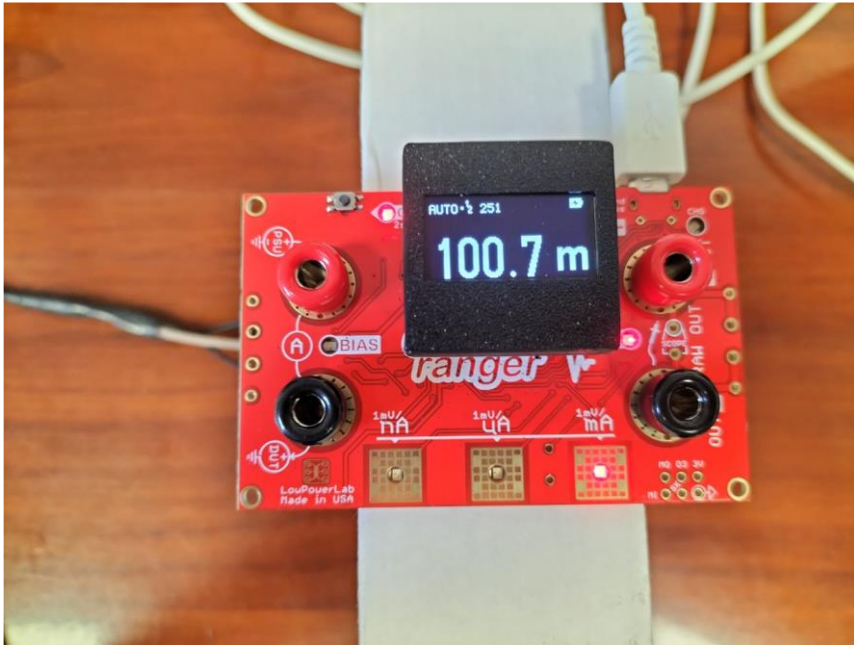
## 3.3. Pruebas de funcionamiento

- Fuente de corriente



## 3.3. Pruebas de funcionamiento

- Medición de corriente continua



Valor real de la corriente	Rango de mediciones	Precisión	Tolerancia	Error absoluto medio	Error relativo medio
100 nA	[36.7 , 169.2] nA	$102.95 \pm 66.2$ nA	64.30%	2.95	2.90%
500 nA	[474.3 , 586.2] nA	$525.2 \pm 60.9$ nA	11.60%	25.2	5.04%
50 $\mu$ A	[49.2, 50.4] $\mu$ A	$49.8 \pm 0.6$ $\mu$ A	1.20%	0.2	0.40%
100 $\mu$ A	[99.4 , 101.2] $\mu$ A	$100.3 \pm 0.9$ $\mu$ A	0.89%	0.3	0.30%
500 $\mu$ A	[499.2 , 501.2] $\mu$ A	$500.2 \pm 1$ $\mu$ A	0.20%	0.2	0.04%
10 mA	[9.2 , 10] mA	$9.6 \pm 0.4$ mA	4.16%	0.4	4%
50 mA	[49.7, 50.9] mA	$50.3 \pm 0.6$ mA	1.19%	0.3	0.60%
100 mA	[99.1 , 100.7] mA	$99.9 \pm 0.8$ mA	0.80%	0.1	0.10%

## 3.4. Mejoras de firmware

- Cambio nombre de comandos

? → INFO

1 → MA

+ → GAIN+

< → LDO-

- Nuevos comandos

ACMEAS

ACBUFFER

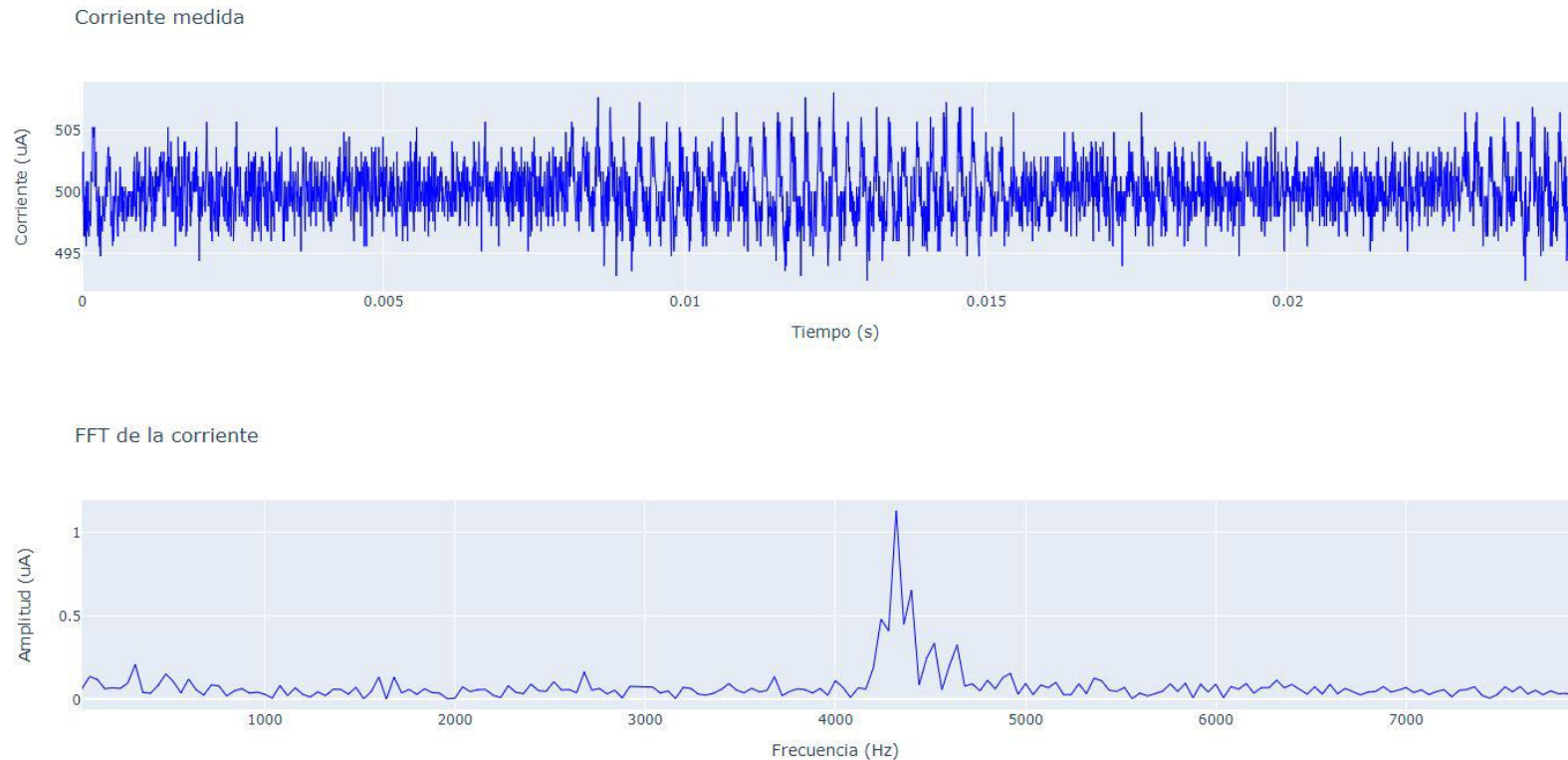
DCMEAS

VBAT

LPF:ON / LPF:OFF

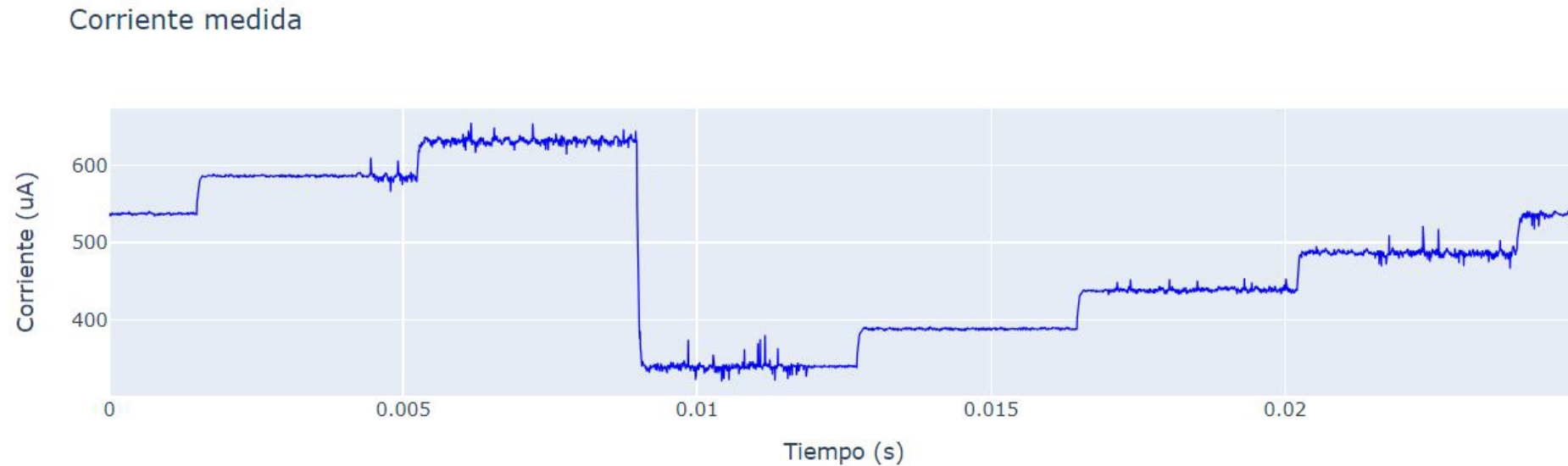
## 3.4. Mejoras del firmware

- Medidas a la máxima frecuencia



## 3.4. Mejoras del firmware

- Medidas a la máxima frecuencia



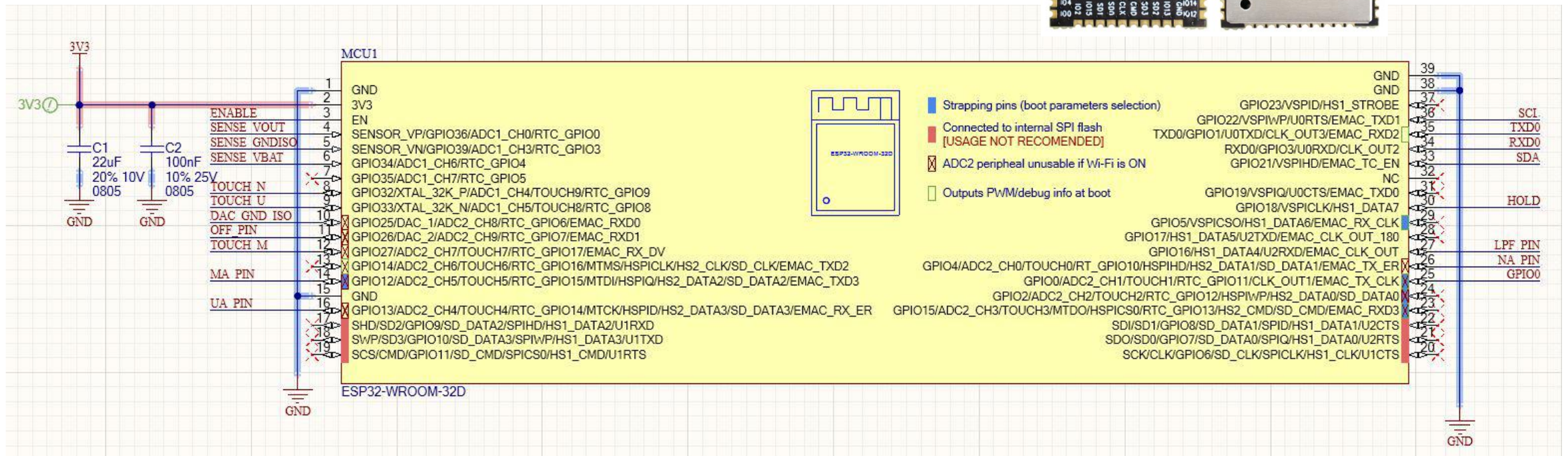
# 4. Rediseño del medidor de corriente

- Razones para rediseñar el CurrentRanger R3
  - Microcontrolador ESP32:
    1. Capacidades inalámbricas: Bluetooth.
    2. Mayor memoria interna
    3. Facilidad de programación y abundancia de información
  - Conector USB-C
  - Conectores de entrada de corriente más robustos



