

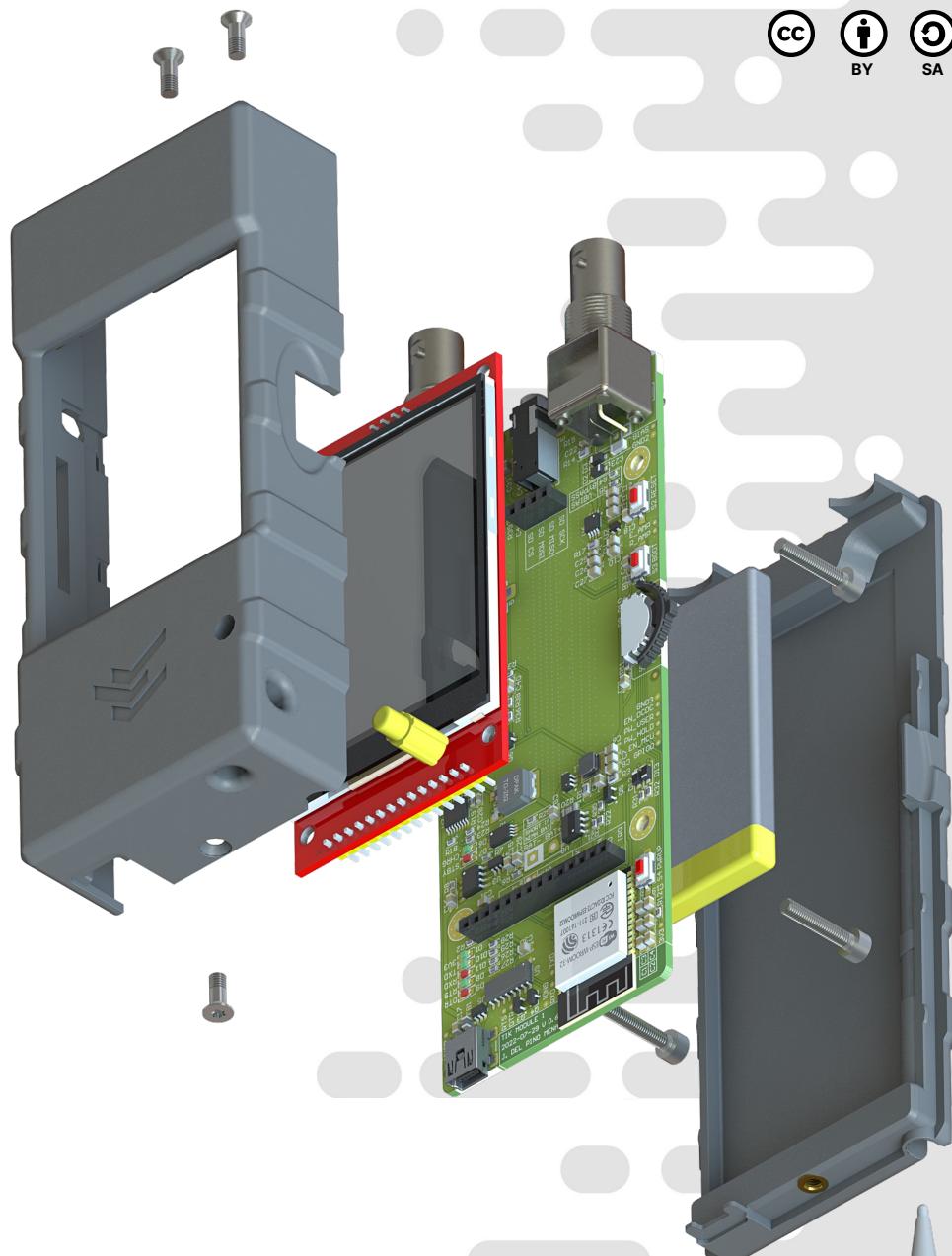
Desarrollo de un sistema acústico de medida del MOE en árbol, troza y tabla

AUTOR:

Juan Del Pino Mena

TUTOR ACADÉMICO:

Andrés M. Roldán Aranda



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Contenidos

1. Introducción

1.1. Motivación y objetivos

1.2. Estado del Arte

1.2.1. Ensayos no destructivos en la madera

1.2.2 Productos de la competencia

2. Señales

2.1 Sensores piezoelectricos

2.2 Propiedades de las señales

2.3 Algoritmo de post-procesado

2.4 Degradaciones y sus efectos en las medidas

3. Especificación del sistema

3.1 Requisitos

3.2 Arquitectura

3.2.2 Arquitectura software

3.2.3 Arquitectura mecánica

4. Diseño del sistema

4.1 Diseño de la electrónica

4.1.1 Circuitos

4.2 Diseño del firmware

4.1.2 PCB

4.3 Diseño mecánico

5. Fabricación, testeo, verificación

5.1 Fabricación

5.1.1 Fabricación PCB

5.2 Verificación

5.1.2 Impresión en 3D y ensamblaje

6. Conclusiones y trabajo futuro

Motivación y objetivos



← Fig. 1:
Nubes de contaminación
en Granada, Enero 2019.



← Fig. 2:
Vista de choperas
en la Vega de
Granada.

Objetivo principal

Especificación, diseño y fabricación de un dispositivo capaz de medir el MOE de árboles en pie, troncos y tableros de madera.

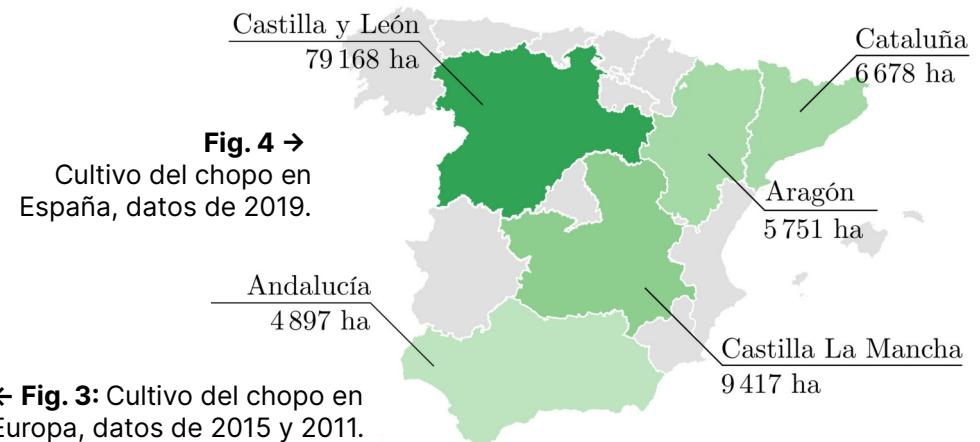
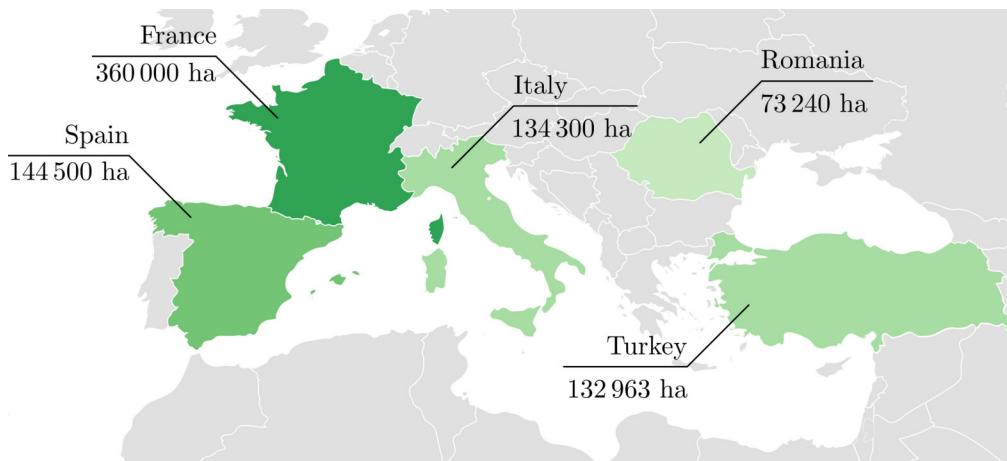
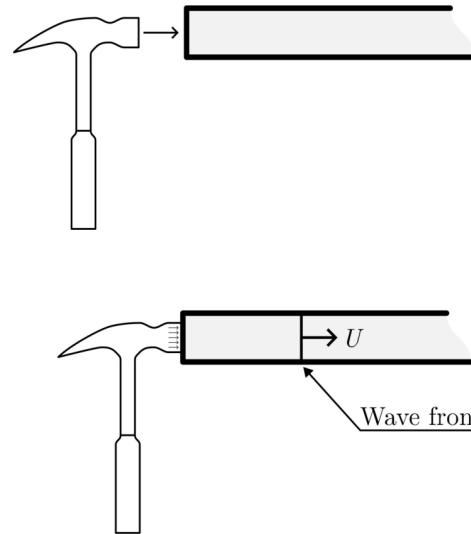


Fig. 4 →
Cultivo del chopo en
España, datos de 2019.

← Fig. 3: Cultivo del chopo en
Europa, datos de 2015 y 2011.

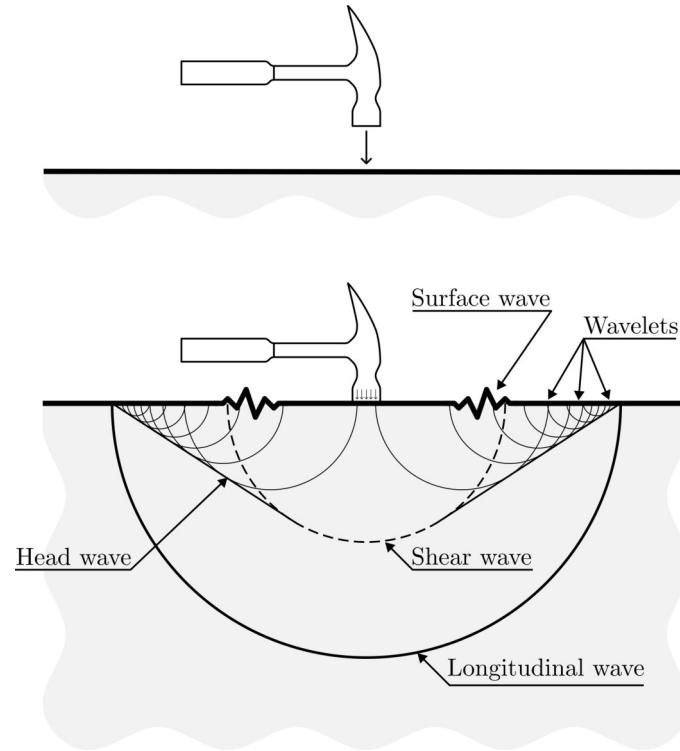
Propagación de ondas acústicas en madera

Aproximación unidimensional



$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Aproximación tridimensional



$$C = k \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

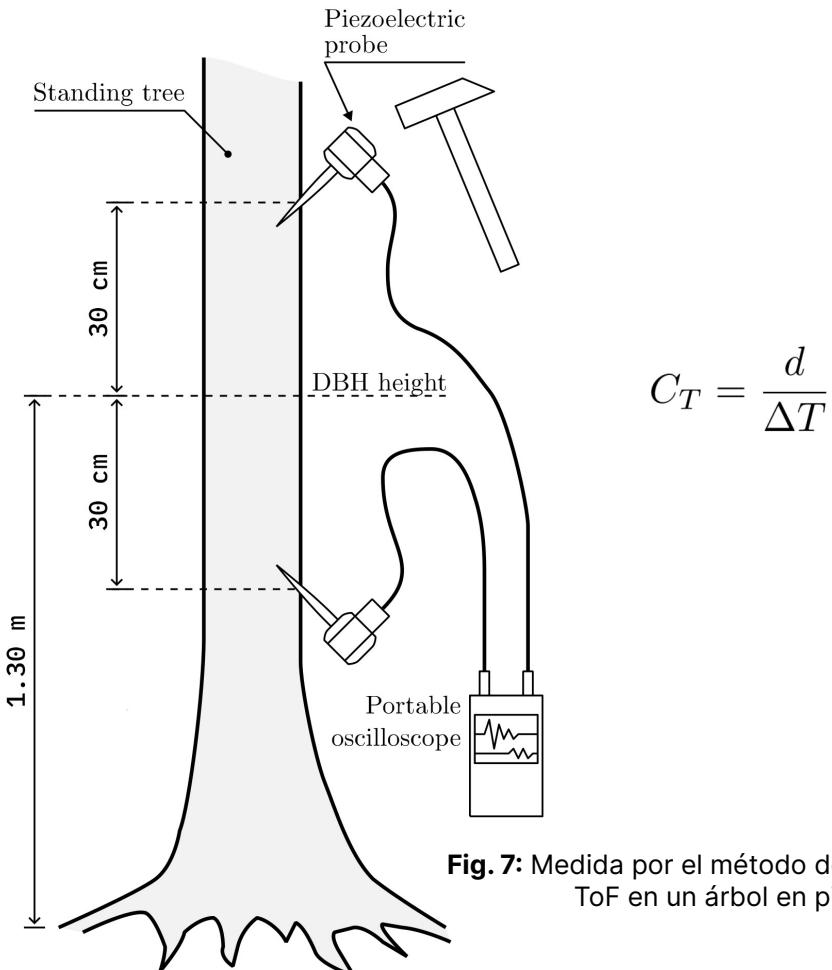
$$k = \sqrt{\frac{1 - \nu}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}}$$

Fig. 5: Frente de ondas compresivas plano. Propagación en una viga de madera.

