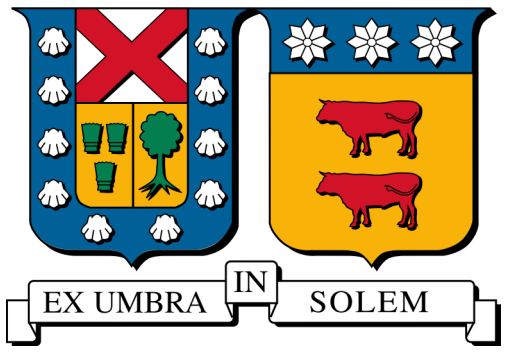
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAISO - CHILE



"ACTUALIZACIÓN DE DISEÑO ELECTRÓNICO DE DISPOSITIVO PARA MONITOREO AMBULATORIO DE VOZ"

MATHIAS EDUARDO WRIGGE FUENTES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO, MENCIÓN COMPUTADORES, SUBMENCIÓN TELECOMUNICACIONES Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES

PROFESOR GUIA: PHD. MATIAS ZAÑARTU

PROFESOR CORREFERENTE: JOHANNES SCHWARZENBERG

Marzo 2023

Material de referencia, su uso no involucra responsabilidad del autor o de la Institución.

Agradecimientos

Agradezco por sobre todo a mi familia. A mis padres por apoyarme y acompañarme durante todo el proceso, motivando así a que entregue siempre lo mejor de mí y que mis esfuerzos vayan a lo que es realmente importante. A mi hermano por ayudarme y estar siempre brindando su apoyo y alegría durante los días de trabajo. A mis abuelos, por ser un pilar inamovible en mi formación, y por seguir siendo ese pilar aún después de todo este tiempo. A mis tíos, tías, primos, primas y todos los que me han dado su apoyo en este tiempo.

Agradezco a mis amigos por acompañar los días de alegría, amortiguar los días de frustración, estar siempre dispuestos a ayudar, y brindarme oportunidades que no serían posibles sin ellos. Agradezco al equipo de *Lanek*, por ser amigos y compañeros por sobre cualquier cosa, y por hacer posible este proyecto con su trabajo y perseverancia.

Agradezco a mis mentores Matías Zañartu y Johannes Schwarzenberg, por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, aportando mi grano de arena para mejorar las tecnologías del futuro junto a un gran equipo.

A mi familia, por apoyarme siempre en todo este camino.

DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA

Actualización de Diseño Electrónico de Dispositivo para Monitoreo Ambulatorio de Voz

Mathias Eduardo Wrigge Fuentes

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electrónico, mención Computadores, submención Telecomunicaciones y Procesamiento de señales.

Universidad Técnica Federico Santa María

Profesor Guía: PhD. Matías Zañartu

Marzo 2023

Resumen

La medición de las características de la voz puede ser muy valiosa para detectar enfermedades antes de la aparición de síntomas más dañinos. Se busca la forma de hacer mediciones de voz constantemente, de forma ambulatoria. Con este objetivo nace el dispositivo *Advanced Voice Monitor* (*AVM*), desarrollado por la empresa startup *Lanek*, el cual consiste en un collar que aloja sensores y dispositivos de procesamiento para la adquisición de datos de voz.

Se busca realizar un rediseño del dispositivo *AVM*, manteniendo las capacidades del dispositivo y agregando nuevas funciones que mejoren la comodidad y experiencia de los usuarios. En este caso, el desafío es el diseño de una nueva *PCB* para el *AVM*, debiendo revisar y renovar los documentos de diseño del dispositivo anterior.

Para mejorar la comodidad y la conexión de los sensores al dispositivo, se estudia el uso de circuitos impresos flexibles. Estos permiten una mejor transmisión de las señales sin requerir el uso de cables apantallados.

Palabras Clave: Diseño Electrónico, Placas de Circuito Impreso, Circuitos Flexibles, Monitoreo de Voz.

DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA
UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA

Electronic Design Update for Ambulatory Voice Monitoring Device

Mathias Eduardo Wrigge Fuentes

Thesis for the fulfillment of the B.S. in Electronic Engineering, major in Computers, minor in Telecommunications and Signal Processing degree (6 year program).

Universidad Técnica Federico Santa María

Advisor: PhD. Matías Zañartu

March 2023

Abstract

Measurement of voice characteristics can be very valuable in detecting diseases before the onset of more damaging symptoms. The search is on for a way to take voice measurements constantly, on an outpatient basis. With this goal in mind, the *Advanced Voice Monitor* (*AVM*) device, developed by the startup company *Lanek*, was born, which consists of a necklace that houses sensors and processing devices for voice data acquisition.

A redesign of the *AVM* device is sought, maintaining the capabilities of the device and adding new functions that improve the comfort and experience of the users. In this case, the challenge is the design of a new *PCB* for the *AVM*, having to review and renew the design documents of the previous device.

To improve the convenience and connection of the sensors to the device, the use of flexible printed circuits is being studied. These allow better signal transmission without requiring the use of shielded cables.

Keywords: Electronic Design, Printed Circuit Boards, Flexible Circuits, Voice Monitoring.

Glosario

footprint es el arreglo de pads que permiten conectar físicamente y electricamente un componente a una placa de circuito impreso.. 16, 20

rigid-flex circuito impreso que integra secciones rígidas y secciones flexibles en una misma placa. vii, 4, 5

Acrónimos

AVM Advanced Voice Monitor. iii, iv, vii–xii, 1, 2, 8–10, 12, 14, 16, 27, 28, 30, 33, 41–44, 46–48, 50–53, 78–87

BLE Bluetooth Low Energy. 9

FPC Flexible Printed Circuit. viii, 5, 7, 9, 20, 31, 46, 47

MCU Microcontroller Unit. ix, 52, 57

PCB Printed Circuit Board. iii, iv, vii–ix, 2, 4, 5, 7–9, 16, 17, 26, 29, 30, 43, 47, 52

SNR Signal-to-Noise Ratio. vii–xii, 34–39, 41–43, 46, 47, 59–88

Índice de contenidos

1. Introducción **1**

1.1. Contexto 1

1.2. Problema a solucionar 2

1.3. Alternativas de solución 3

1.4. Características de comparación 7

1.5. Selección 7

2. Objetivos del trabajo **8**

2.1. Trabajo a desarrollar 9

2.2. Evaluaciones a realizar 10

2.3. Resultados esperados 10

3. Estado del arte **11**

3.1. Estado actual del proyecto 11

3.2. Hardware actual del dispositivo 12

3.2.1. Microcontrolador SAMD51 12

3.2.2. Chip integrado de administración de poder LTC3553 13

3.2.3. Códec de audio TLV320AIC3101 13

3.2.4. SoC Bluetooth Low Energy nRF52810 13

3.3. Dispositivo inalámbrico para detección de fatiga vocal 13

3.4. Diseño de circuitos impresos flexibles 14

4. Metodología **16**

4.1. Proceso de diseño 16

4.2. Pruebas de poder del dispositivo 24

4.3. Pruebas de funcionamiento del dispositivo 24

4.4. Pruebas de calidad de señal del dispositivo 25

5. Resultados **26**

5.1. Resultados de diseño 26

5.2. Pruebas de poder 32

5.3. Pruebas de funcionamiento 33
5.4. Pruebas de calidad de señales 34

6. Conclusiones **46**

Referencias **49**

7. Anexos **50**

7.1. Imágenes 50
7.1.1. Resultados de diseño 50
7.1.2. Resultados de pruebas de poder 55
7.1.3. Resultados de pruebas de calidad de señales 59
7.2. Códigos 88

Índice de tablas

1.1. Puntajes de las características de comparación para cada alternativa de solución. 7
4.2. Capacidades de fabricación de *PCBWay*. 16
5.3. Voltajes esperados y medidos en las pistas de alimentación. 32
6.4. Resultados de *SNR* para las mediciones de micrófono. 46
6.5. Resultados de *SNR* para las mediciones de acelerómetro. 47