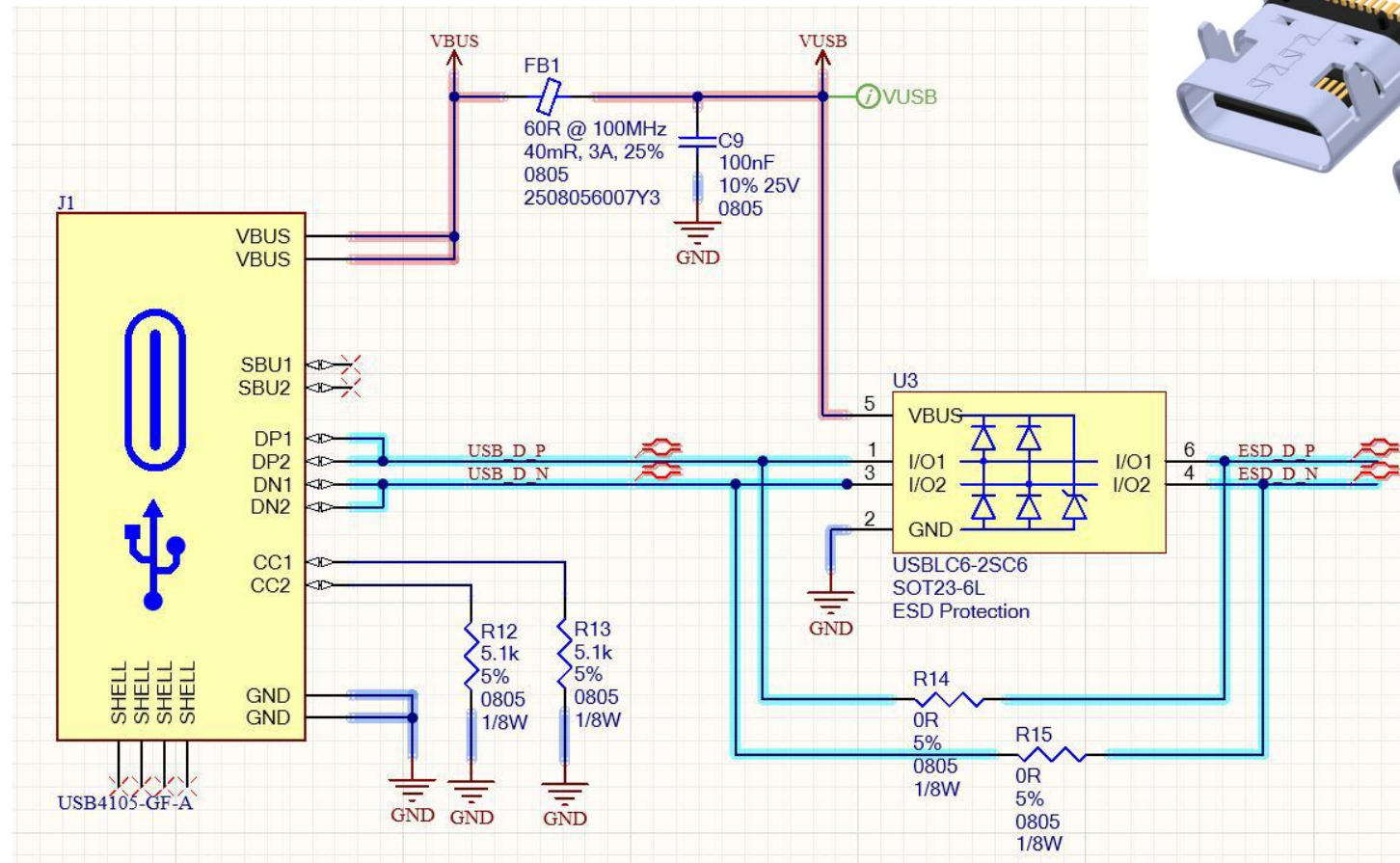
# 4.1. Diseño del circuito electrónico

- Microcontrolador ESP32-WROOM-32E



# 4.1. Diseño del circuito electrónico

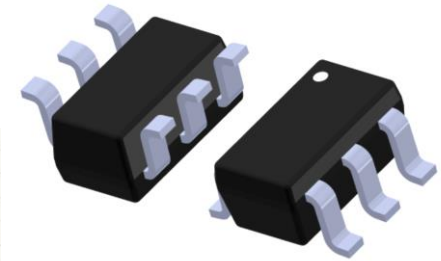
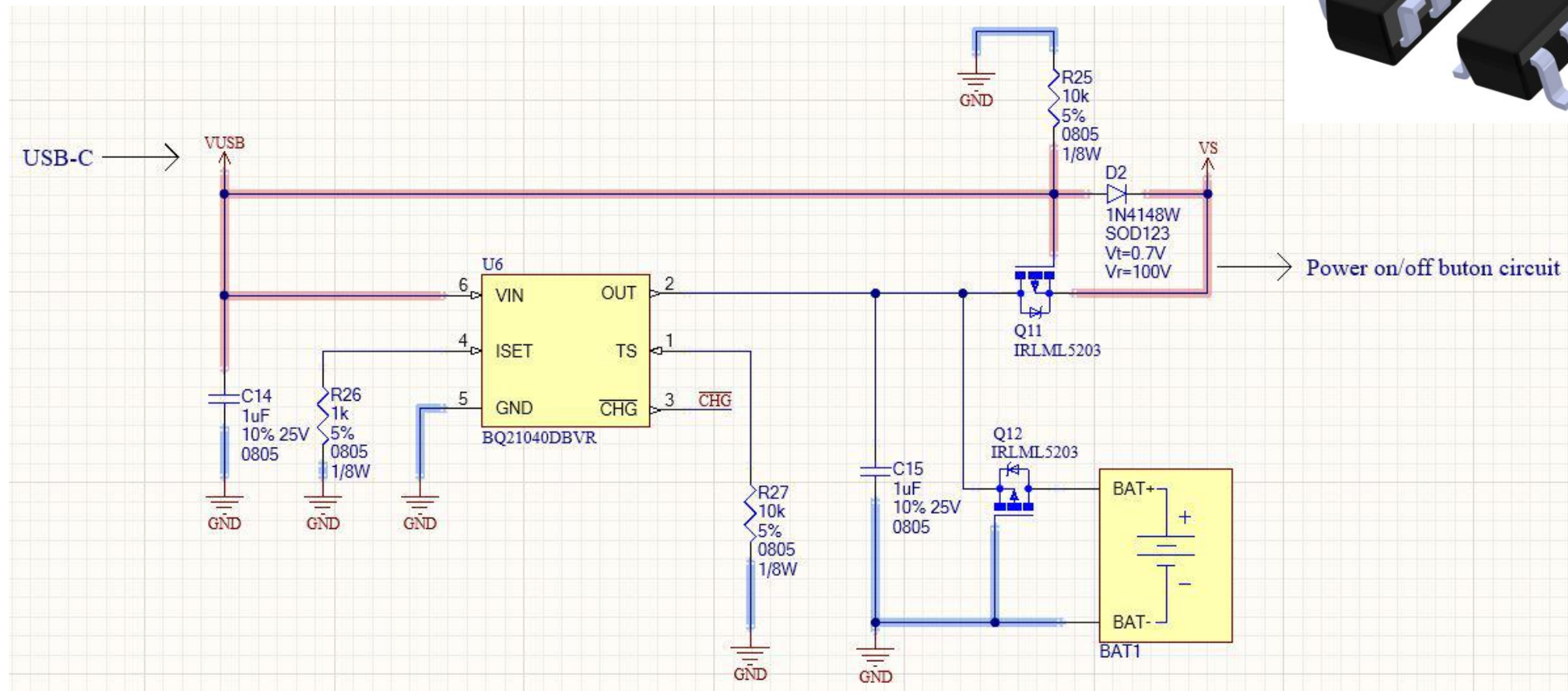
- Conector USB-C