Fig. 6: Frente de onda longitudinal compresiva esférica. Propagación en un semiplano infinito.

Métodos de medida

Método del tiempo de vuelo (Time-of-Flight, ToF)



Método de resonancia

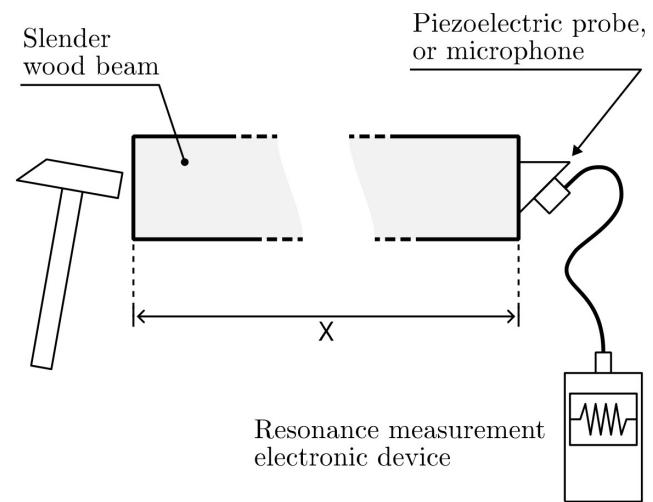


Fig. 8: Medida por el método de resonancia en una tabla de madera.

Productos de la competencia



**Fakopp MicroSecond Timer
(μsTimer)**

490 € sin accesorios ni IVA

- Método ToF, para árboles
- Sondas piezoeléctricas en forma de clavo, con BNCs.
- Display de 4 dígitos de 7 segmentos.
- Pila de 9V PP3.
- RS232 + Adaptador Bluetooth.
- Sólo ofrece el *delay* en microsegundos.



Brookhuis Mechanical Timber Grader (MTG)

550 € sin accesorios ni IVA

- Método de resonancia, para tablas.
- Ofrece el grado EN-338 de la madera.
- Ergonómico.
- Display LCD de dos colores de 122x16 píxeles.
- Batería recargable.
- Bluetooth.



Controls Pulsonic 58-E4900 Ultrasonic Pulse Analyzer

1700 € sin IVA

- Esencialmente es un osciloscopio especializado
- Método ToF o resonancia.
- Diferentes opciones de post-procesado.
- Sondas piezoeléctricas de contacto superficial.
- Ganancia programable.
- Pantalla LCD de 6", táctil.
- Batería recargable.



Fakopp Portable Lumber Grader (PLG)

Precio desconocido

- Compuesto por una célula de carga, su amplificador y un micro.
- Necesita un PC con un software específico.
- Método de resonancia, para tablas.
- Ofrece el grado EN-338.

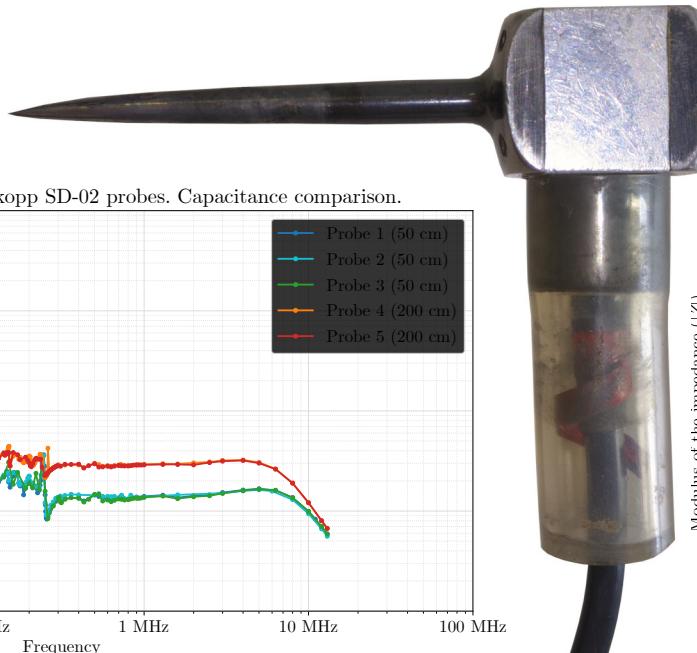
2. Señales

2.1 Sensores piezoelectrómicos

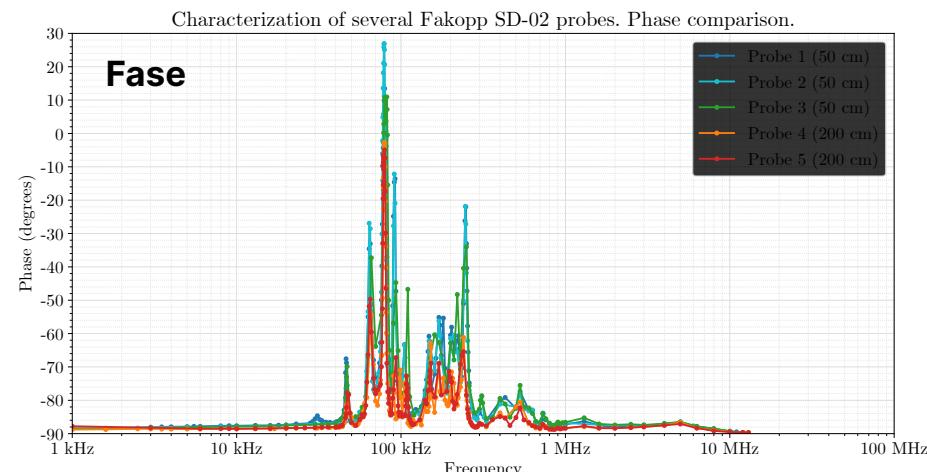
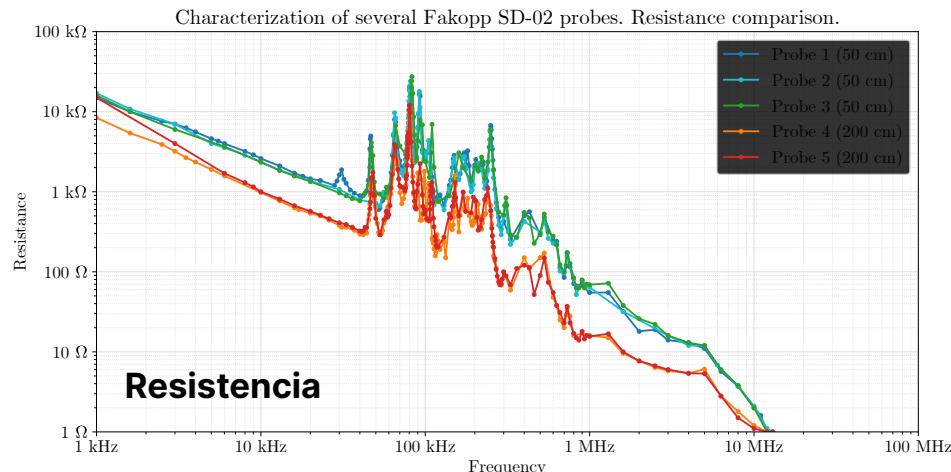
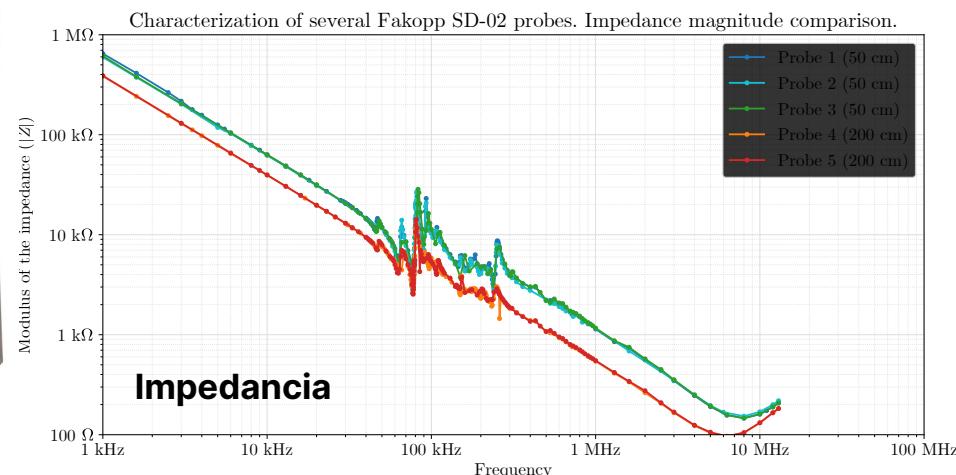
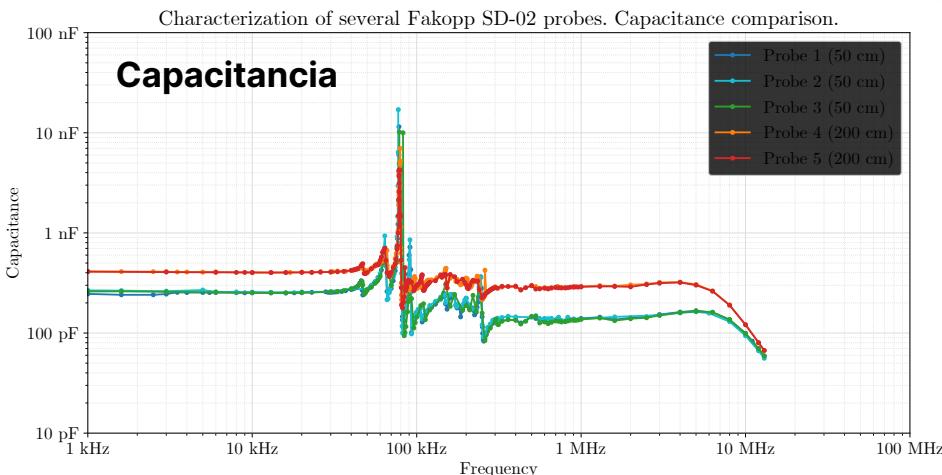
Págs. 27 a 36 de la memoria