Índice de figuras

1.1. Diseño actual del dispositivo *AVM*. 1
1.2. *PCB* al interior del dispositivo *AVM*. 2
1.3. Prototipo del circuito impreso flexible para la alternativa 1. 3
1.4. Prototipo del circuito *rigid-flex* para la alternativa 2. 4
1.5. Prototipo del circuito *rigid-flex* para la alternativa 3 5
1.6. Prototipo de los circuitos para la alternativa 4. 6
2.7. Diseño actual de la placa de circuito impreso del dispositivo *AVM*. 8
3.8. Diseño actual del dispositivo *AVM*. 12

4.9. Ventana de creación de componentes en *Altium*, mostrando el conector USB-C. 17
4.10. Diseño del módulo de procesamiento del nuevo dispositivo. 18
4.11. Diseño del módulo de poder del nuevo dispositivo. 19
4.12. Diseño del módulo de adquisición de datos del nuevo dispositivo. 20
4.13. Modelo 3D del conector sobre el collar. 21
4.14. Capas del collar flexible. 23
4.15. Diagrama de flujo de poder del dispositivo. 24
4.16. Diagrama de conexión entre componentes del dispositivo. 25
5.17. Capas externas del nuevo diseño para el dispositivo *AVM*. 27
5.18. Capas internas del nuevo diseño para el dispositivo *AVM*. 28
5.19. Renderizado 3D de la *PCB*. 29
5.20. *PCB* del dispositivo *AVM* V2, con componentes montados y soldados. 30
5.21. *FPC* del collar, con los componentes montados y soldados. 31
5.22. Voltaje en la pista LDO SD cuando el *AVM* está grabando. 33
5.23. Forma de onda y metadatos de archivo de audio guardado. 33
5.24. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 100 Hz en ambos dispositivos. 35
5.25. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 300 Hz en ambos dispositivos. 36
5.26. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 500 Hz en ambos dispositivos. 37
5.27. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 700 Hz en ambos dispositivos. 38
5.28. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 900 Hz en ambos dispositivos. 39
5.29. Forma de onda de extracto de señal de audio grabada con la versión nueva del dispositivo. 40
5.30. Forma de onda de extracto de señal de audio grabada con la versión nueva del dispositivo alimentado por USB. 40
5.31. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 100 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 41

5.32. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 300 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 41
5.33. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 500 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 42
5.34. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 700 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 42
5.35. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 900 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 43
5.36. Plano de tierra del *AVM* V2, mostrando la conexión de los sensores a la tierra digital en lugar de la tierra análoga. 44
5.37. Extractos del archivo de audio realizado con las modificaciones al dispositivo. . 45
7.38. *AVM* V2 con el collar flexible conectado y funcionando. 50
7.39. *AVM* V2 mostrando la curvatura del collar flexible. 51
7.40. *PCB* de *AVM* V2, énfasis en el *MCU*. 52
7.41. *AVM* V2 en estado de grabación, mostrando el indicador de luz roja. 53
7.42. Conexión de la batería al collar flexible. 54
7.43. Puntos de medición de los voltajes de funcionamiento en el módulo de poder. . 55
7.44. Puntos de medición de los voltajes de funcionamiento en el códec. 56
7.45. Puntos de medición de los voltajes de funcionamiento en el *MCU*. 57
7.46. Puntos de medición de los voltajes de funcionamiento en el lector microSD. . . 58
7.47. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 80 Hz en ambos dispositivos. 59
7.48. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 100 Hz en ambos dispositivos. 60
7.49. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 150 Hz en ambos dispositivos. 61
7.50. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 200 Hz en ambos dispositivos. 62
7.51. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 250 Hz en ambos dispositivos. 63