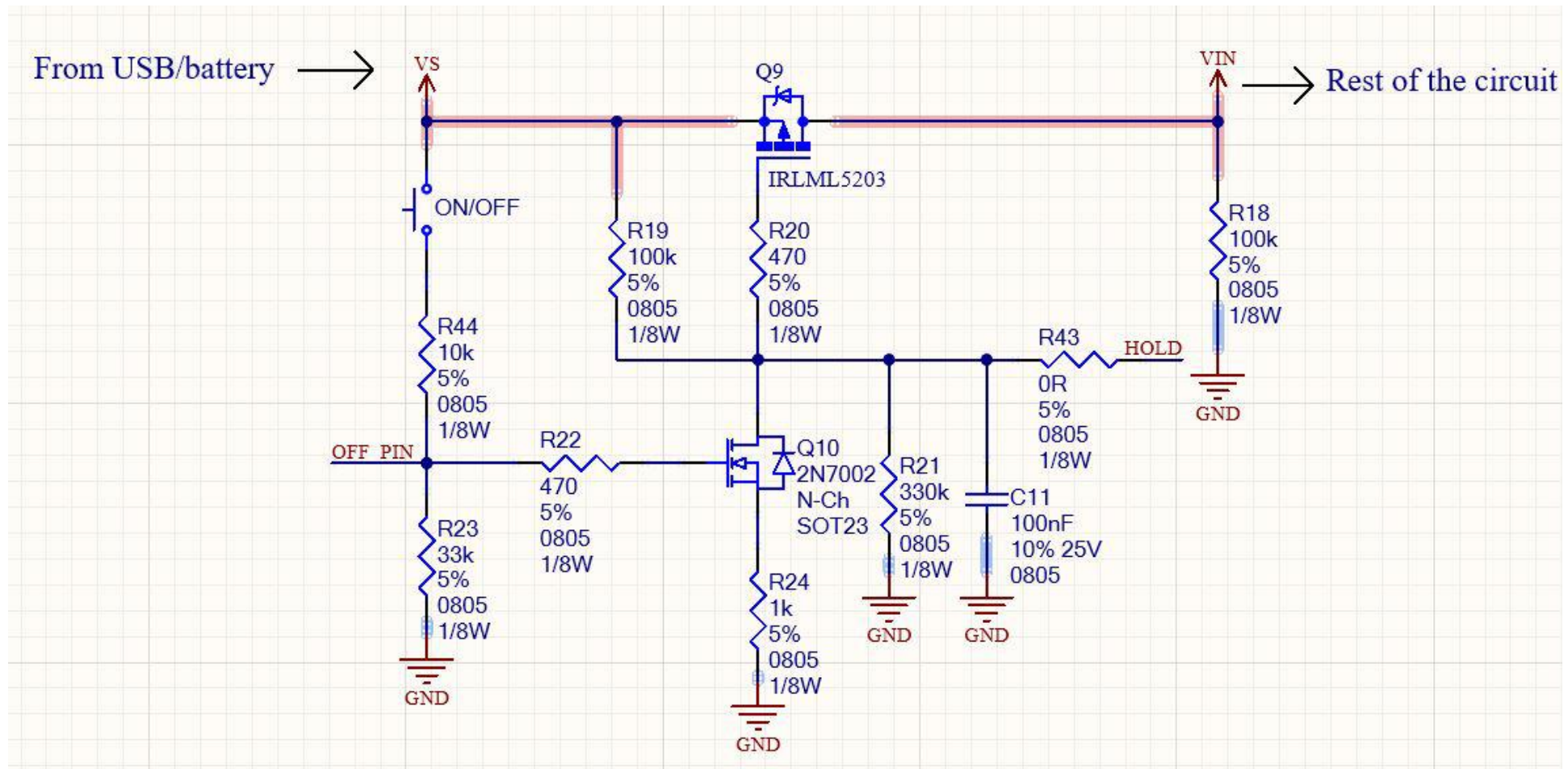
# 4.1. Diseño del circuito electrónico

- Cargador de batería BQ21040



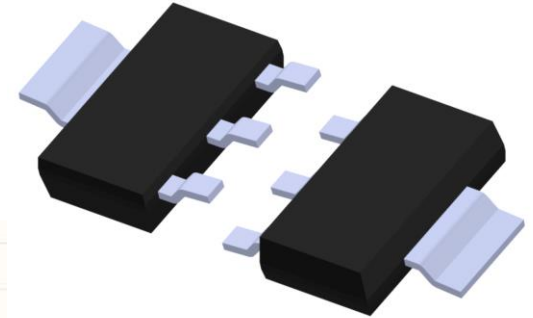
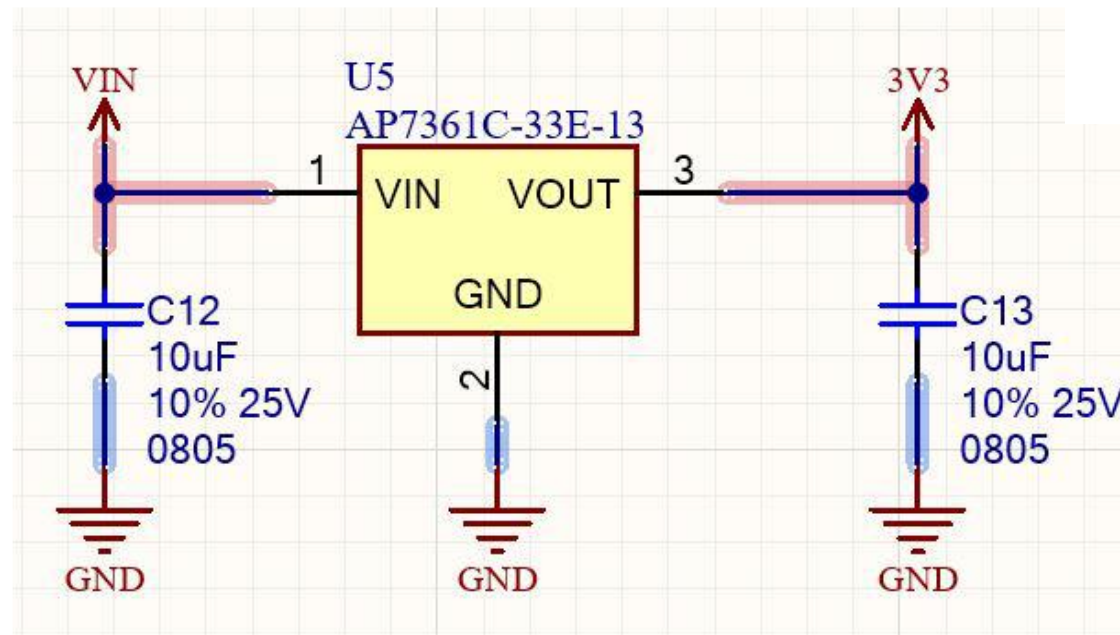
## 4.1. Diseño del circuito electrónico

- Botón de encendido/apagado



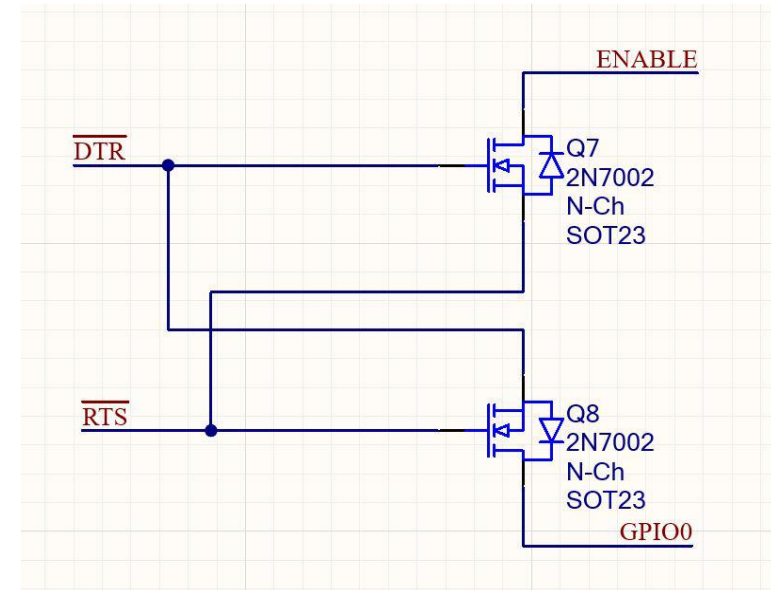
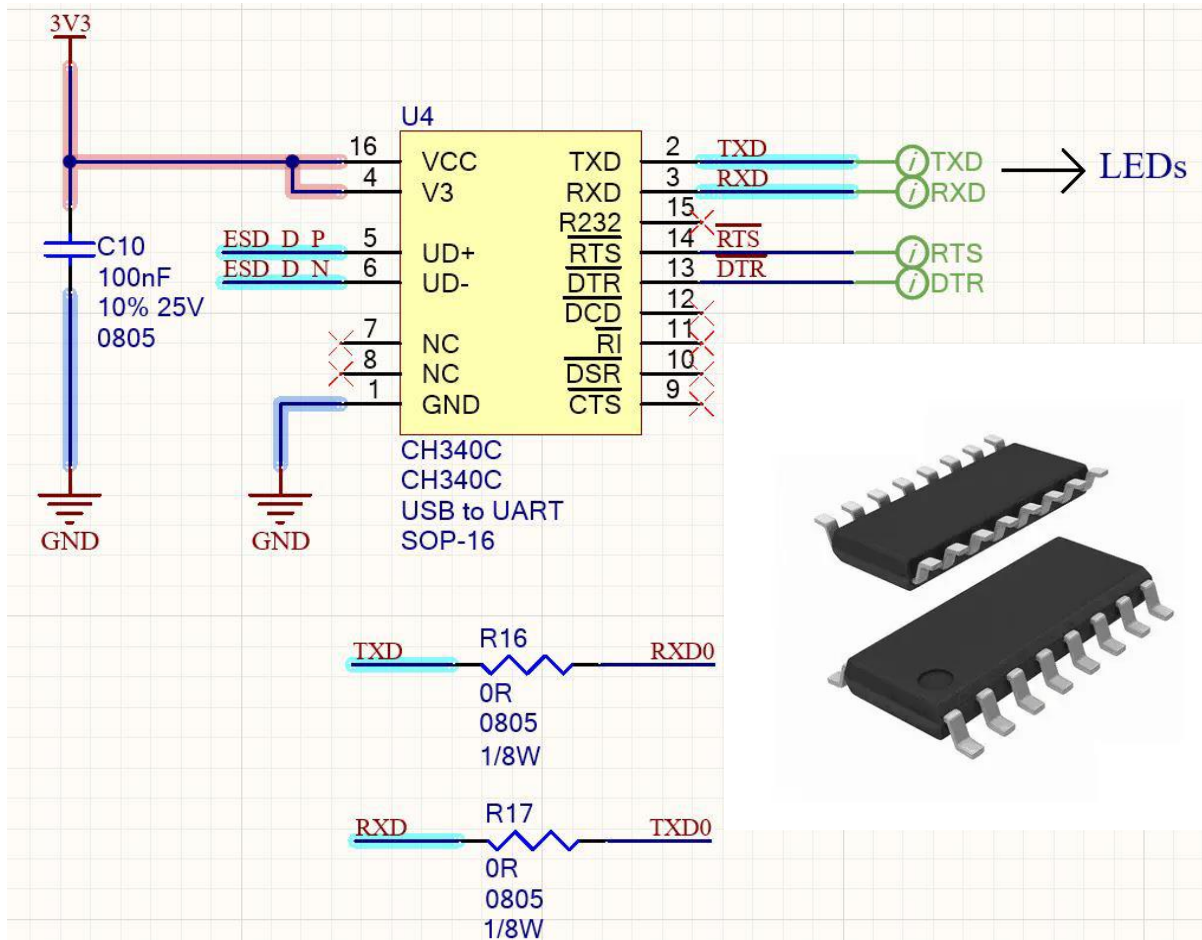
## 4.1. Diseño del circuito electrónico

- Regulador de tensión AP7361C



# 4.1. Diseño del circuito electrónico

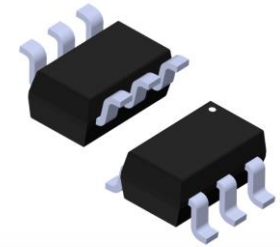
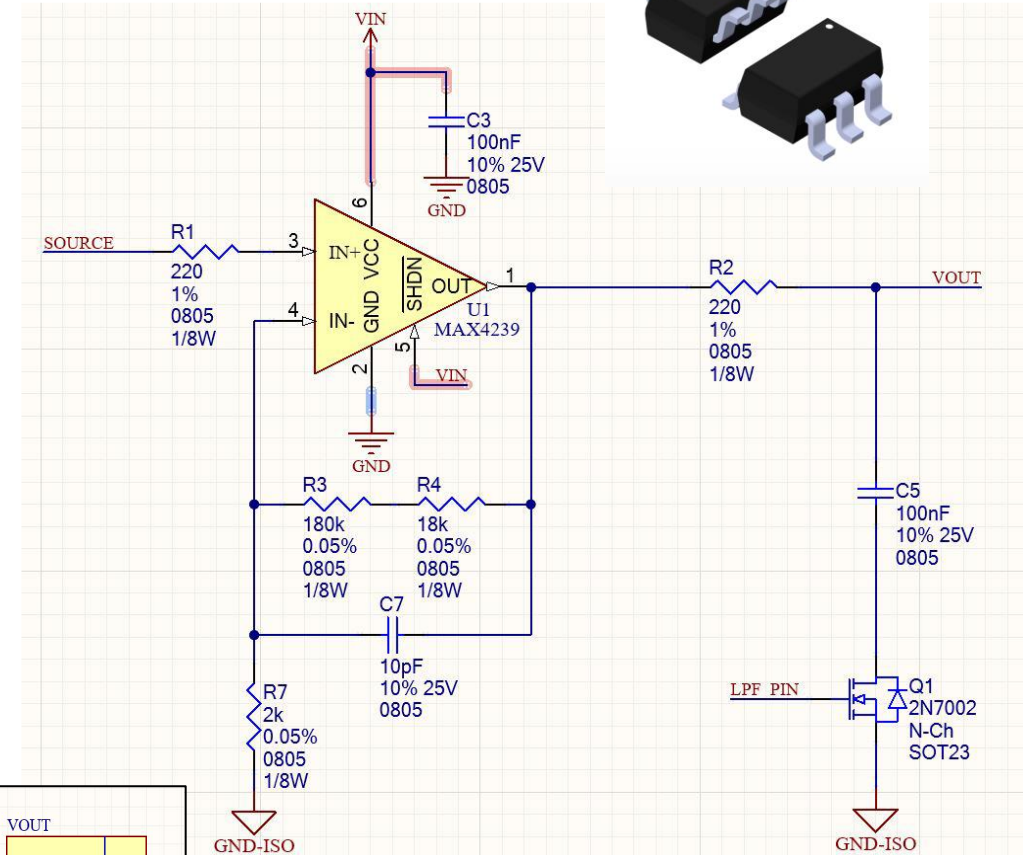
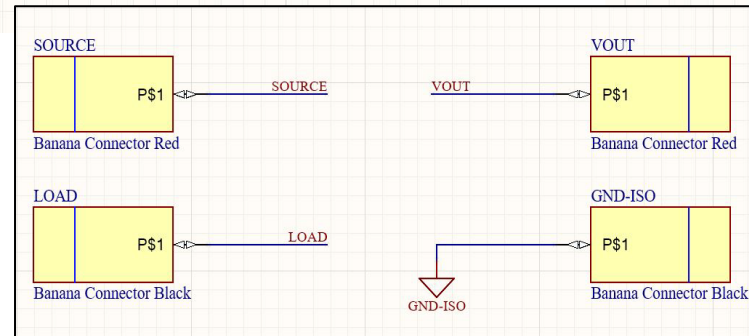
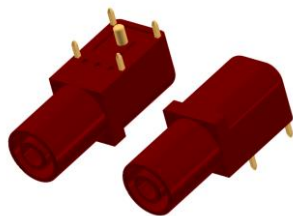
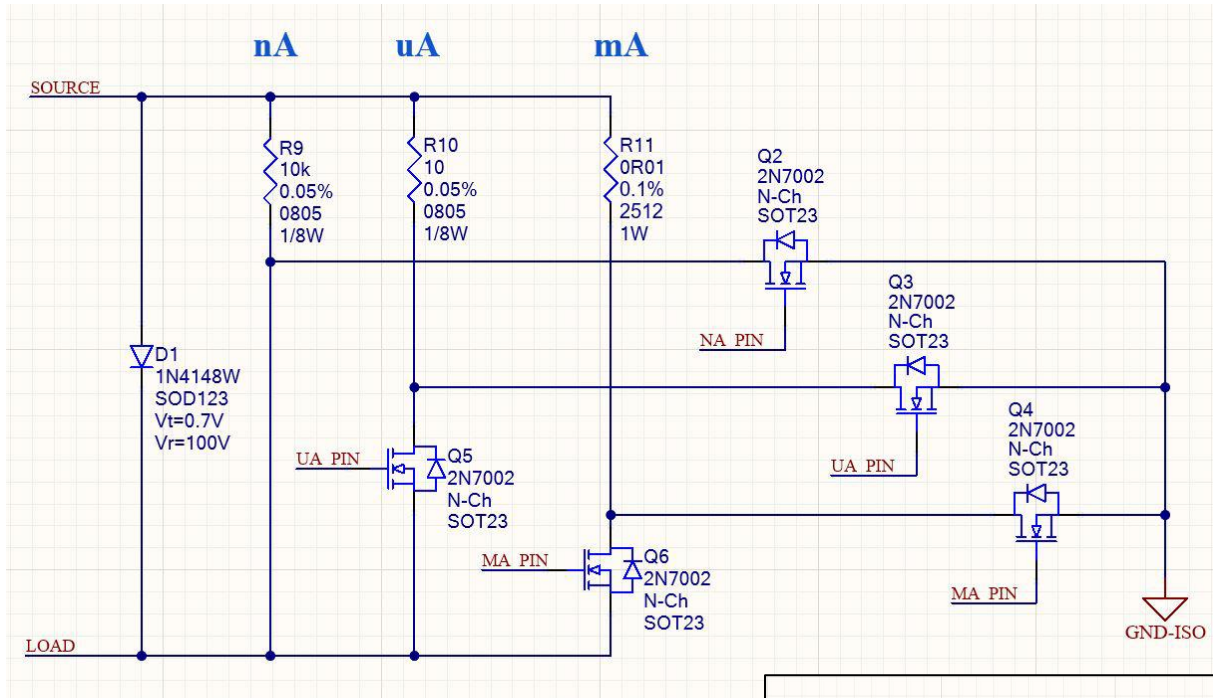
- Convertidor USB a UART CH340C