Los sensores piezoelectrómicos Fakopp SD-02

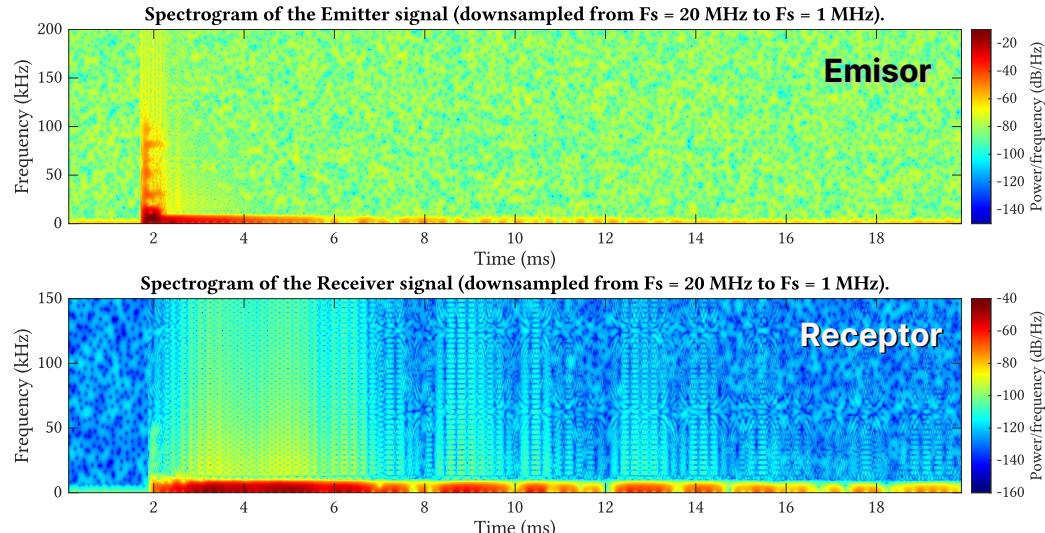
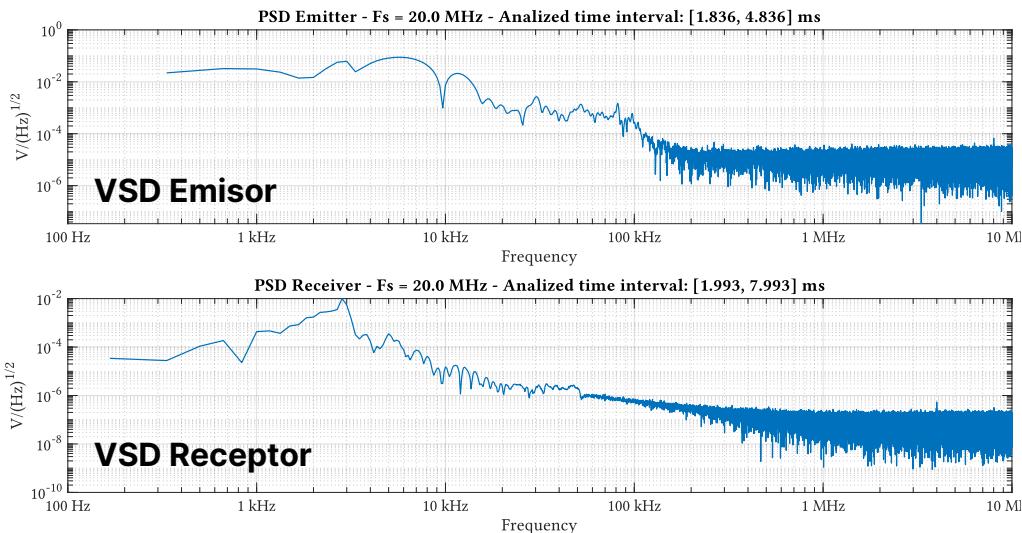
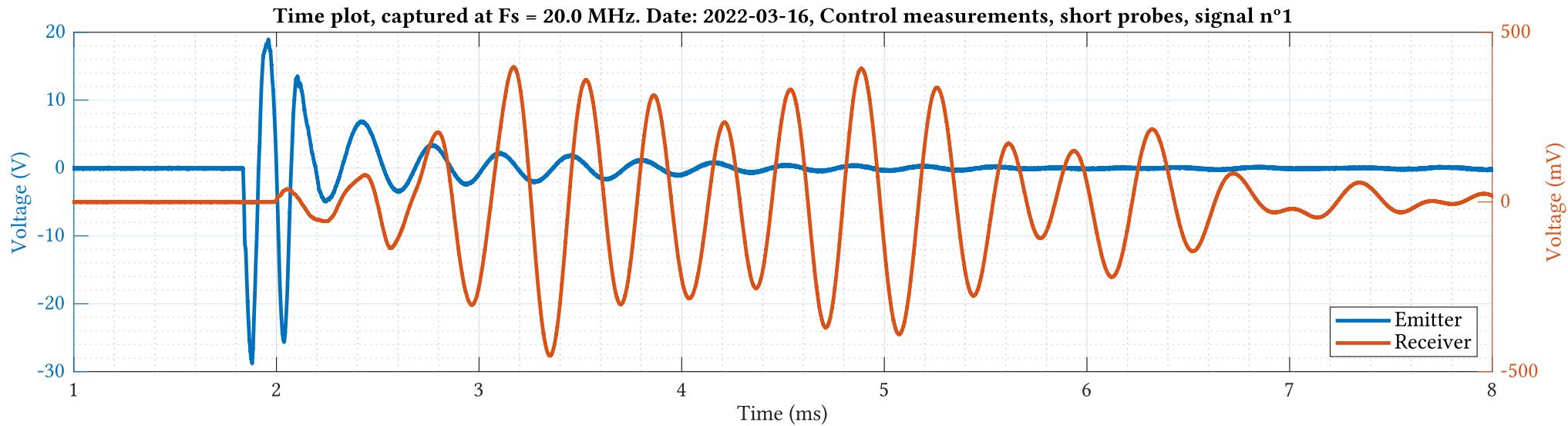
Ver esquemáticos
en página 1



← Fig. 9: Cabeza de una sonda Fakopp SD-02



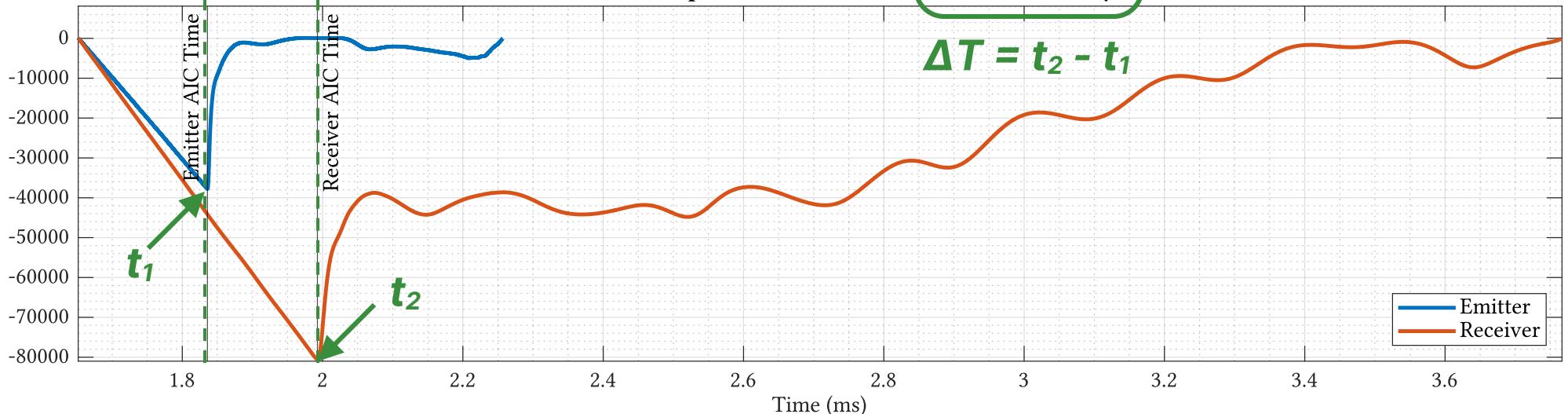
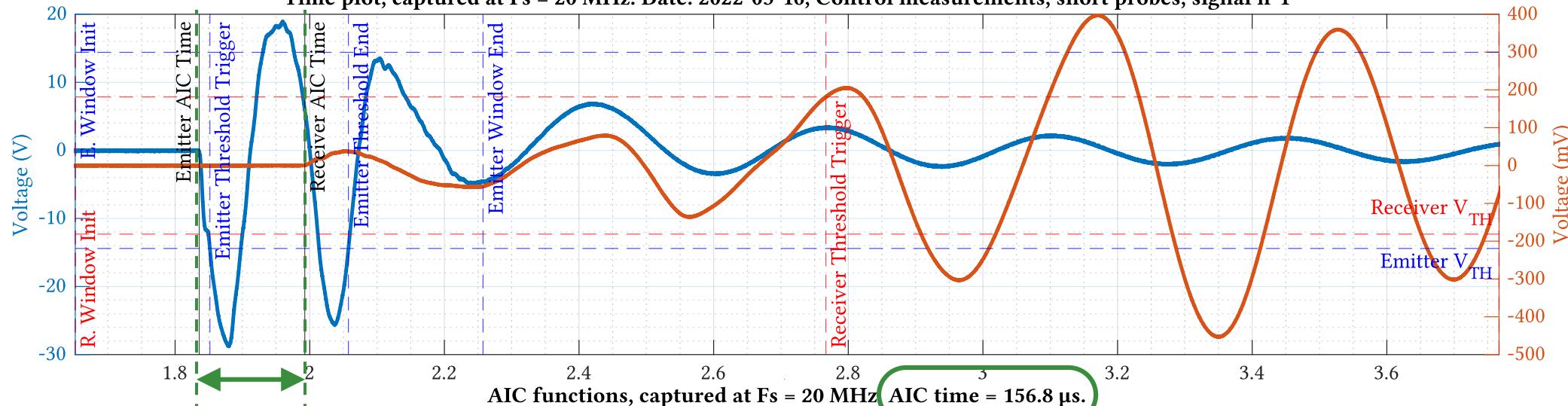
Características de una señal típica



Akaike Information Criterion (AIC)

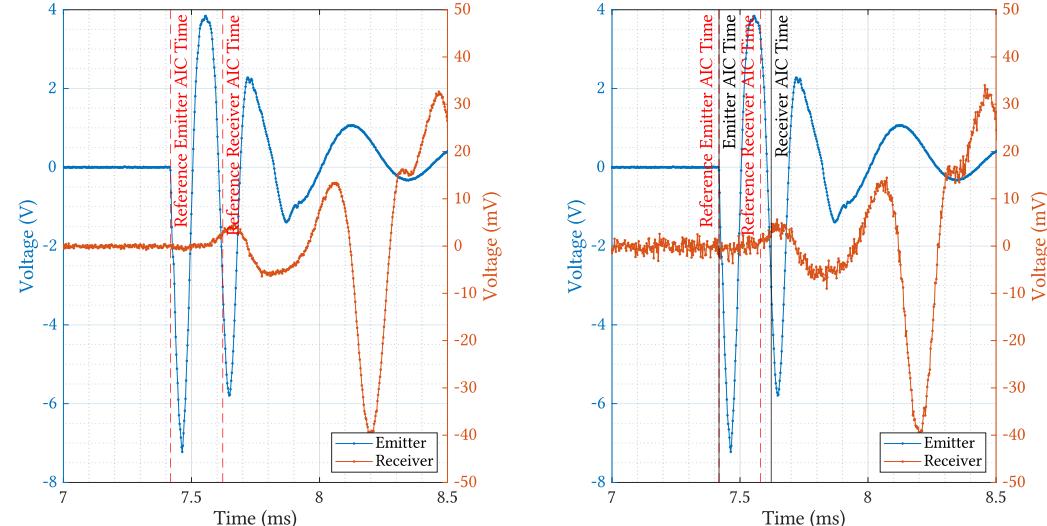
$$\text{AIC}(k) = k \cdot \log (\text{var}(x[1, k])) + (N - k - 1) \cdot \log (\text{var}(x[k + 1, N]))$$