7.52. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 300 Hz en ambos dispositivos. 64
7.53. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 350 Hz en ambos dispositivos. 65
7.54. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 400 Hz en ambos dispositivos. 66
7.55. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 450 Hz en ambos dispositivos. 67
7.56. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 500 Hz en ambos dispositivos. 68
7.57. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 550 Hz en ambos dispositivos. 69
7.58. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 600 Hz en ambos dispositivos. 70
7.59. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 650 Hz en ambos dispositivos. 71
7.60. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 700 Hz en ambos dispositivos. 72
7.61. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 750 Hz en ambos dispositivos. 73
7.62. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 800 Hz en ambos dispositivos. 74
7.63. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 850 Hz en ambos dispositivos. 75
7.64. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 900 Hz en ambos dispositivos. 76
7.65. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 950 Hz en ambos dispositivos. 77
7.66. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 80 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 78

7.67. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 100 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 78
7.68. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 150 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 79
7.69. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 200 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 79
7.70. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 250 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 80
7.71. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 300 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 80
7.72. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 350 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 81
7.73. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 400 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 81
7.74. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 450 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 82
7.75. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 500 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 82
7.76. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 550 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 83
7.77. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 600 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 83
7.78. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 650 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 84
7.79. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 700 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 84
7.80. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 750 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 85
7.81. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 800 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 85

7.82. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 850 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 86
7.83. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 900 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 86
7.84. Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 950 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB. 87

Indice de códigos

7.1. Cálculo y gráfico de SNR 88

1. Introducción

1.1. Contexto

La medición de las características de la voz de una persona puede ser muy valiosa para detectar, diagnosticar y prevenir enfermedades antes de la aparición de síntomas más dañinos. Es por esto que se busca la forma de hacer mediciones de voz constantemente, de forma ambulatoria, capturando datos de audio y movimiento de tracto vocal durante el uso cotidiano de la voz. Con este objetivo se desarrolla el dispositivo *Advanced Voice Monitor* (*AVM*), el cual consiste en un collar que aloja los sensores, componentes y dispositivos de procesamiento que se requieren para la adquisición de datos.

El *AVM* actualmente cuenta con un prototipo comercial desarrollado por la empresa startup *Lanek*, mostrado en la figura 1.1. Se aprecia que el collar cuenta con una sección principal que aloja los componentes de procesamiento, y una sección secundaria que aloja un micrófono y un acelerómetro, con los cuales se sensa el sonido y movimiento de las cuerdas vocales producidos al hablar.



Figura 1.1: Diseño actual del dispositivo *AVM*.

A partir del modelo actual del *AVM*, se desea diseñar una nueva versión, llamada *AVM* V2,

actualizando tanto los componentes como el factor de forma del dispositivo, para agregar nuevas funciones y mejorar la experiencia de los usuarios.

1.2. Problema a solucionar

El diseño actual del *AVM* contiene componentes que causan problemas en el funcionamiento del dispositivo. Los principales componentes a corregir son las resistencias de pull-up que controlan el modo de bajo consumo del circuito de alimentación. Estas resistencias evitan que el sistema logre entrar en este modo de bajo consumo, por lo que deben ser reconectadas como pull-down. Otro componente a reemplazar es el conector de la batería a la placa, ya que el modelo actual no permite una conexión firme de los pines de alimentación.