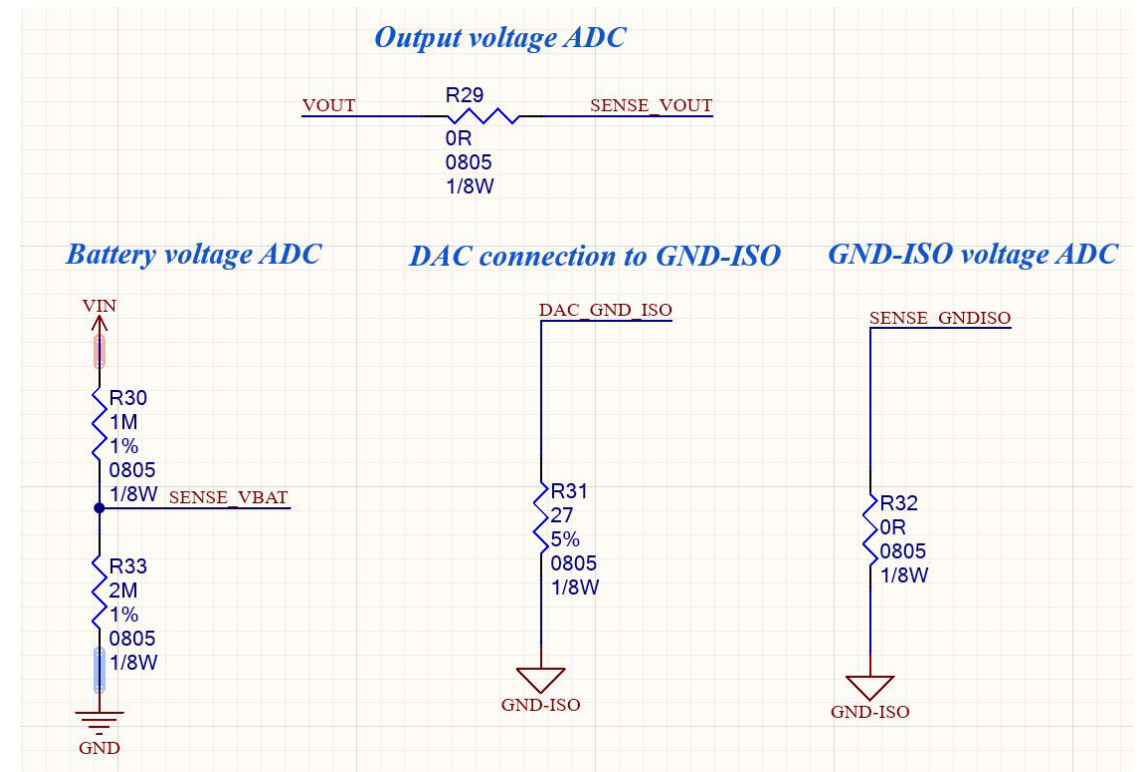
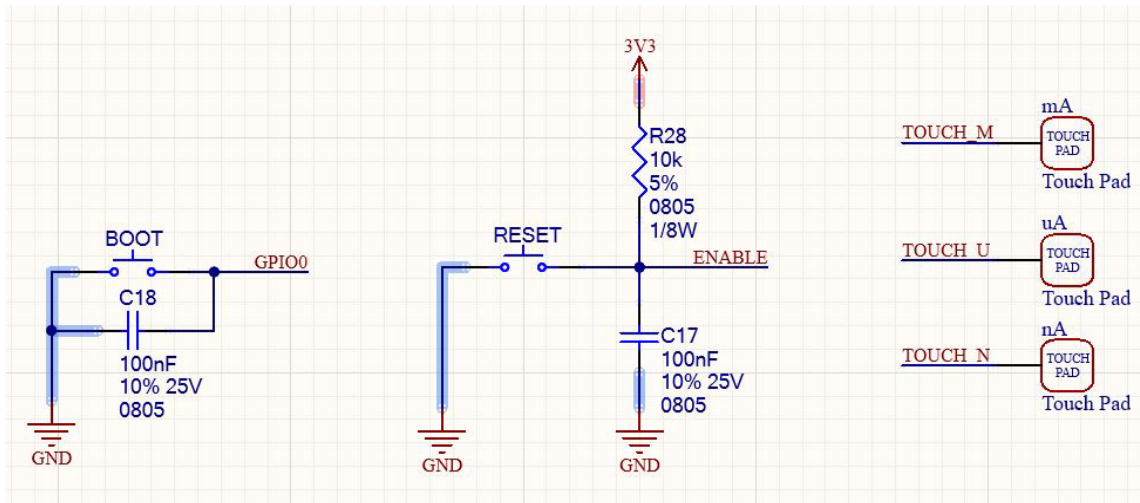
# 4.1. Diseño del circuito electrónico

- Control de medición y amplificación



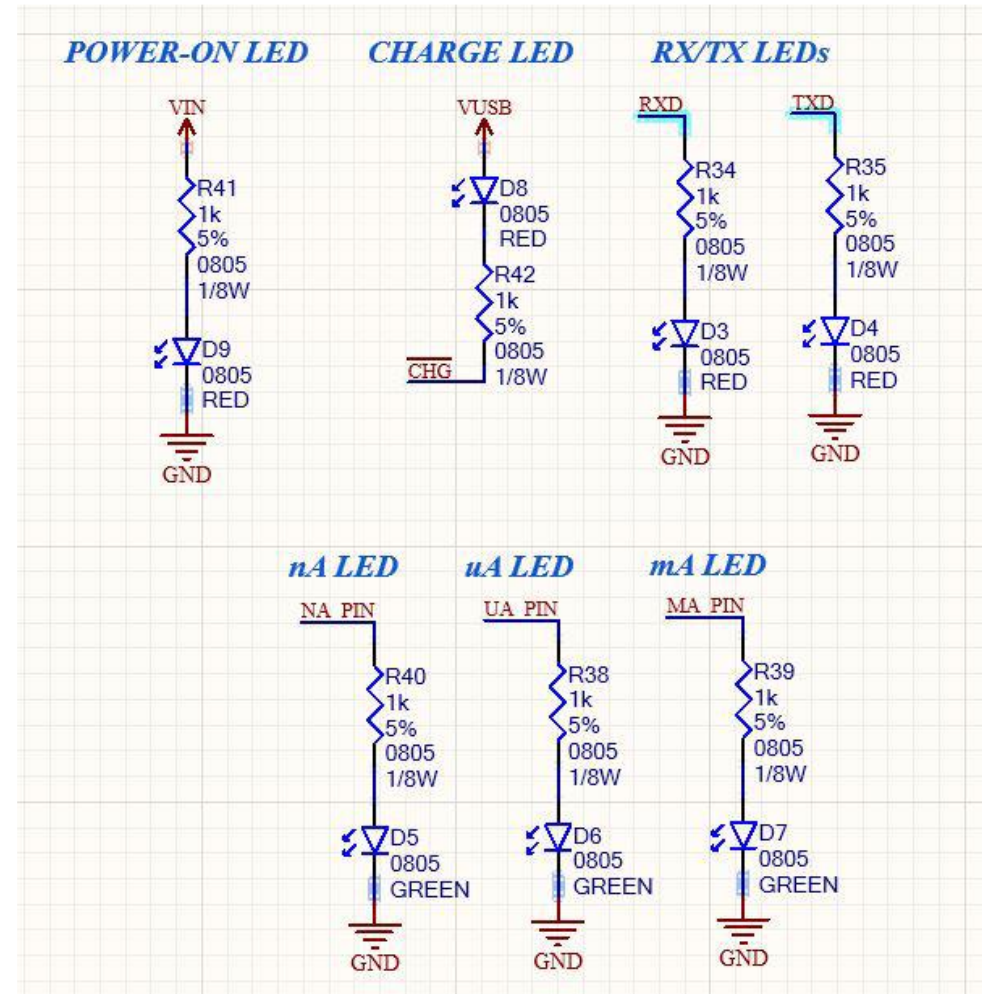
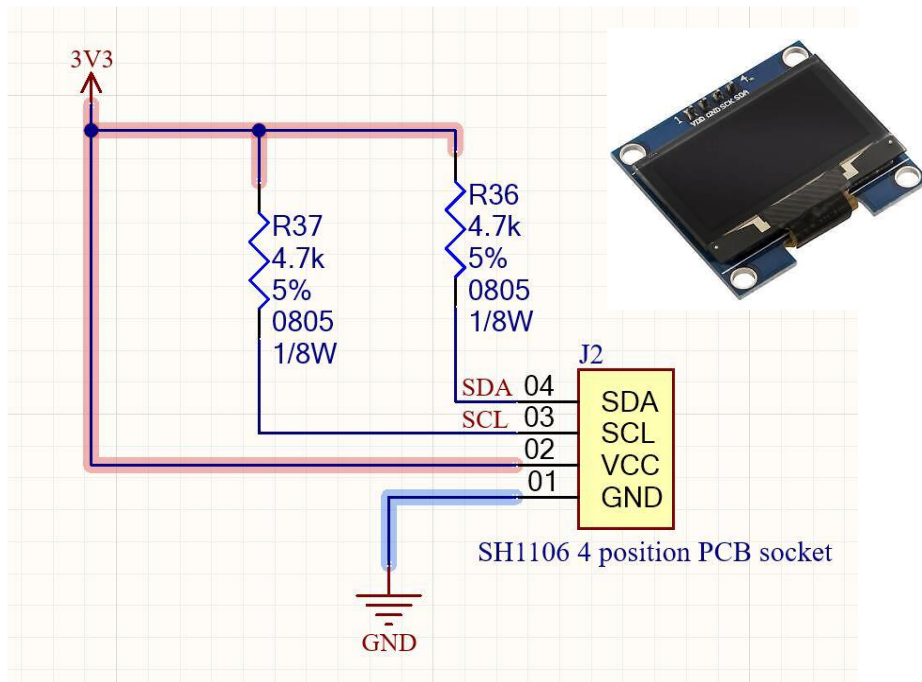
# 4.1. Diseño del circuito electrónico