Time plot, captured at $F_s = 20$ MHz. Date: 2022-03-16, Control measurements, short probes, signal n°1

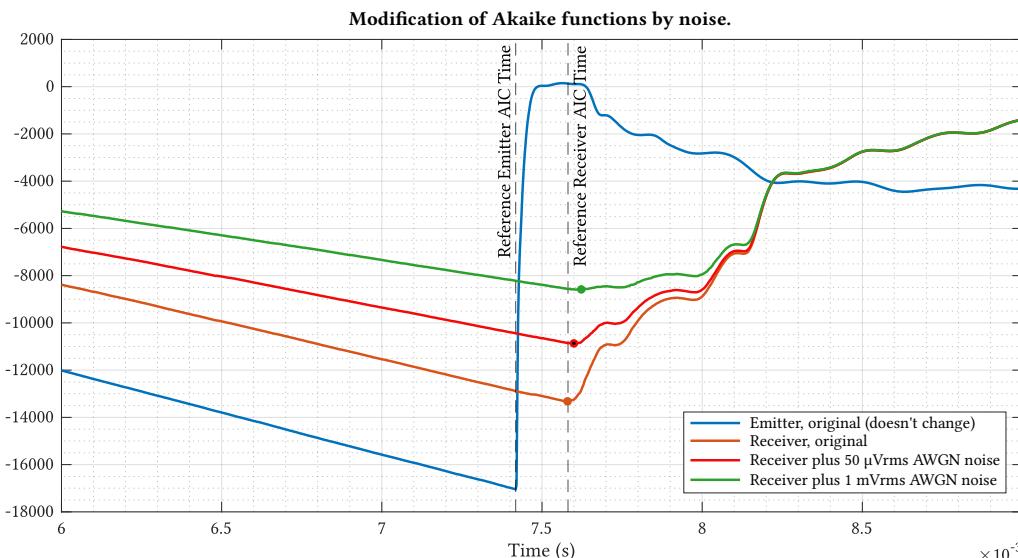
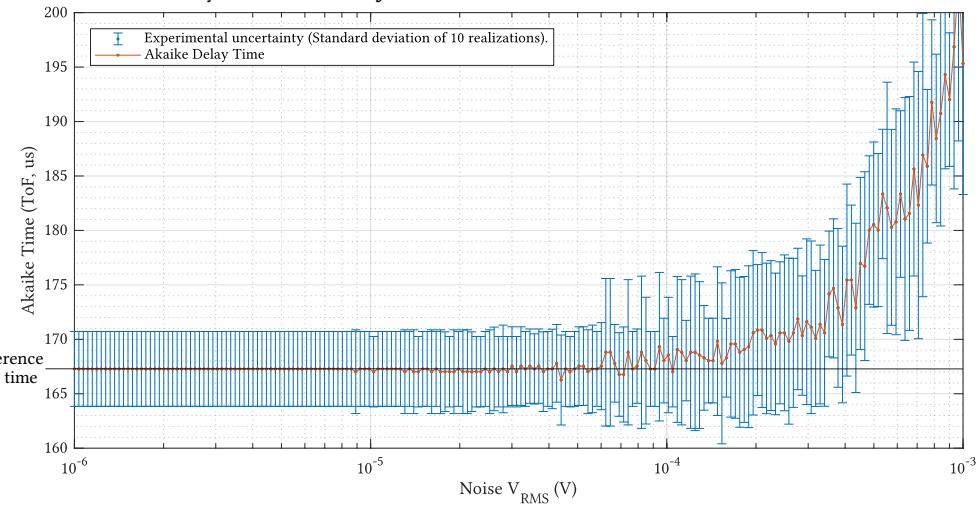


Efecto del ruido en AIC

Comparison of a clean signal and a signal with 1 mVrms of AWGN



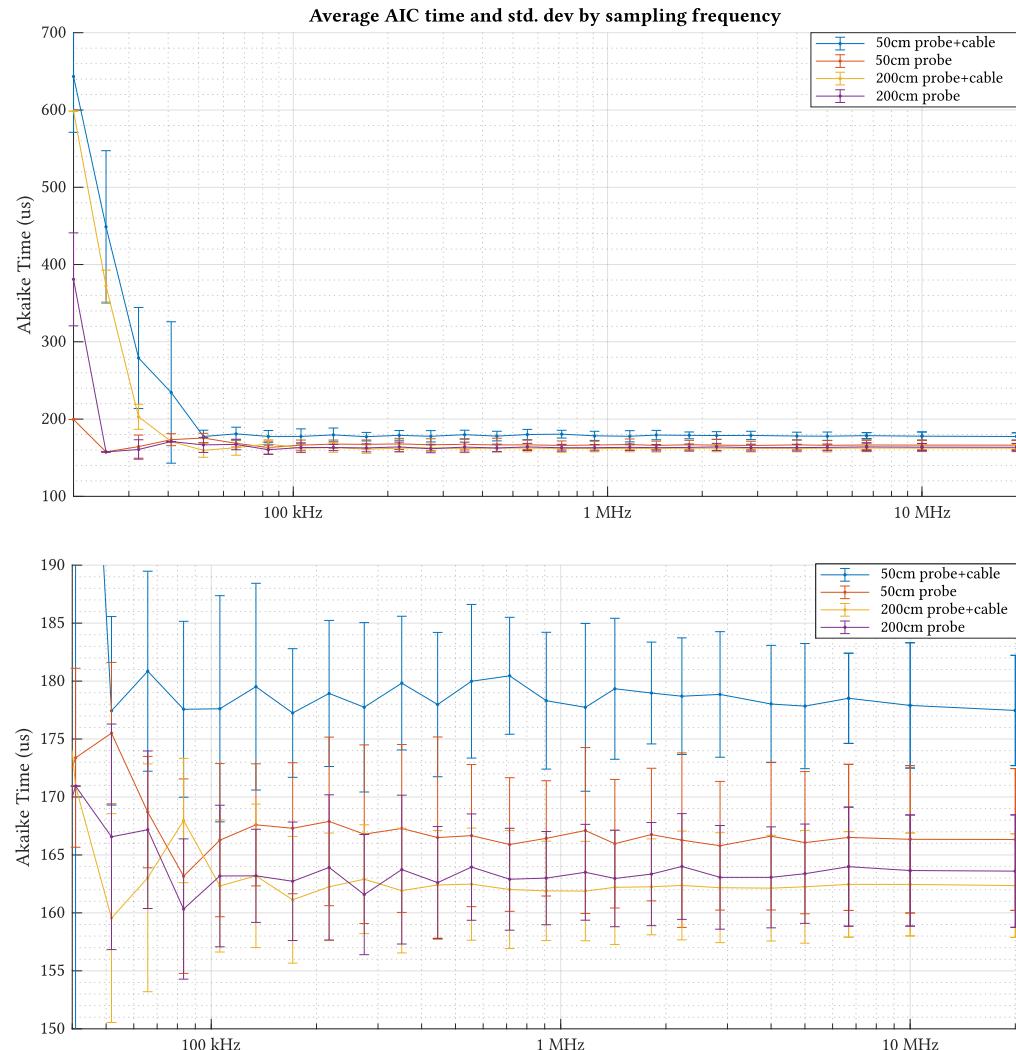
← Fig 10. Ruido AWGN artificial inyectado en las señales del emisor y receptor

Measured AIC time by amount of noise injected. Mean and standard deviation from 10 realizations. $F_s = 400$ kHz.

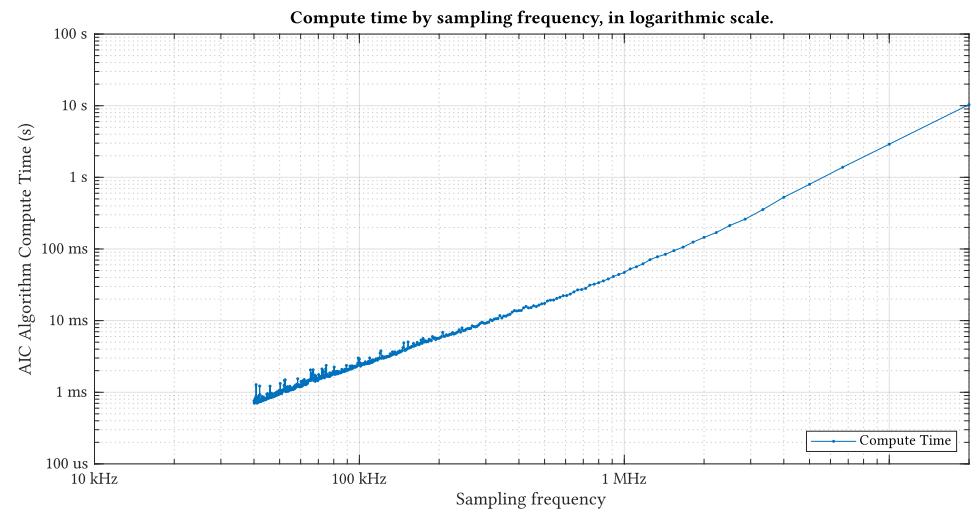
↑ Fig 12. Desviación del valor de referencia conforme aumenta el voltaje RMS del ruido

← Fig 11. Desplazamiento y menor definición del mínimo en el receptor (que tiene menor SNR)

Efecto de la frecuencia de muestreo en AIC



← Fig 13. Desviación promedia (10 realizaciones) del valor de referencia según disminuye la frecuencia de muestreo



↑ Fig 14. Tiempo de cálculo en función de la frecuencia de muestreo

Requisitos generales

Requisitos de la filosofía portable del dispositivo:

Portable

Dispositivo de mano

Gran autonomía

Robusto frente a condiciones adversas

Requisitos de interfaz de usuario

User-friendly

Múltiples idiomas

Pantalla grande y con nivel de detalle

Pantalla táctil

Botón de encendido

Alternativamente: botón tipo dial, para navegar por la GUI sin manipular la pantalla

Requisitos de análisis de señal

Electrónica necesaria para captar y adecuar la señal

Microprocesador y memoria RAM suficientes

Almacenamiento y transferencia de resultados

Almacenamiento externo

Conectividad inalámbrica

Normativa

RoHS

Marcado CE



Arquitectura software

Lenguaje, framework y RTOS para el firmware:



Plataforma de desarrollo e IDE:



Bibliotecas de terceros:



Principal software EDA:



ALTIUM
DESIGNER



Diseño mecánico y CAD:

SOLIDWORKS

Análisis y representación
de señales y datos:



Software de
impresión 3D:



Ultimaker Cura

Arquitectura mecánica

Ver esquemáticos en:
Marcador nº1, color azul

Diseño resistente a condiciones de operación adversas: golpes, caídas, polvo, serrín, salpicaduras, humedad, sol directo...

Dispositivo no muy grande, manejable con una mano → Pantalla en posición vertical.

Botón visible desde el frontal del dispositivo

Cargador en la parte inferior.

BNCs en la parte superior, lo suficientemente separados para manipularlos con facilidad.

Botón multi-dirección en el lado derecho.

Forma que beneficie el agarre y no se resbale fácilmente.

Carril para almacenar un lápiz táctil.