- Pulsadores y ADC



# 4.1. Diseño del circuito electrónico

- LEDs y pantalla OLED



## 4.1. Diseño del circuito electrónico

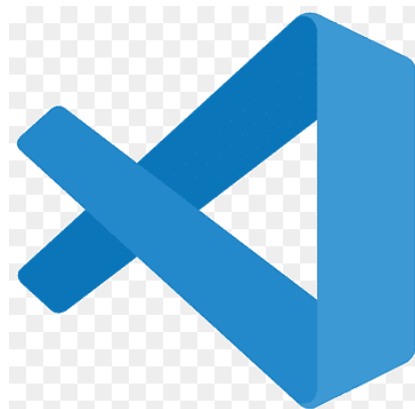
- Consumo estimado del sistema

Componente	Corriente máxima (mA)	Corriente media (mA)	Voltaje (V)	Potencia media (mW)
ESP32-WROOM-32E	500	130	3.3	429.0
BQ21040	500	1	-	5.0
AP7361C	-	-	0.4	150.0
MAX4238	0.6	0.6	4	2.4
CH340C	20	7	3.3	23.1
SH1106	27	27	3.3	89.1
7 LEDs	9.1	9.1	2	18.2
1N4148W	-	-	0.7	100.0
<b>Total</b>	<b>1056.7</b>	<b>174.7</b>	<b>-</b>	<b>816.8</b>



## 4.2. Diseño del firmware

- Decisiones de diseño
  - Se parte del código empleado para el CurrentRanger R3
  - Se han mantenido las modificaciones hechas sobre el código
  - Editor de código: Visual Studio Code con la extensión PlatformIO



## 4.2. Diseño del firmware

- Librerías

```
#include "../lib/esp32/Arduino.h"
#include "../lib/U8g2/src/U8g2lib.h"
#include "../lib/driver/adc.h"
#include "../lib/esp_adc_cal/esp_adc_cal.h"
#include "../lib/BluetoothSerial/src/BluetoothSerial.h"
#include "../lib/Preferences/src/Preferences.h"
#include "../lib/Wire/src/Wire.h"
#include "../include/serial.h"
#include "../include/common.h"
#include "../include/utils.h"
#include "../lib/driver/i2s.h"
```

## 4.2. Diseño del firmware

Funciones eliminadas	Funciones modificadas	Funciones nuevas
Reinicio en bootloader	Calibración del ADC	Uso del ADC con I2S
Velocidad del ADC	Lectura del ADC	Bluetooth
Actualización del LDO	Impresión valores búfer	Reinicio (watchdog)
Aviso sonor con buzzer	Watchdog	Lectura pulsador on/off
	Sensores táctiles	

## 4.2. Diseño del firmware

- FreeRTOS
  - Sistema operativo de los microcontroladores ESP32
  - Permite organizar el programa en tareas
  - Proporciona mayor velocidad y control sobre la ejecución
  - Tareas utilizadas:

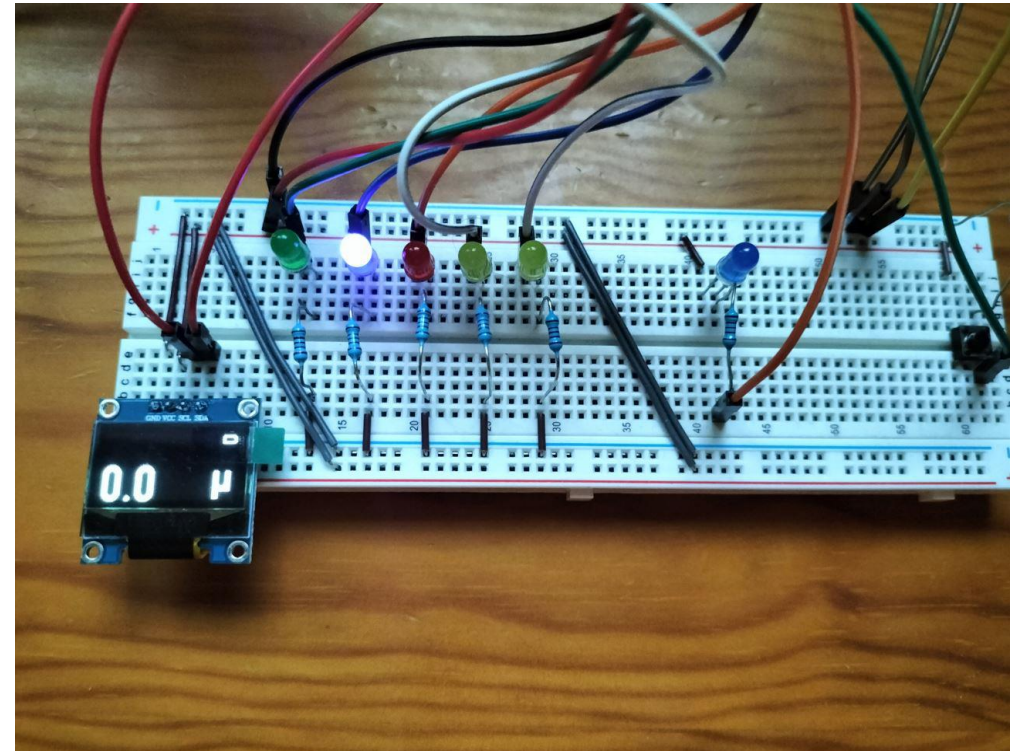
```
xTaskCreate(handleTouchPads, "handleTouchPads()", 1024, NULL, 0, &handleTouch);  
xTaskCreate(handleOffButton, "handleOffButton()", 1024, NULL, 0, &handleOff);  
xTaskCreate(handleAutoOff, "handleAutoOff()", 1024, NULL, 0, &handleAutoOff);  
xTaskCreate(WDTclear, "WDTclear()", 1024, NULL, 0, &ClearWDT);
```

## 4.2. Diseño del firmware

- Prueba de funcionamiento del firmware



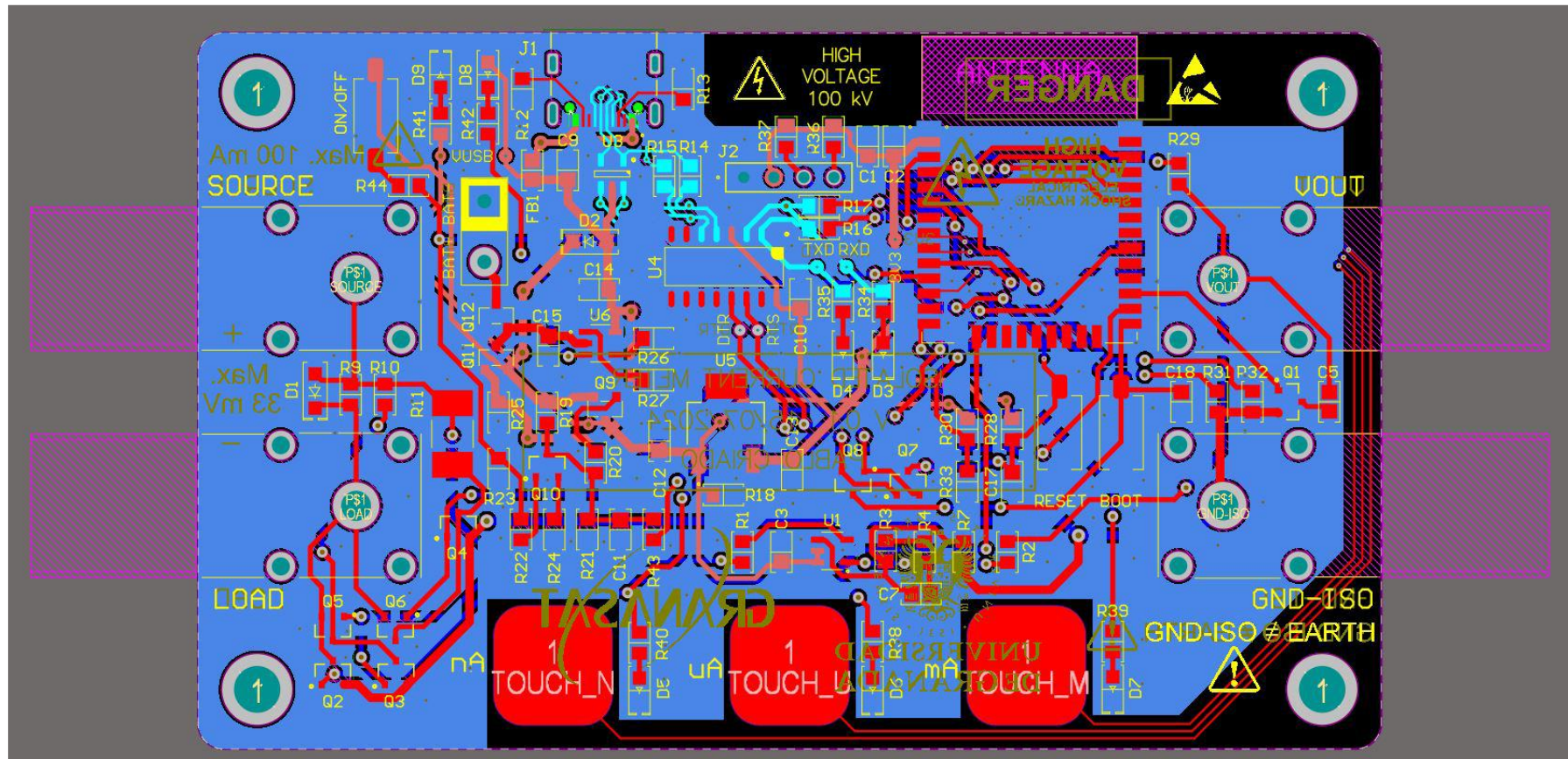
```
Archiving .pio\build\esp32dev\libFrameworkArduino.a
Linking .pio\build\esp32dev\firmware.elf
Retrieving maximum program size .pio\build\esp32dev\firmware.elf
Checking size .pio\build\esp32dev\firmware.elf
Advanced Memory Usage is available via "PlatformIO Home > Project Inspect"
RAM: [===      ] 32.7% (used 107176 bytes from 327680 bytes)
Flash: [===== ] 90.0% (used 1179133 bytes from 1310720 bytes)
Building .pio\build\esp32dev\firmware.bin
```





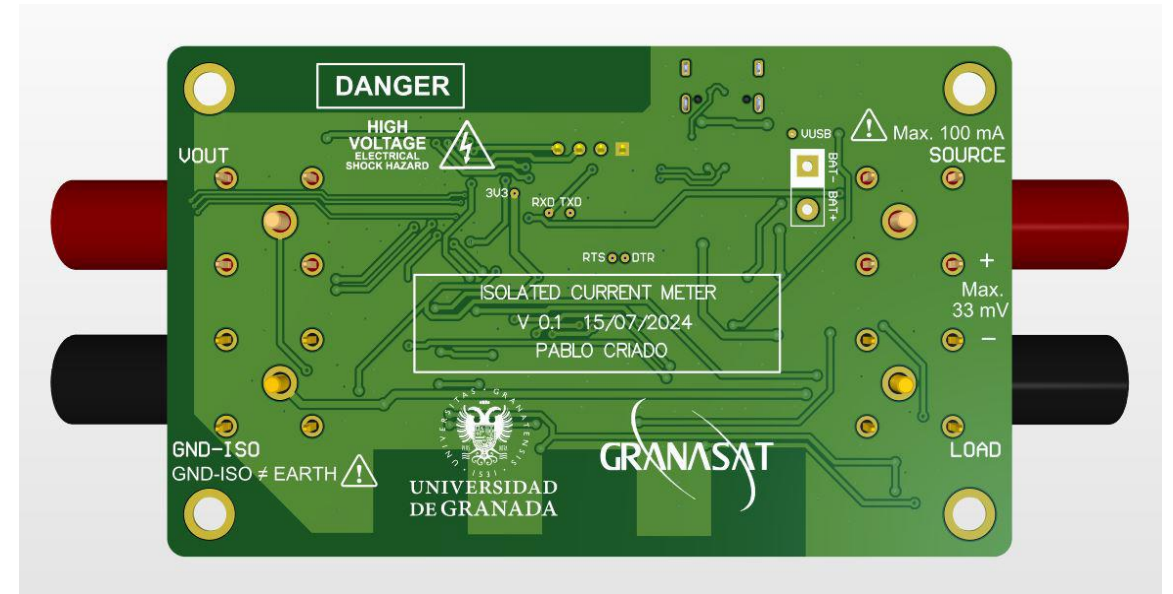
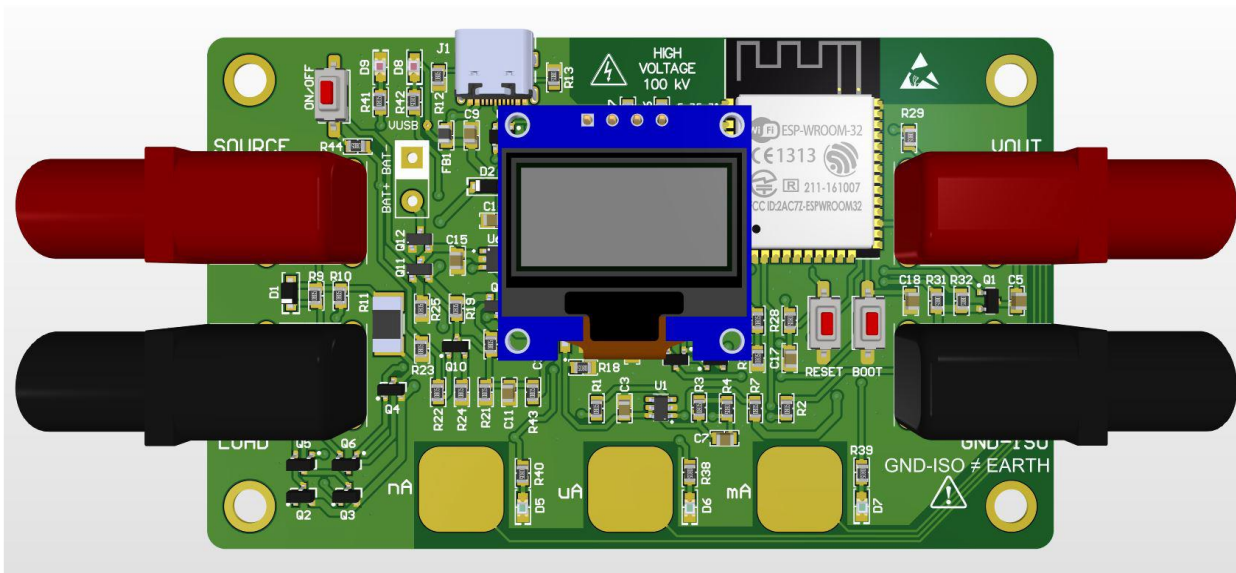
## 4.3. Diseño de la PCB

- Diseño en 2D de la PCB



## 4.3. Diseño de la PCB

- Vista en 3D de la PCB



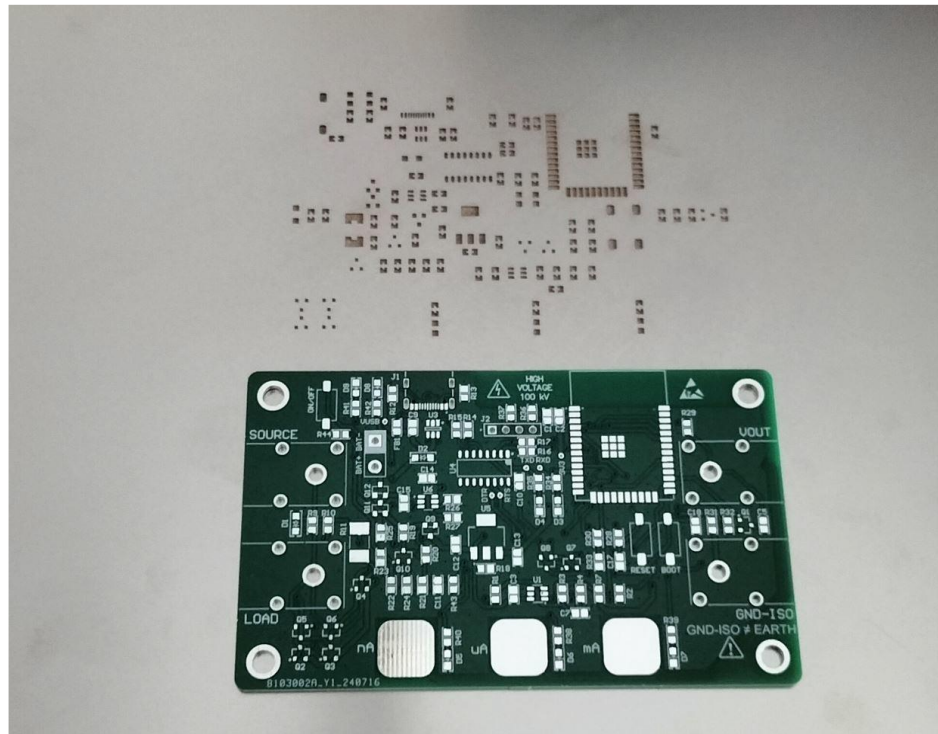
## 4.4. Montaje de la PCB

- Opciones de fabricación
  - Material de fabricación: FR4
  - Capas: 2
  - Dimensiones: 100 x 60 mm
  - Grosor de la placa: 1.6 mm
  - Acabado superficial: HASL sin plomo
  - Se incluye *stencil*



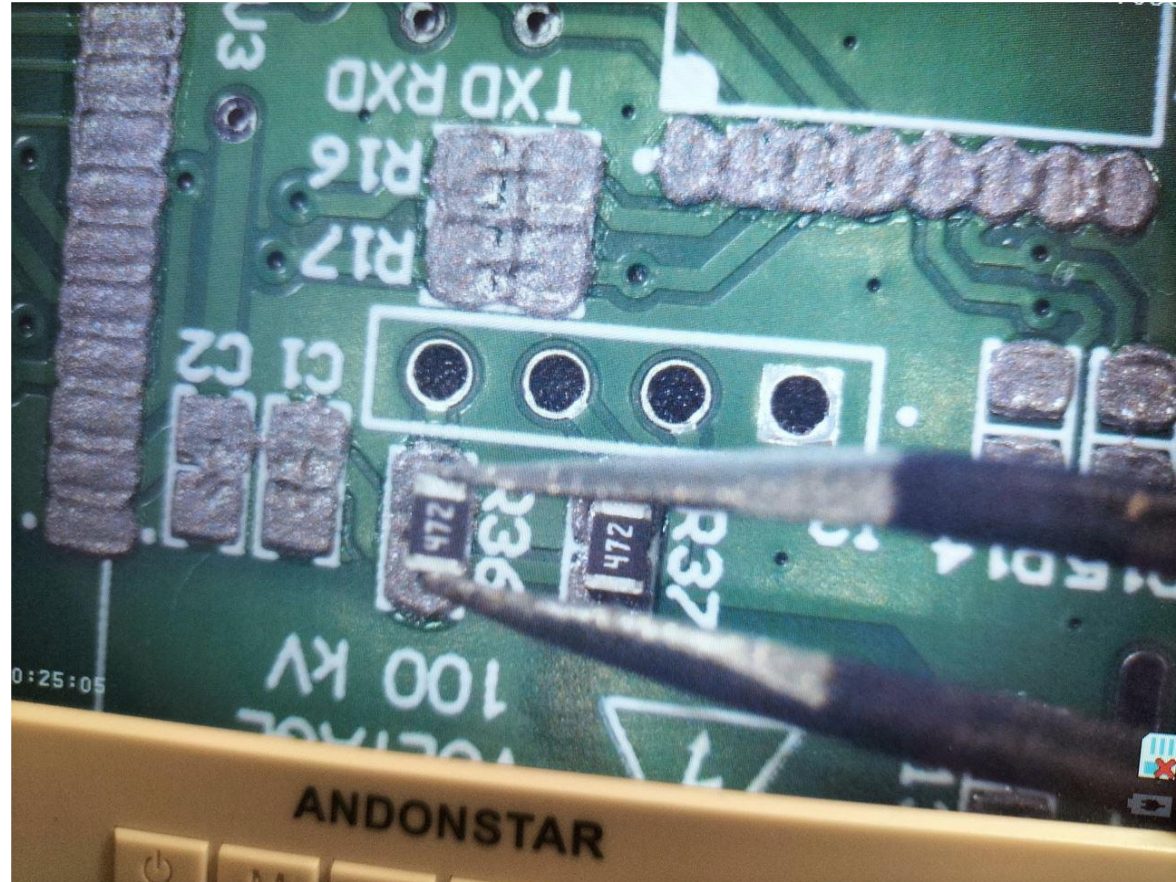
## 4.4. Montaje de la PCB

- *Stencil* y pasta de soldadura



## 4.4. Montaje de la PCB

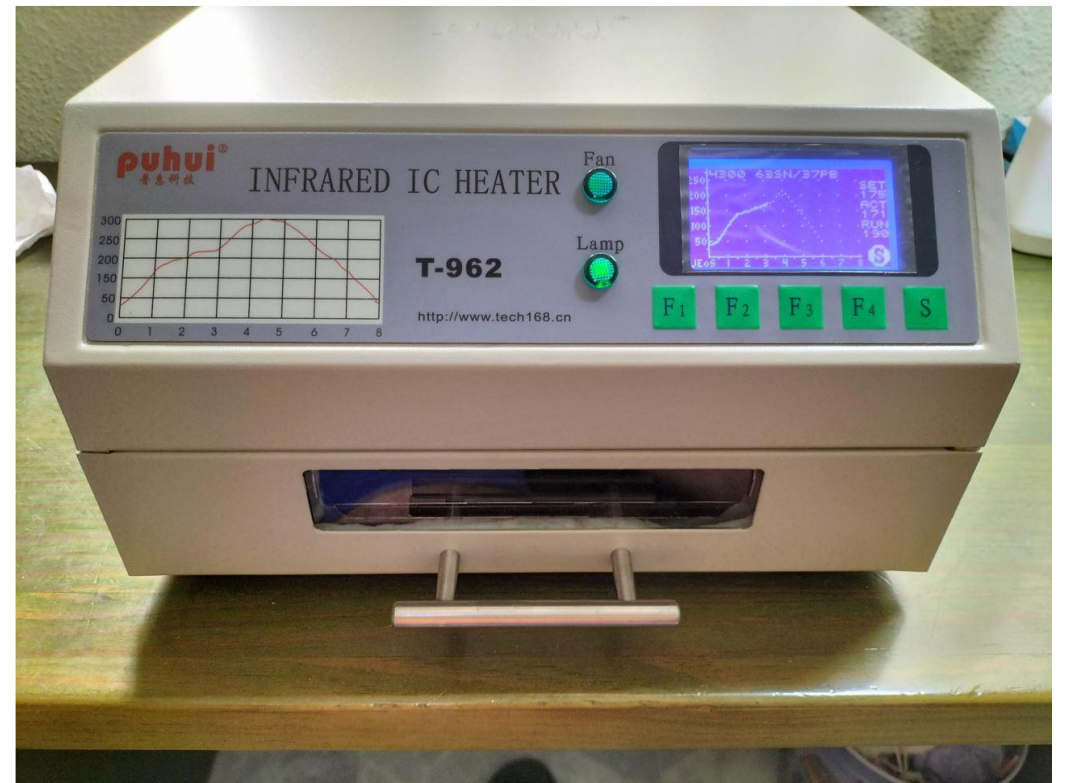
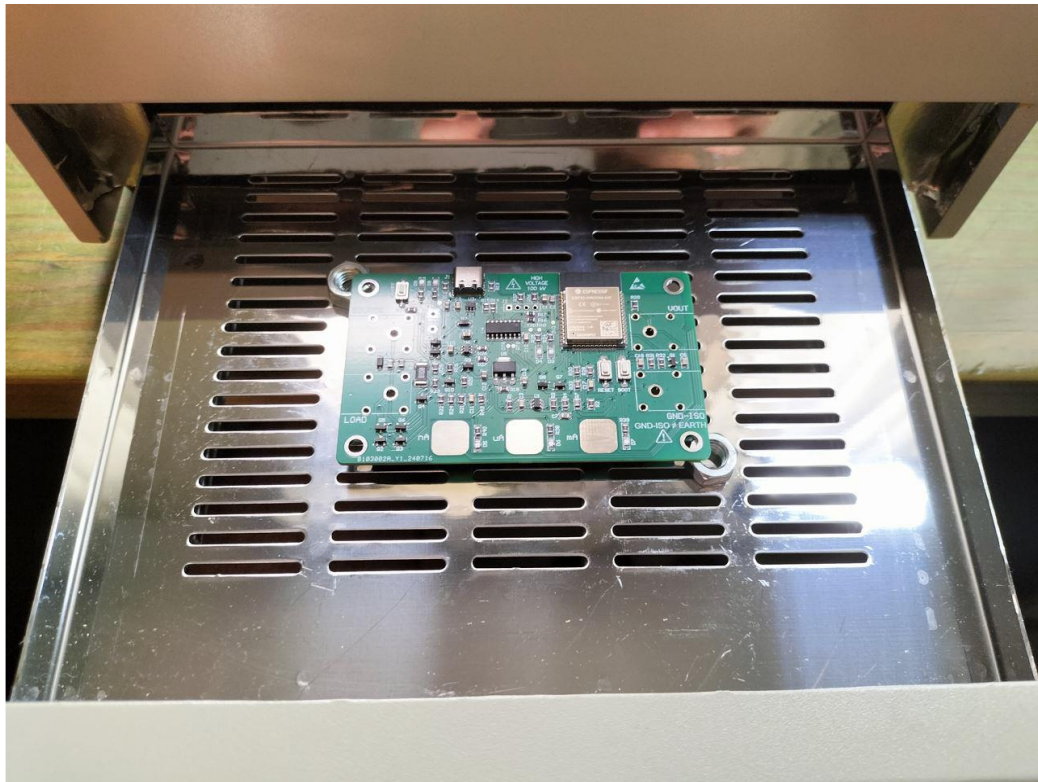
- Colocación de componentes