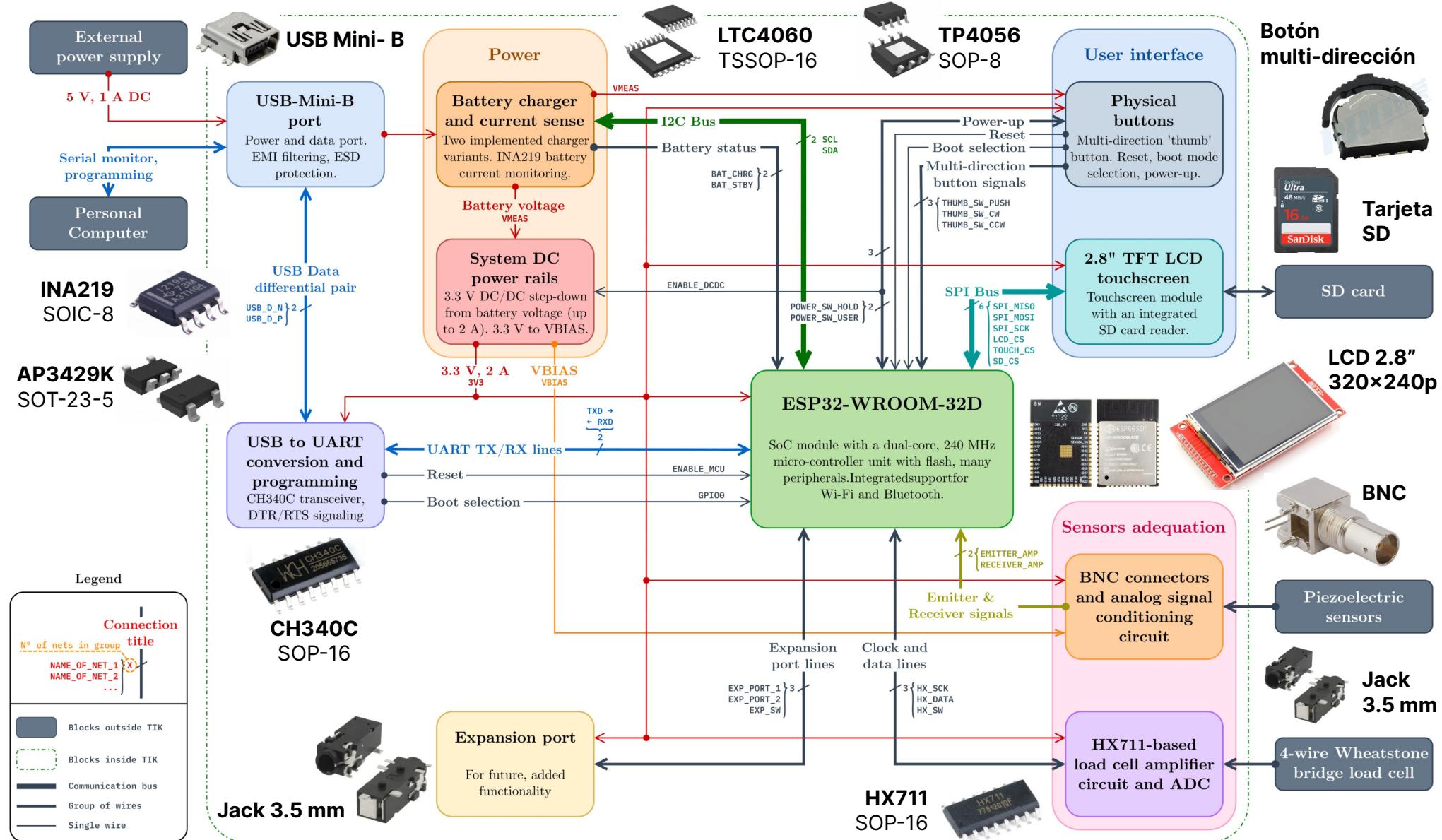
Fig. 15: Concepto temprano del diseño de la carcasa de TIK, basado en los requisitos descritos.

4. Diseño del sistema

4.1 Diseño de la electrónica

Págs. 83 a 113 de la memoria

Arquitectura y diseño del circuito



4. Diseño del sistema

4.1 Diseño de la electrónica

Págs. 114 a 130 de la memoria

Diseño electrónico: PCB

Puntos clave:

Restricción a las reglas de diseño del fabricante

132×54 mm, esquinas redondeadas con 2 mm de radio. 2 capas, 1.6 mm grosor, dieléctrico FR-4

Factor de forma restringido por el tamaño de la LCD y el espacio requerido para los componentes.

Co-diseño electrónico y mecánico, *layout* según indican los requisitos

Buenas prácticas y reducción de EMI:

Planos de masa

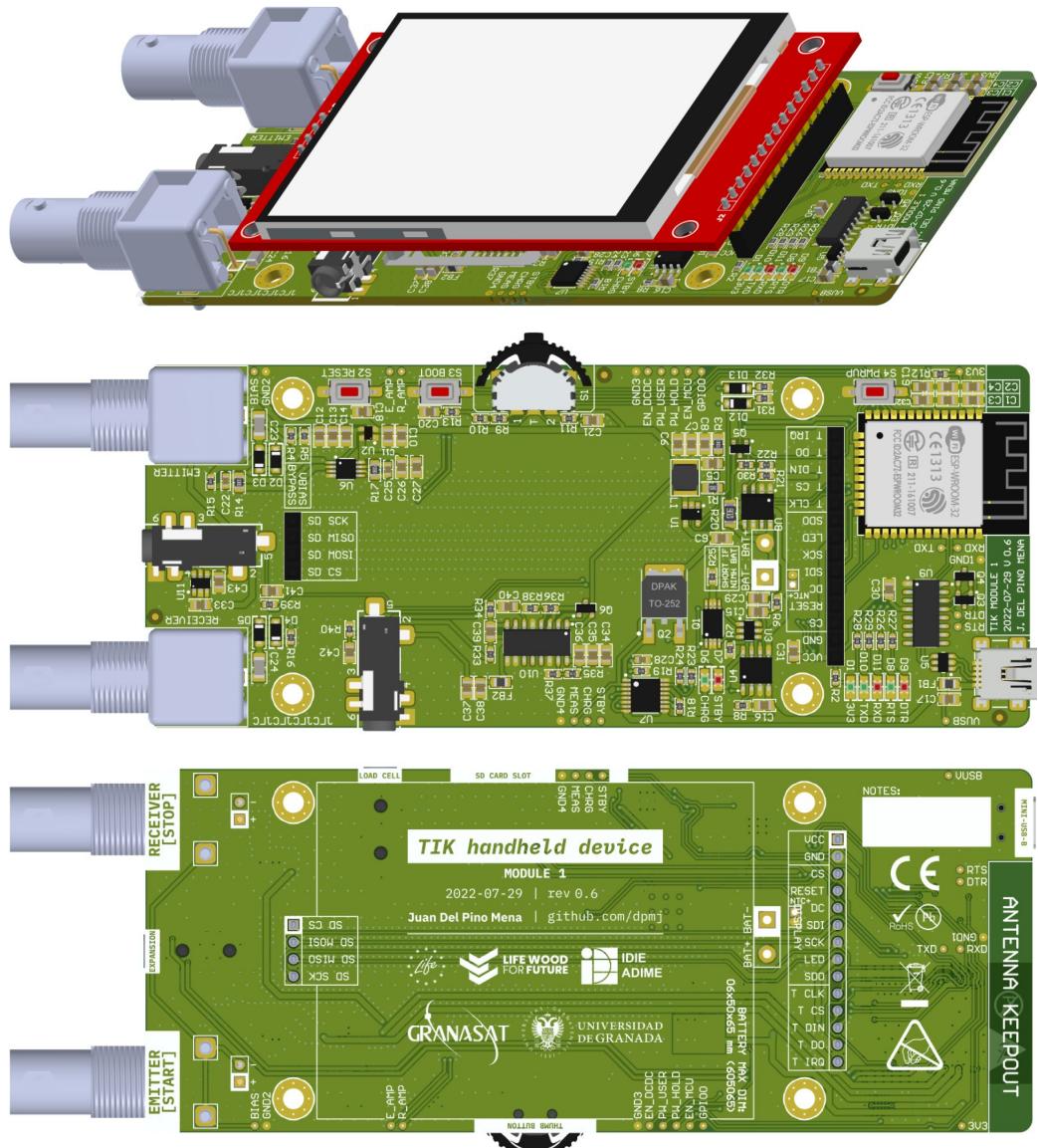
Via shielding y via stitching

Condensadores de desacoplo cercanos a los pines de alimentación de los circuitos integrados.