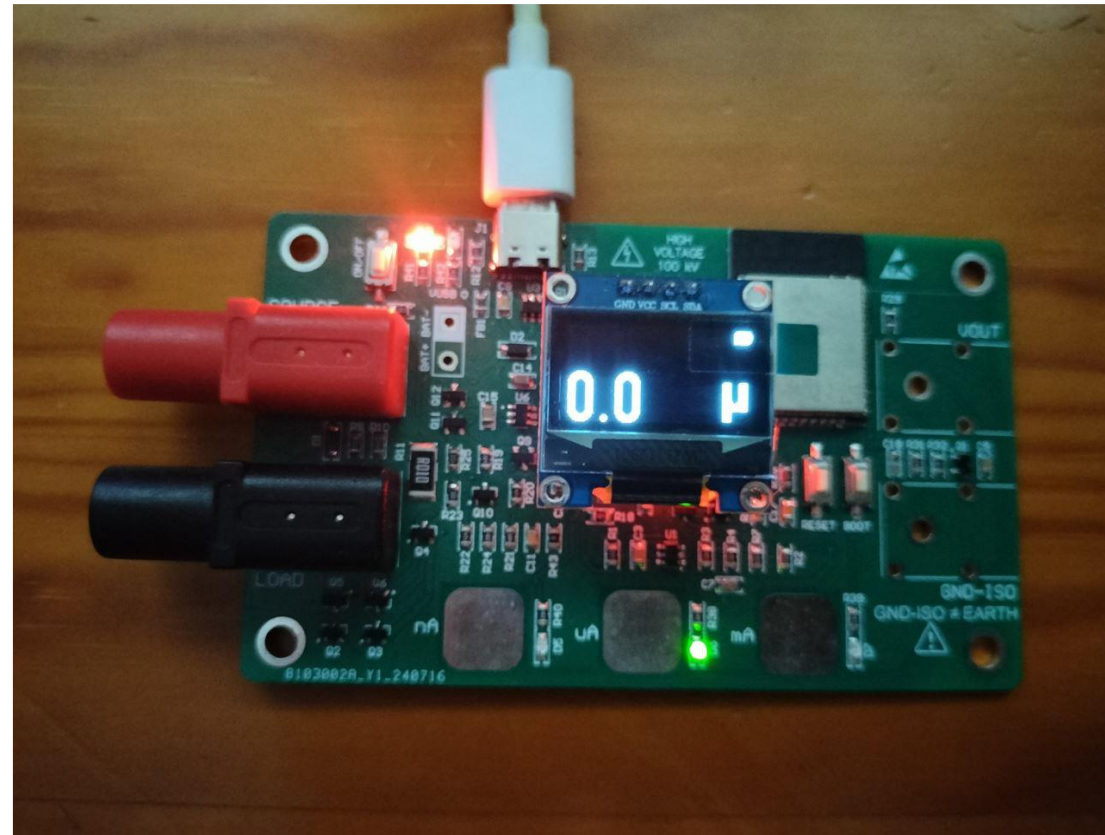
## 4.4. Montaje de la PCB

- Soldadura en horno infrarrojo



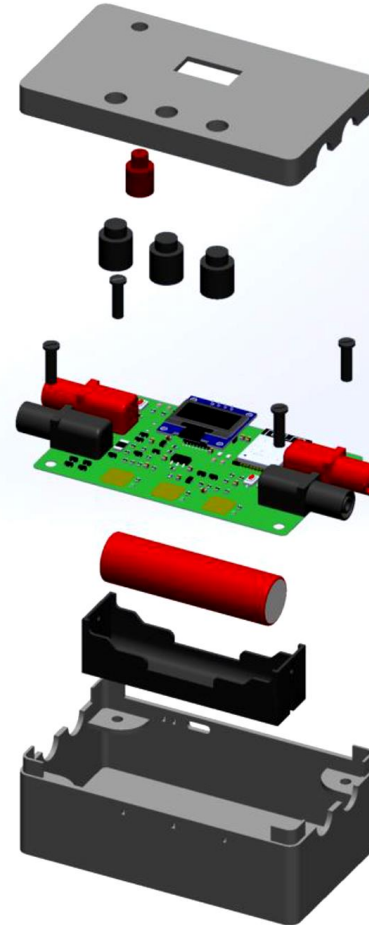
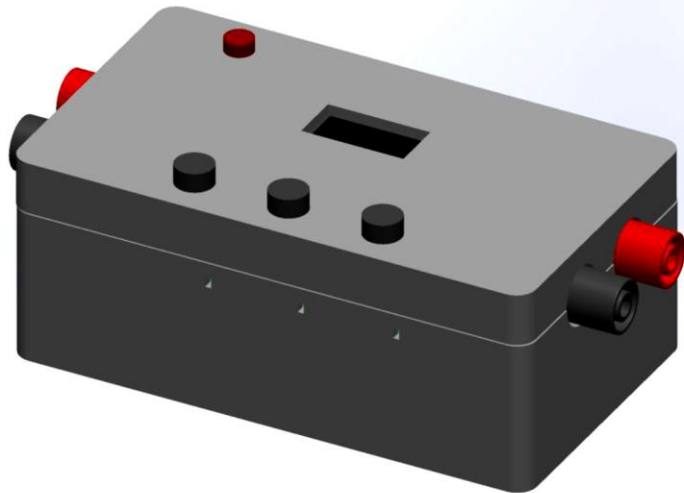
## 4.4. Montaje de la PCB

- Prueba de encendido



## 4.4. Montaje de la PCB

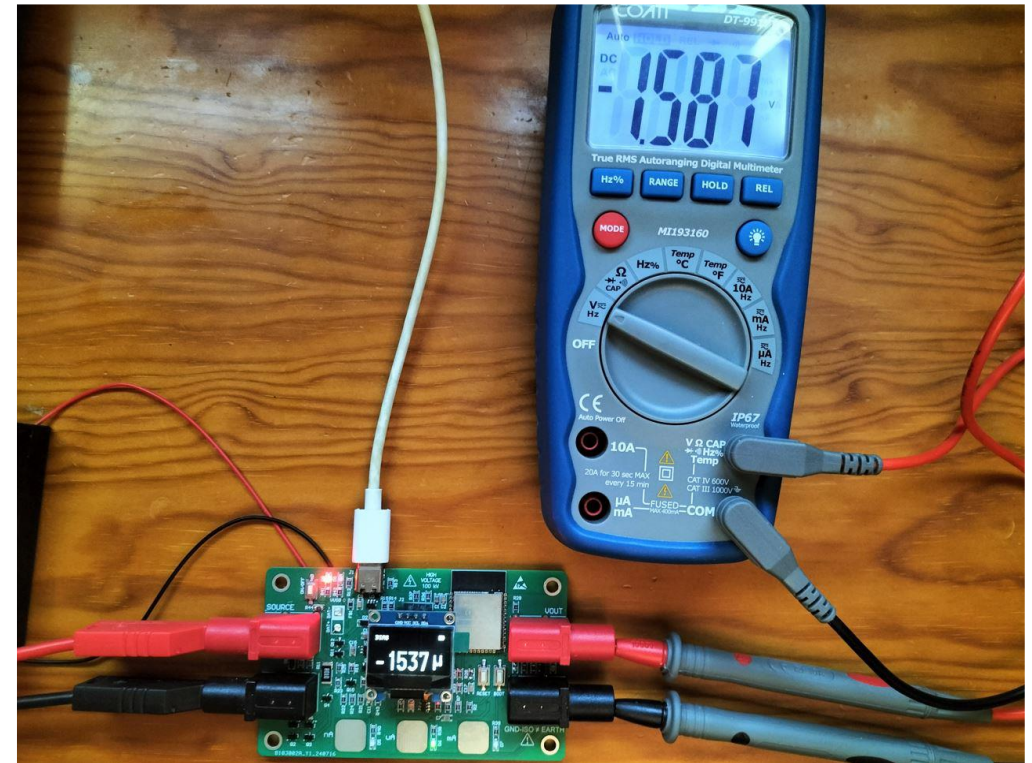
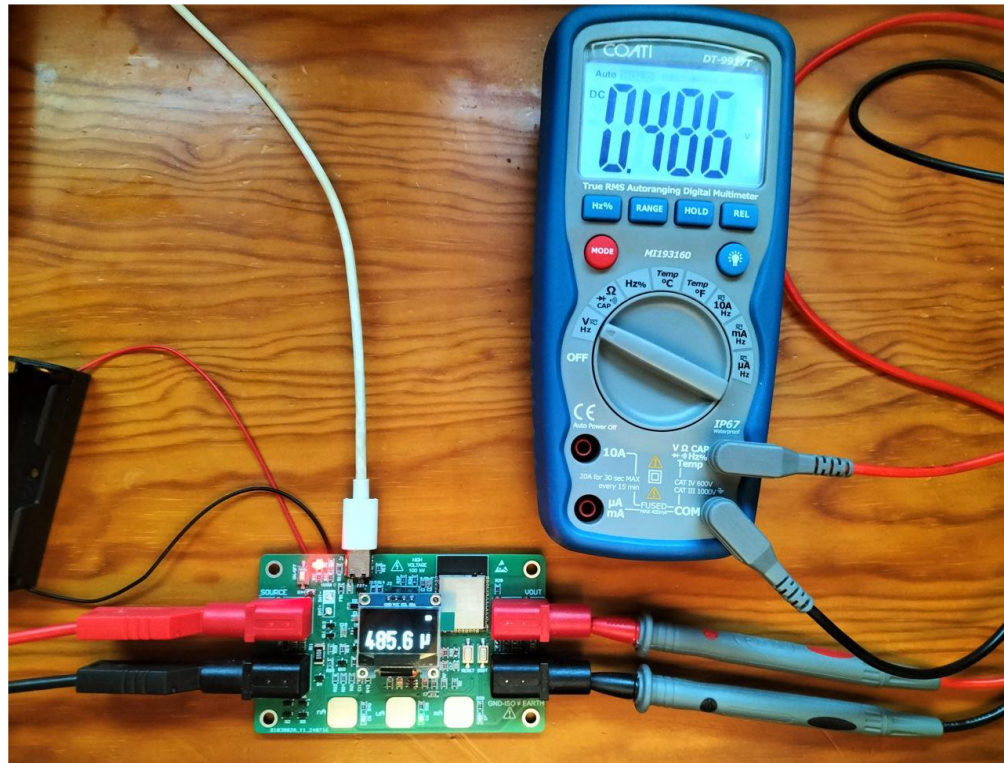
- Diseño de la carcasa





## 4.5. Pruebas del medidor de corriente

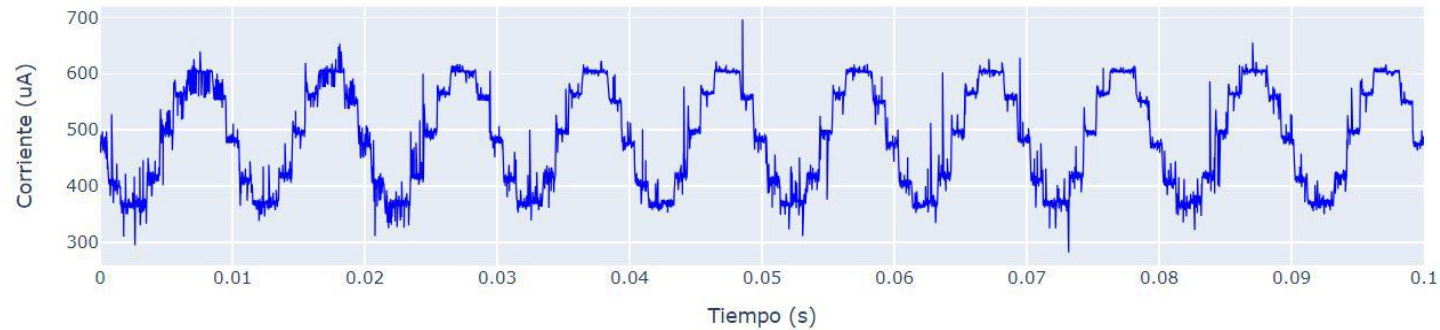
- Pruebas de medición



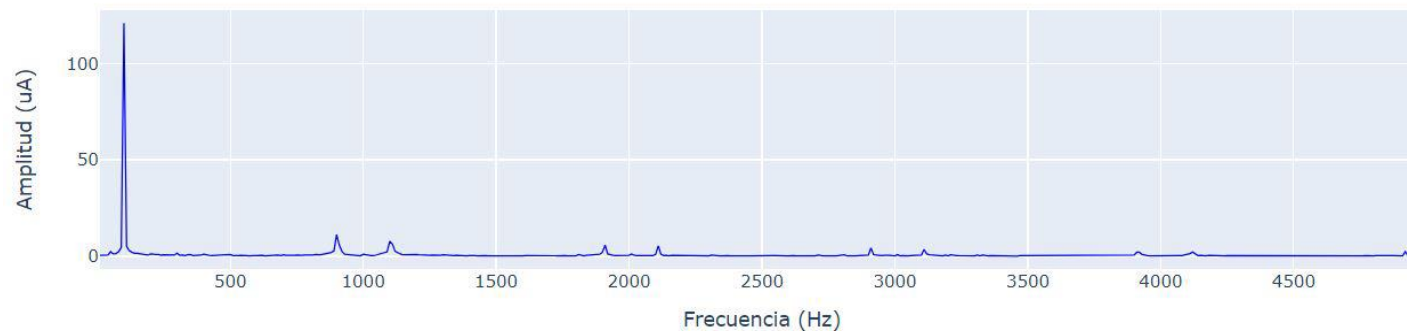
## 4.5. Pruebas del medidor de corriente

- Pruebas de medición

Corriente medida

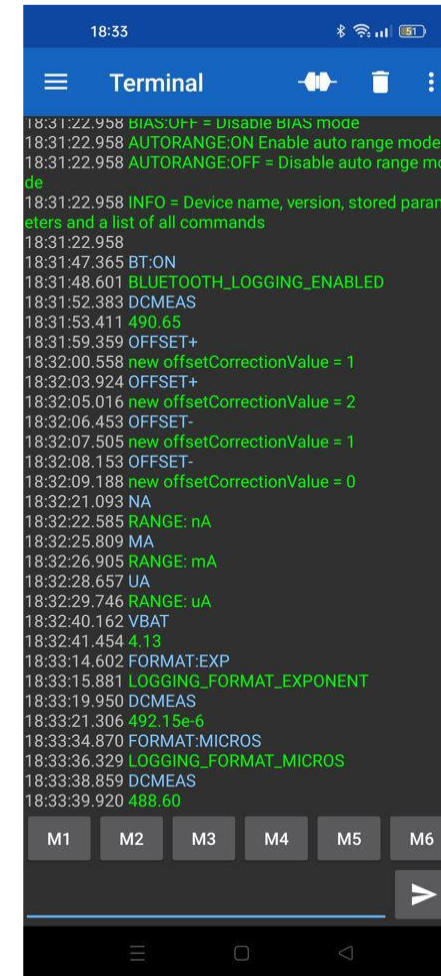
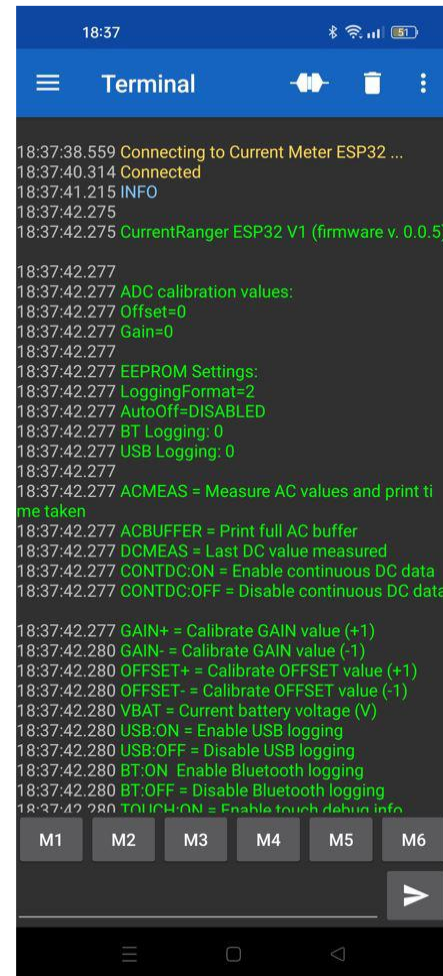
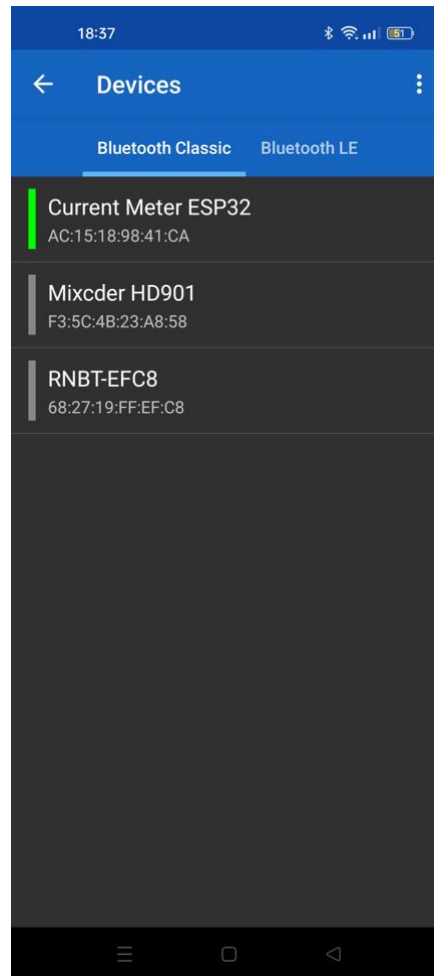


FFT de la corriente



## 4.5. Pruebas del medidor de corriente

- Comunicación por Bluetooth





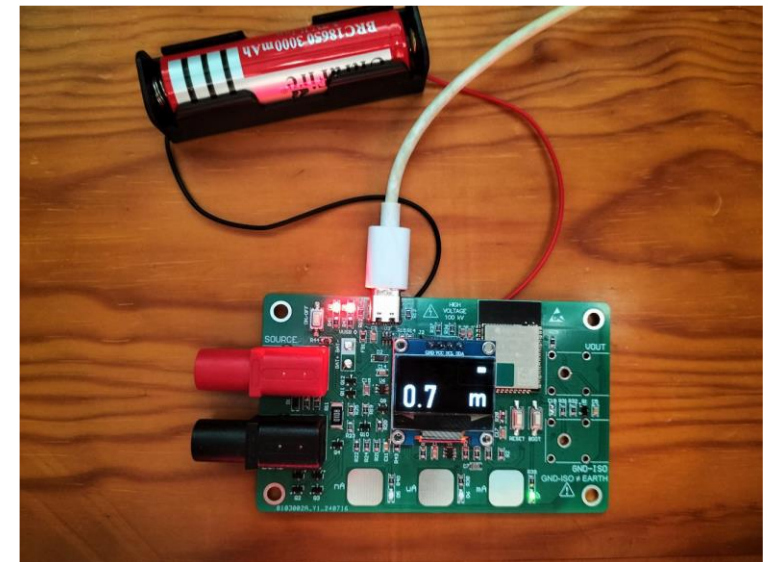
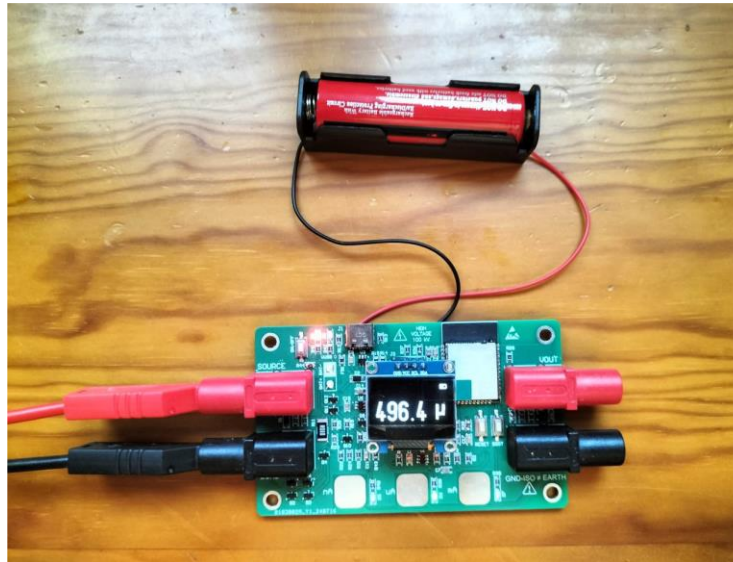
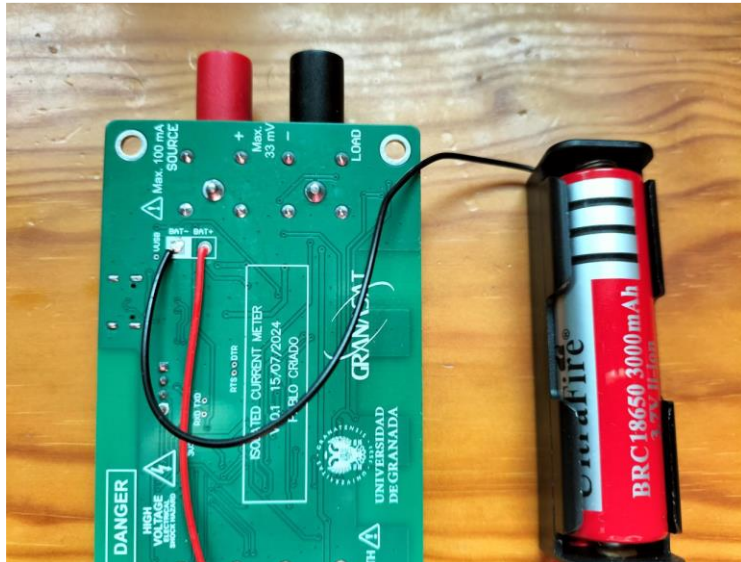
## 4.5. Pruebas del medidor de corriente

- Pruebas de la batería



## 4.5. Pruebas del medidor de corriente

- Pruebas de la batería





## 4.5. Pruebas del medidor de corriente

- Errores detectados

- Ha sido necesario desoldar un condensador para permitir el reinicio automático del microcontrolador al recibir alimentación.
- Es necesario mantener pulsado el botón de encendido mientras se realiza la subida de un programa.
- El sistema no enciende al pulsar el botón cuando funciona con batería, sino que debe encenderse conectando un cable USB y desenchufando después.
- Las medidas en algunos intervalos no son muy exactas. Se necesitan más ramas con distintas resistencias para lograr mayor precisión.

## 5. Conclusiones

- Se han cumplido los requisitos definidos al comienzo del trabajo.
- Los errores permiten diseñar una segunda versión del producto.
- Quedan pendientes pruebas de funcionamiento en aplicación real cuando GranaSAT adquiera el acelerador de partículas.
- El código puede ser modificado en el futuro.

Gracias por su atención

Pablo Criado Asensio

Medidor de corriente aislado para acelerador de partículas