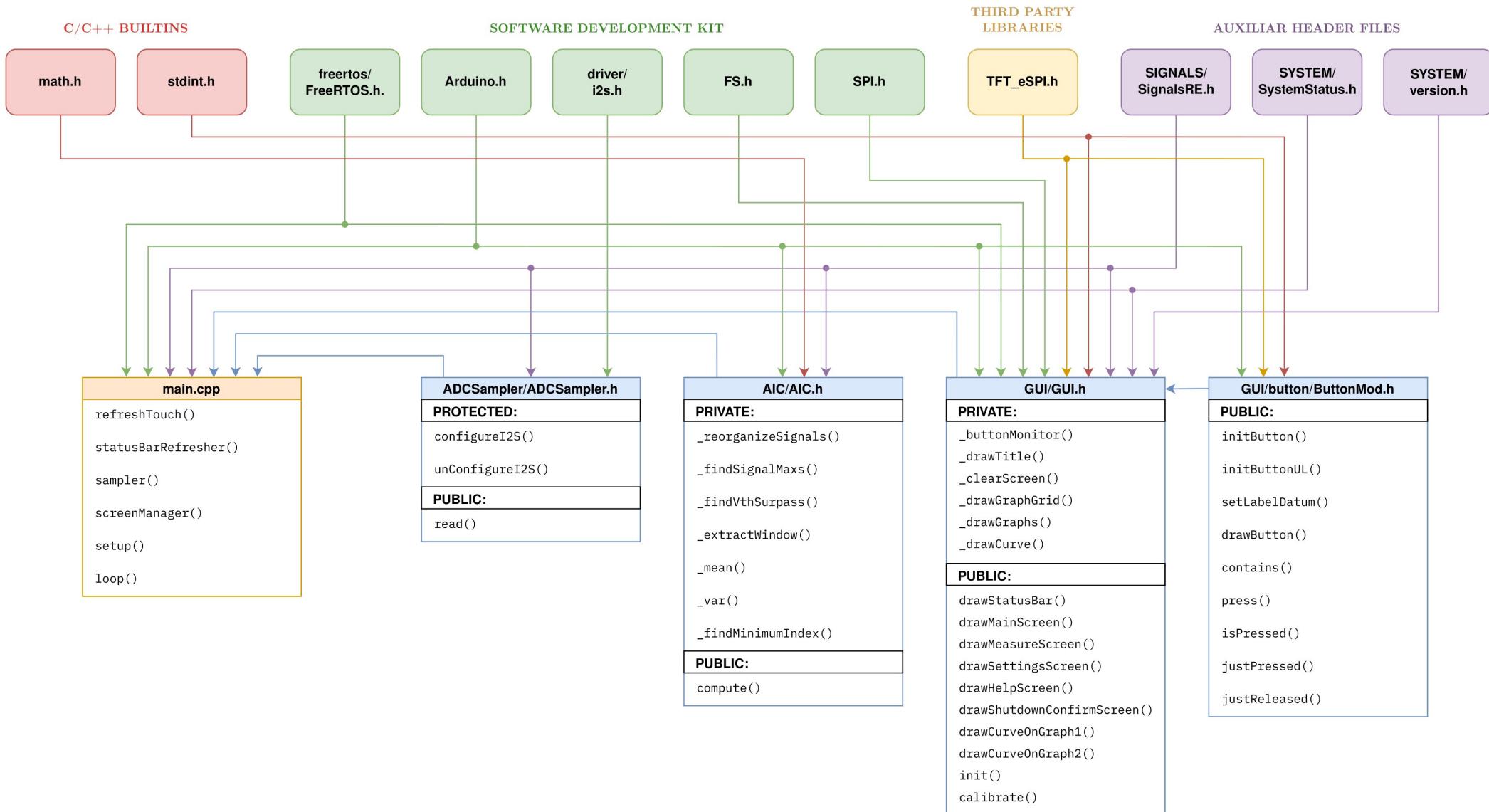
Mounting holes con head landing

Teardrops

Sobre-dimensionado de las trazas de alimentación



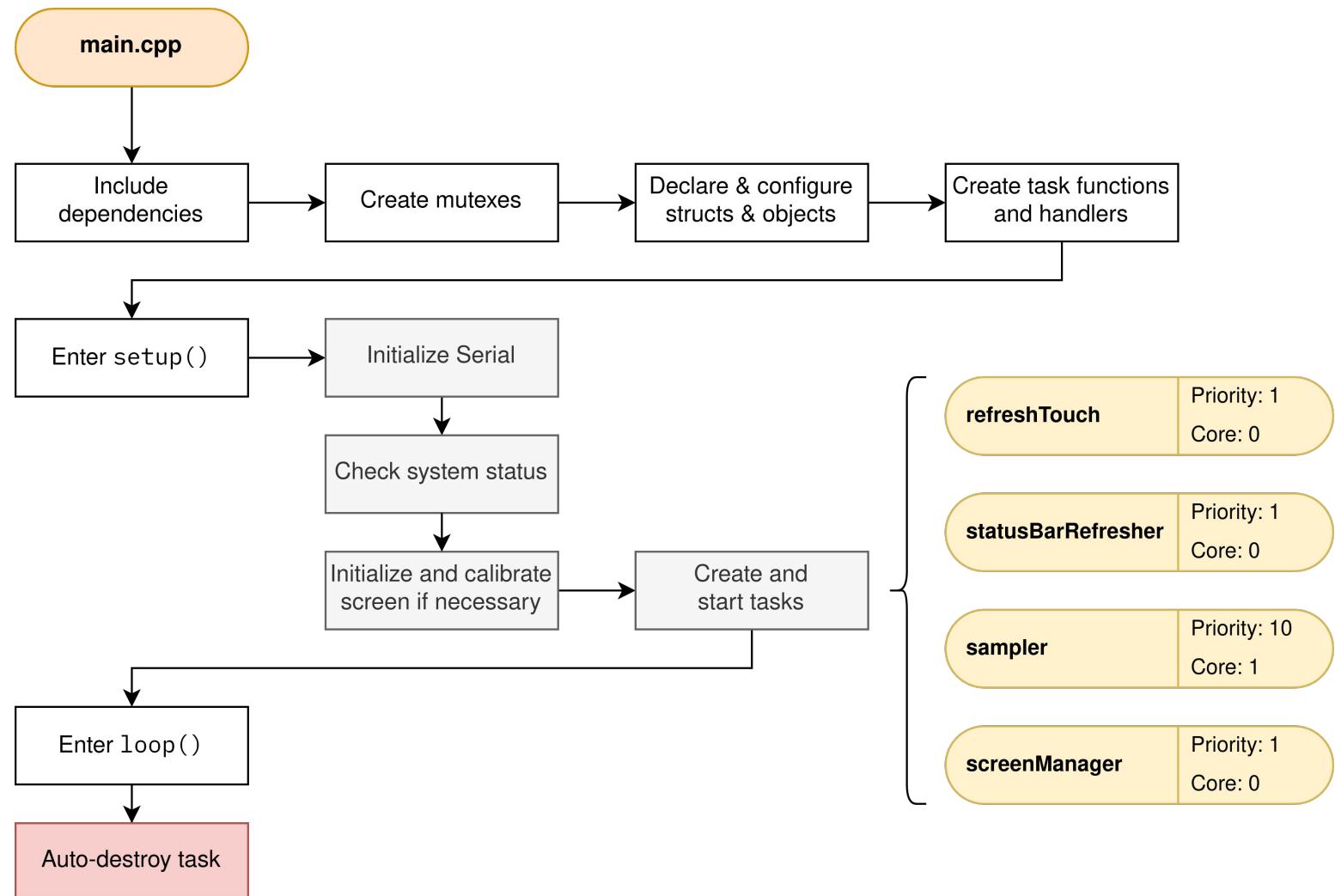
Diseño del firmware: dependencias



Diseño del firmware: flujo de main.cpp



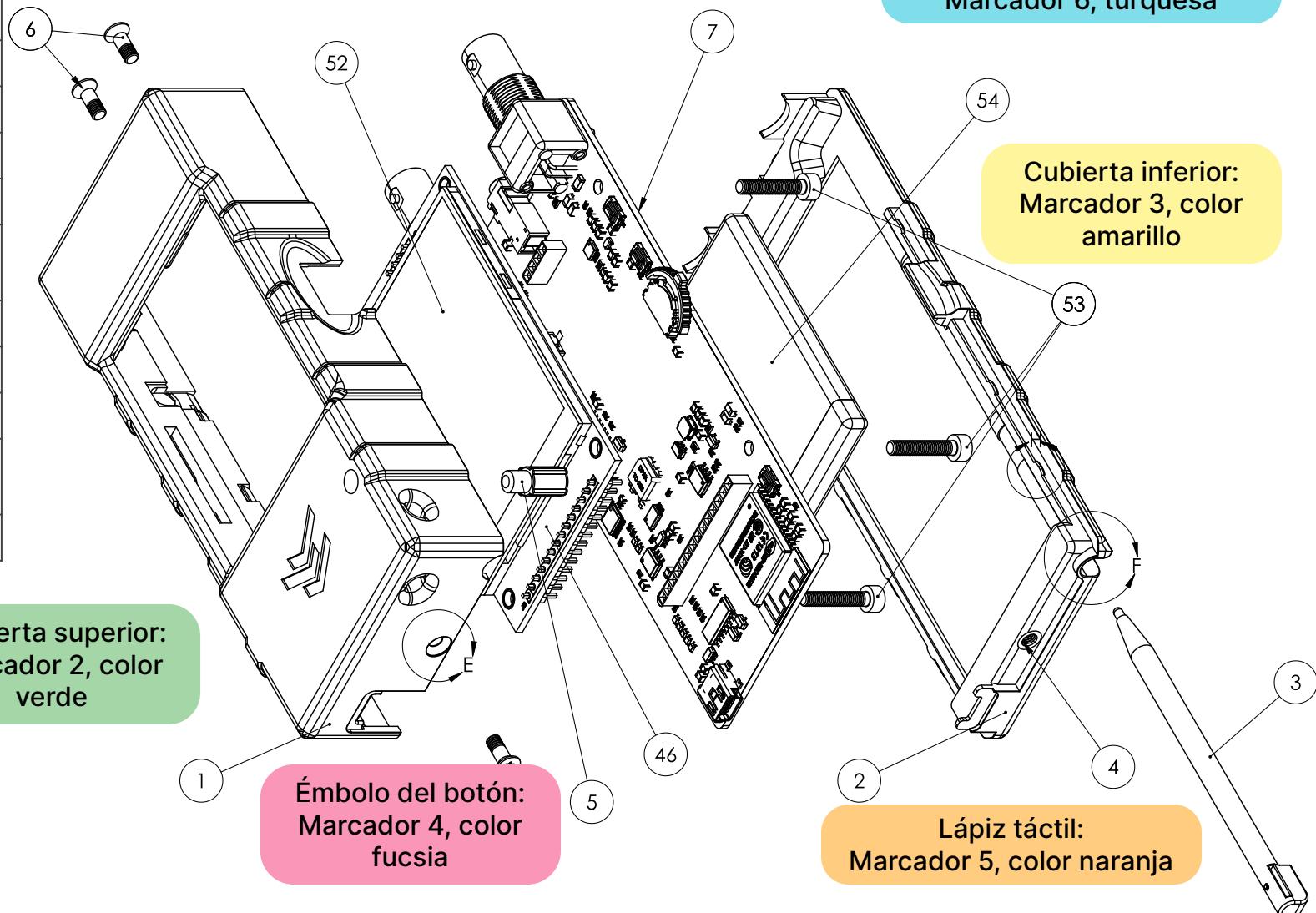
Fig. 16: Foto de la pantalla principal del TIK.



Diseño mecánico: ensamblaje

[Vídeo desmontaje](#)

Nº	Parte
1	Cubierta superior
2	Cubierta inferior
3	Lápiz táctil
4	Inserto roscado M3
5	Émbolo del botón
6	Tornillo torx, cabeza avellanada, ISO 10642, M3
7	PCB
46	PCB del módulo LCD
52	Pantalla LCD
53	Tornillo cabeza casquillo hexagonal, ISO 4762, M3
54	Batería Li-Po 604060



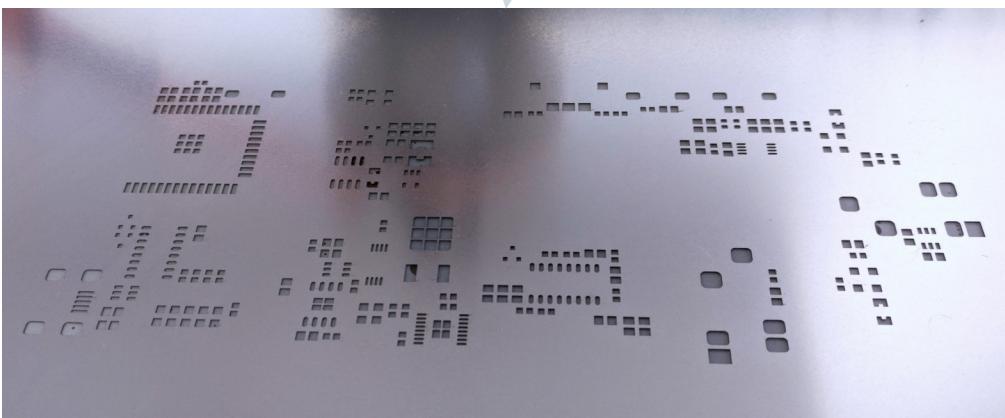
PCB: fabricante, configuración y resultados

Archivos de fabricación
Gerber y NC Drill

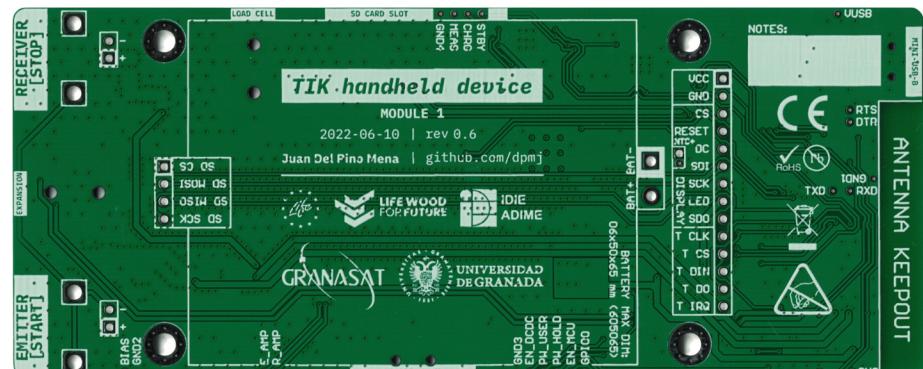
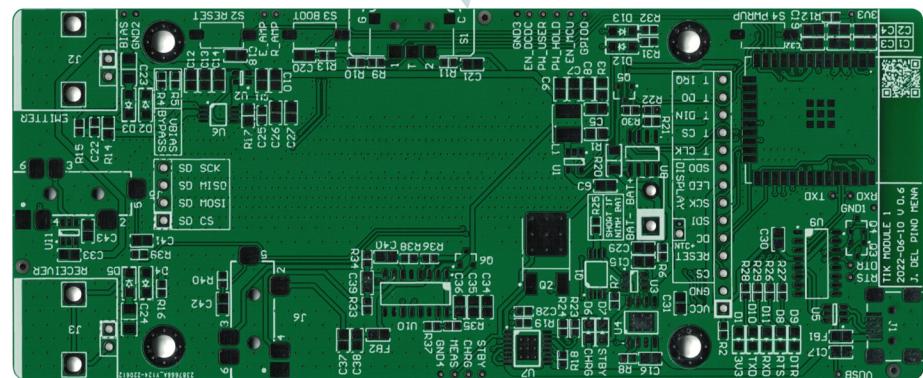
Configuración extra
de fabricación

- Dieléctrico FR-4
- Dos capas a 1 oz/ft²
- 1.6 mm de grosor
- Solder resist verde
- Acabado HASL-RoHS

**Stencil de acero
inoxidable**



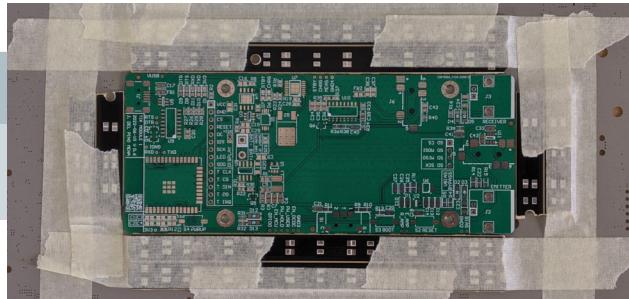
Placas de
Circuito Impreso



Proceso de soldadura de los componentes

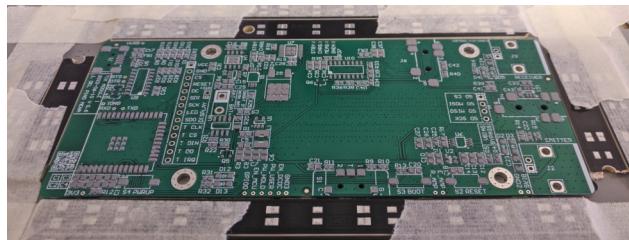
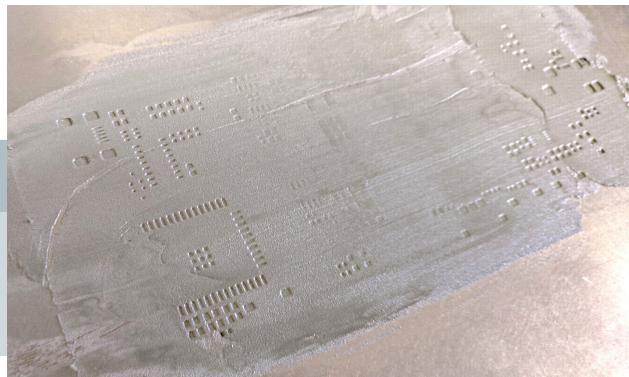
Paso 1

Alinear PCB con el stencil



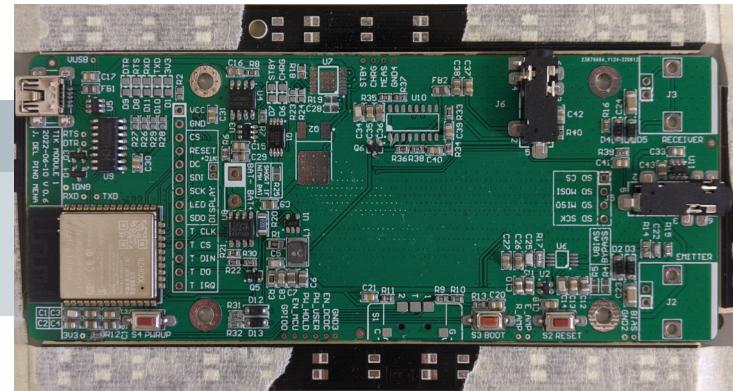
Paso 2

Aplicar pasta de soldadura y esparcir



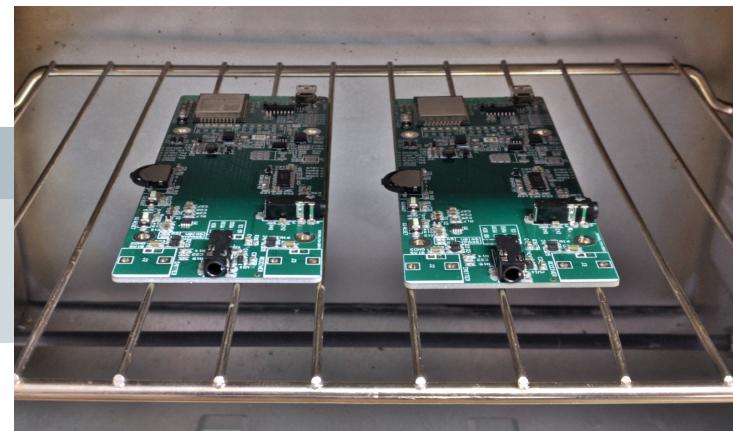
Paso 3

Colocación de componentes en su footprint



Paso 4

Soldadura por reflujo, horneado



Defectos de soldadura y resultado final

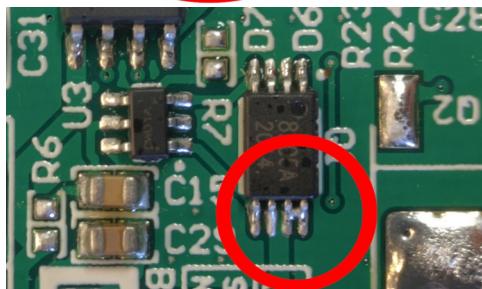
Inspección visual de defectos de soldadura



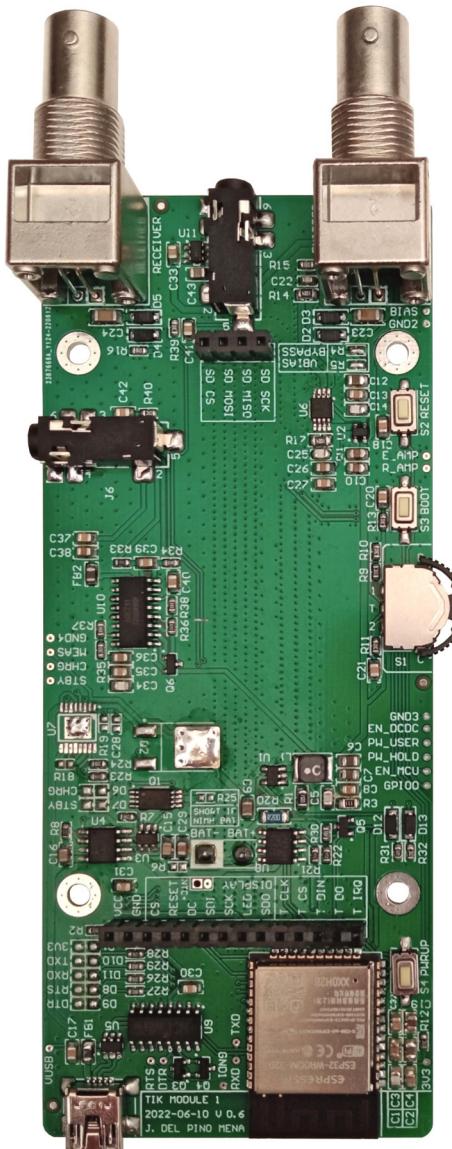
Dos pasivos unidos por golpes durante la inserción en el horno



Condensadores y pines en corto por exceso de pasta de soldadura



Corto entre dos pines del F8502A



Resultado final con/sin BNCs y LCD



5. Fabricación, testeo, verificación

5.1 Fabricación

5.1.2 Impresión en 3D y ensamblaje

Págs. 162 a 167 de la memoria

Impresión 3D de la carcasa

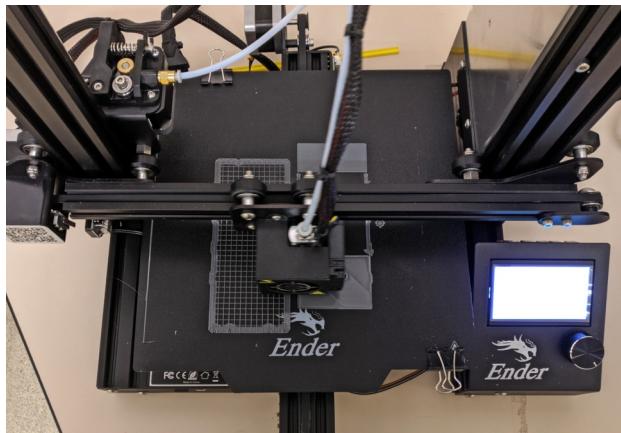


Fig. 17: Impresión de las carcasas

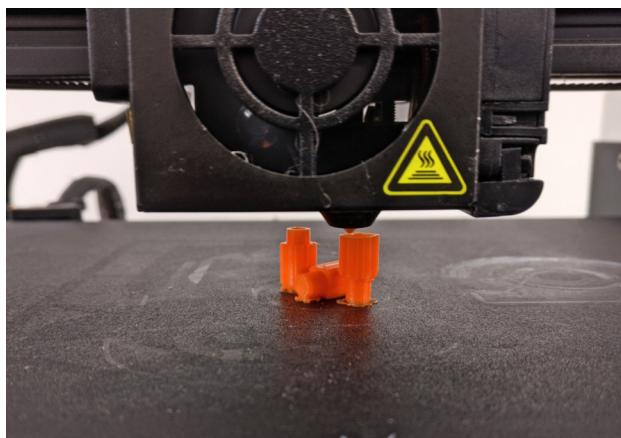


Fig. 18: Impresión de una tanda de botones



Fig. 19.
Resultados de impresión 3D

Ensamblaje completo



Pruebas y verificación

Subsistemas que funcionan

- ✓ Cargador Li-Po ✓ DC/DC y LDO
- ✓ USB-to-UART, auto-programming
- ✓ ESP32 ✓ Circuito de adecuación
- ✓ Bootsel/reset ✓ ADC1 con DMA

Subsistemas con errores

- ✗ Interruptores puertos Jack
- ✗ Botón de encendido

Subsistemas sin comprobar

- ? Sensor de corriente ? Puerto de expansión
- ? Amp célula de carga
- ? Botón multi-dirección



Fig. 20 ↑: Consumo promedio de TIK ejecutando programa demo, registrado en SDM3065X.

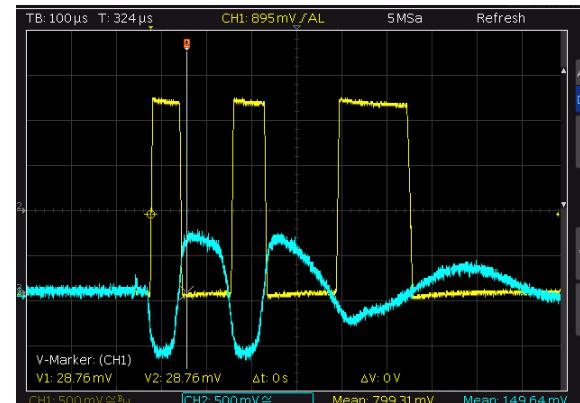


Fig. 21 ↑: Respuesta transitoria del circuito de adecuación del Emisor. Captado con HMO1024, Señales generadas por el generador de señal arbitraria SDG1062X.

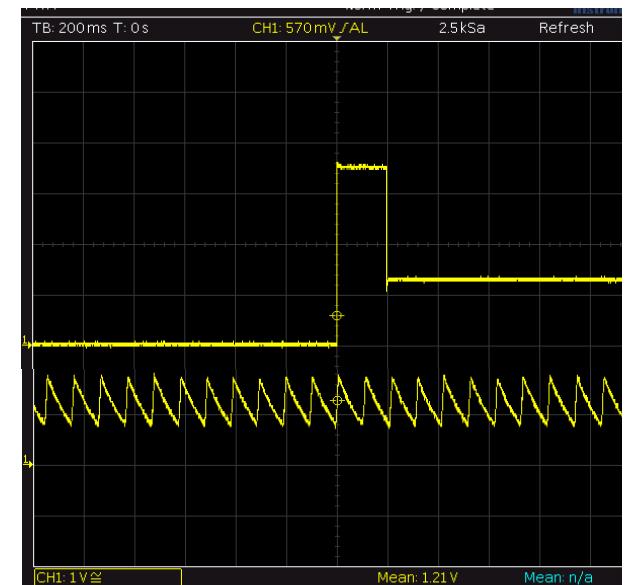


Fig. 22 ↑: Raíl de 3.3 V al pulsar el power-on y oscilaciones en el drenador del PMOS.

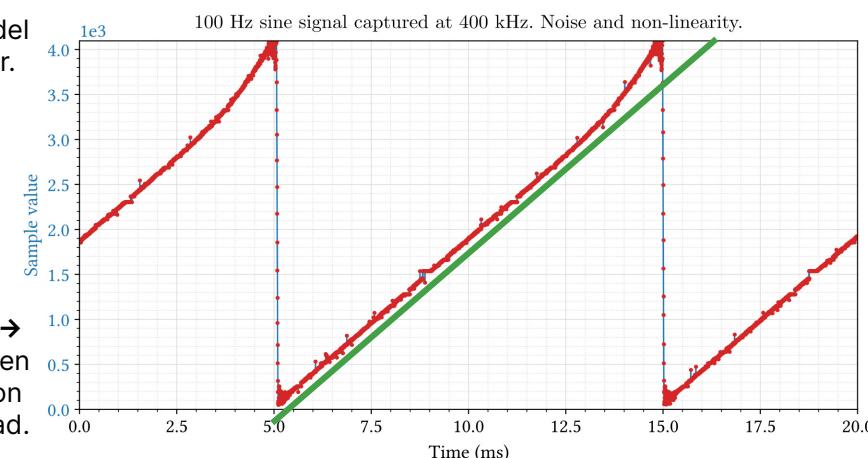


Fig. 23 →
Señal rampa de 100 Hz captada en el canal 7 del ADC1 del ESP32, con $F_s = 400$ kHz. Ruido y no-linealidad.

Conclusiones

Hitos más relevantes

Completada la primera iteración de TIK incluyendo hardware, firmware y diseño mecánico.

Análisis de señales, evaluación de algoritmos de post-procesado, caracterización de los sensores piezoelectricos

Definición de requisitos, arquitecturas, componentes y software adecuado para las diferentes tareas del proyecto.

Diseño, desarrollo, fabricación y verificación de circuitos de diversa índole: analógicos, digitales y de potencia.

Diseños mecánicos y electrónicos coordinados con el objetivo de sintetizar un producto electrónico

Manejo de programas CAD y EDA profesionales

Documentación técnica y extensiva del proyecto.

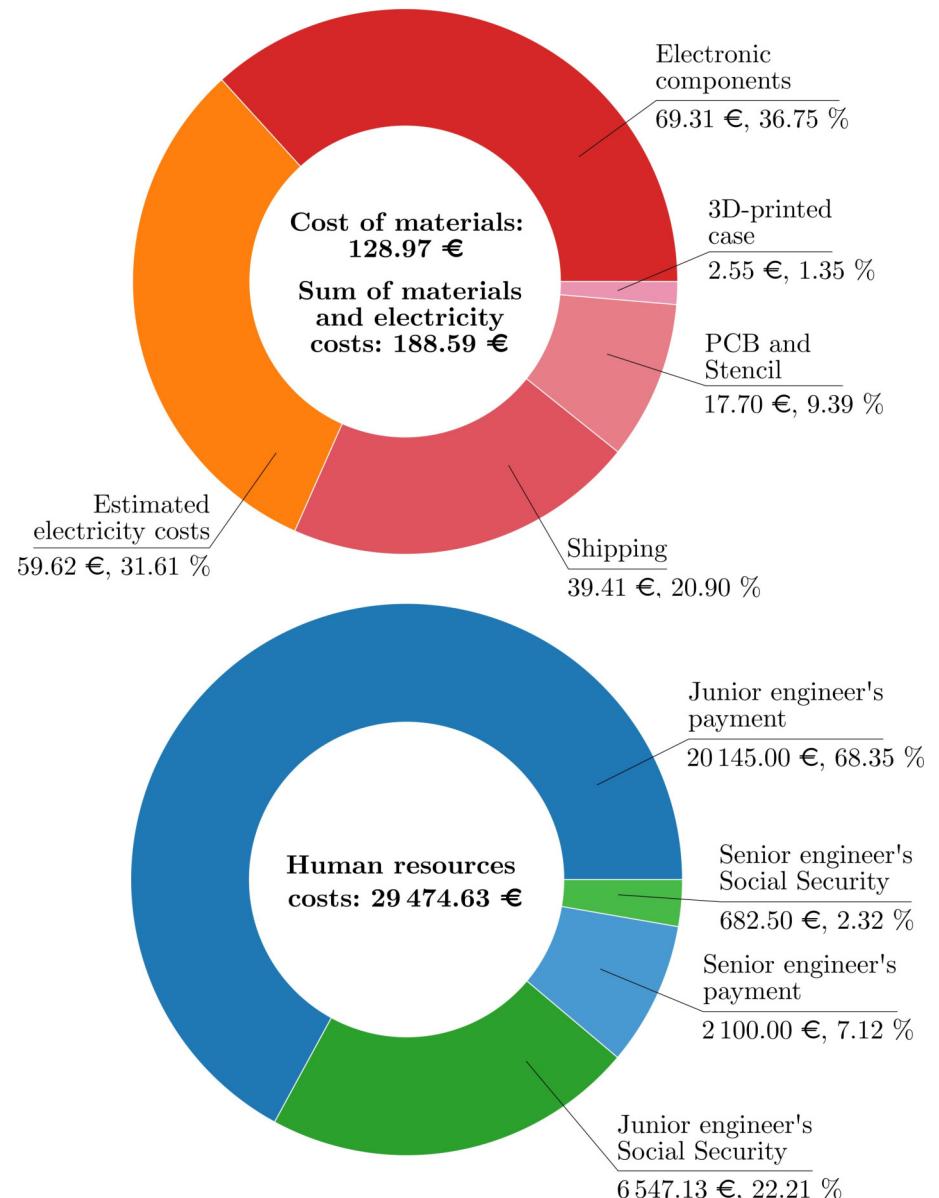
Desarrollo de bibliotecas de instrumentación electrónica, para simular señales de forma repetible y configurable.

6. Conclusiones y trabajo futuro

Págs. 171, 172 de la memoria

Costes del proyecto

Tipo	Concepto	Coste (€)
Materiales	Componentes	69.31
	PCB y stencil	17.70
	Carcasa impresa en 3D	2.55
	Coste total materiales	128.97
Recursos humanos	Pago al ingeniero junior (1185 horas, 17 €/hora)	20145.00
	Seguridad Social del ingeniero junior (32.5 %)	6547.13
	Pago al ingeniero senior (70 horas, 30 €/hora)	2100.00
	Seguridad Social del ingeniero senior (32.5 %)	682.50
	Coste total RR.HH.	29474.63
Energía	Coste electricidad aprox.	59.62
Coste total del proyecto		29663.22 €



Propuestas de mejora

Mejoras a la PCB

Componentes más pequeños, PCB más densa

Mejores test-points

PCB de 4 capas

Control del brillo de la LCD

Micro SD y LCD por separado

Puerto RJ-11 para la célula de carga

Cambiar puerto de expansión

USB Tipo-C

Mejor chip USB to UART

Power path control

Decidir el tipo de batería

Añadir un BMS

Mejor chip cargador

Mejoras al firmware

Añadir traducciones

Modo de espera

Secure Boot

Encriptado de la memoria Flash

Migrar a ESP-IDF

Implementar servicios Wi-Fi y Bluetooth

Mejoras al circuito de adquisición y procesado de señal

Diodos con mayor V_F

Mejor diseño del amplificador

ADC dedicado a adquisición

Implementar método AIC-EMD

Mejoras al diseño mecánico

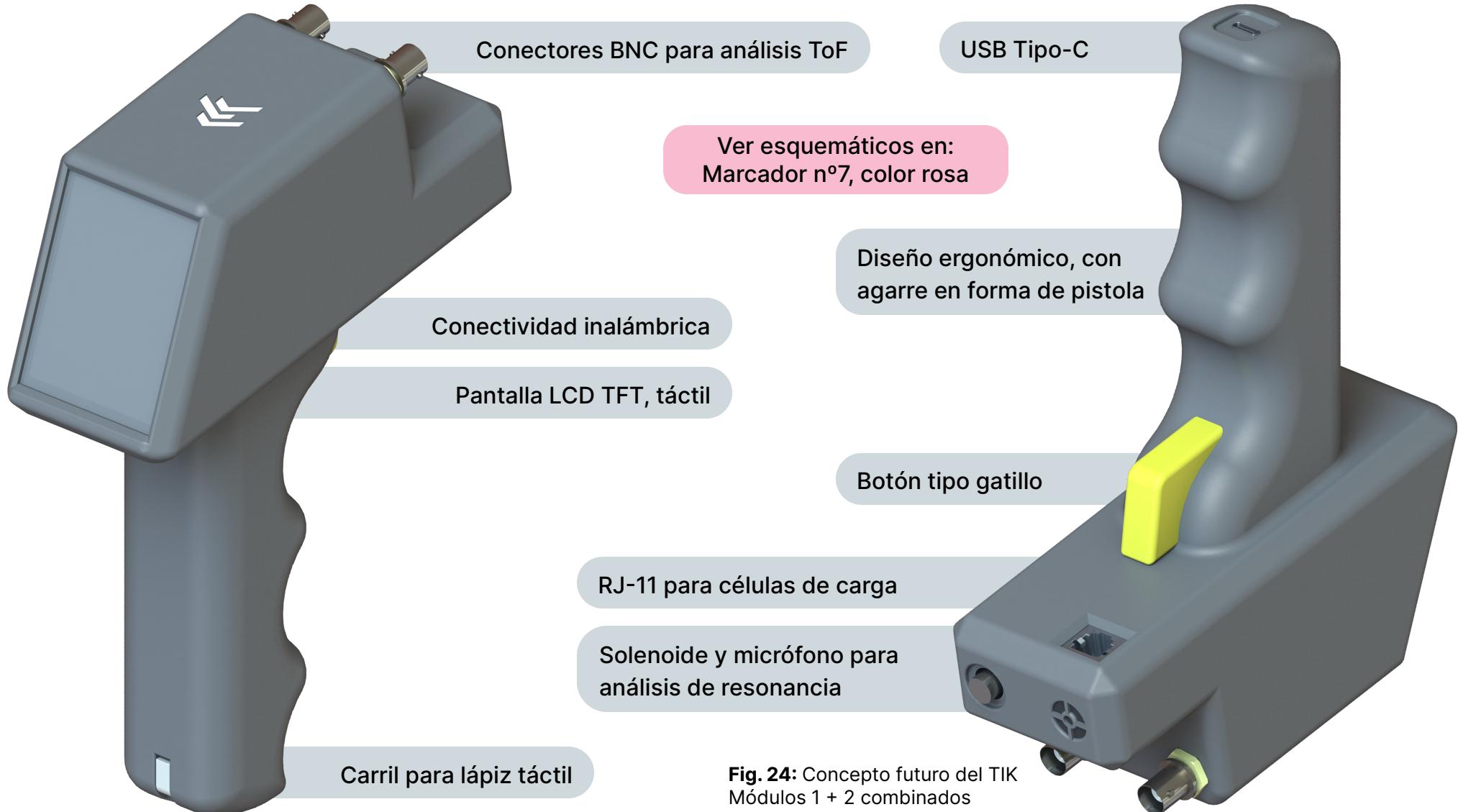
Material 3D más resistente

Rediseño resistente al polvo y salpicaduras

Cambiar la ubicación de los tornillos de cierre

Diseñar nuestros propios sensores piezoelectrinos

Futuro del proyecto



¡Gracias!