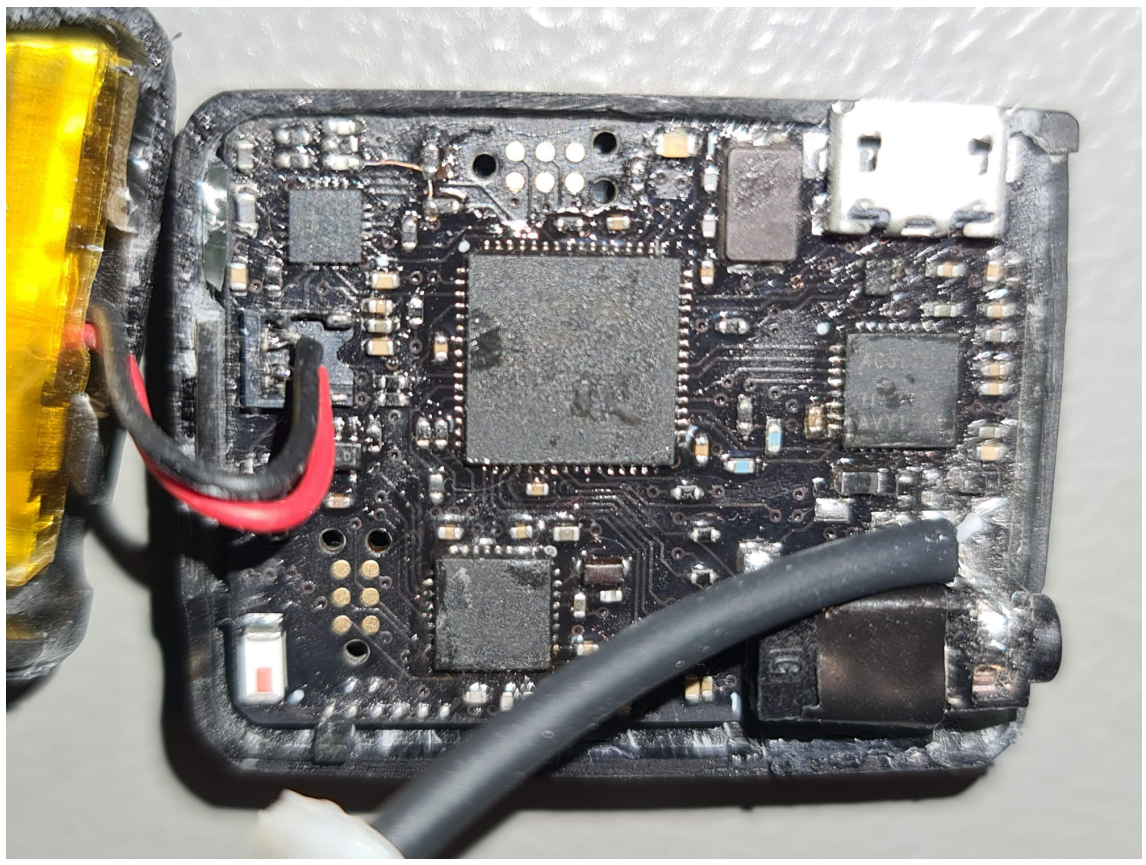


Figura 1.2: *PCB* al interior del dispositivo *AVM*.

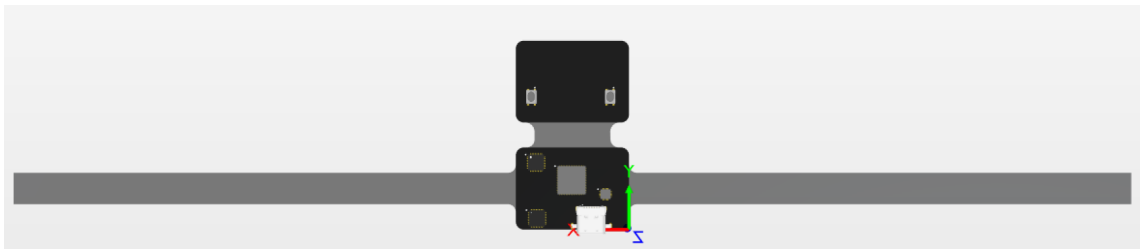
Otra actualización para el dispositivo es el reemplazo del conector micro-USB por un USB-C, lo que permitiría una mejor compatibilidad con los cables y cargadores más usados actualmente. Se desea incluir también una conexión directa al microprocesador que permita la detección de una conexión USB para activar la transferencia de archivos.

El reemplazo de los conectores de los sensores del dispositivo es también un objetivo del nuevo diseño. En la figura 1.2, se aprecia en la esquina inferior derecha de la *PCB* que la conexión del

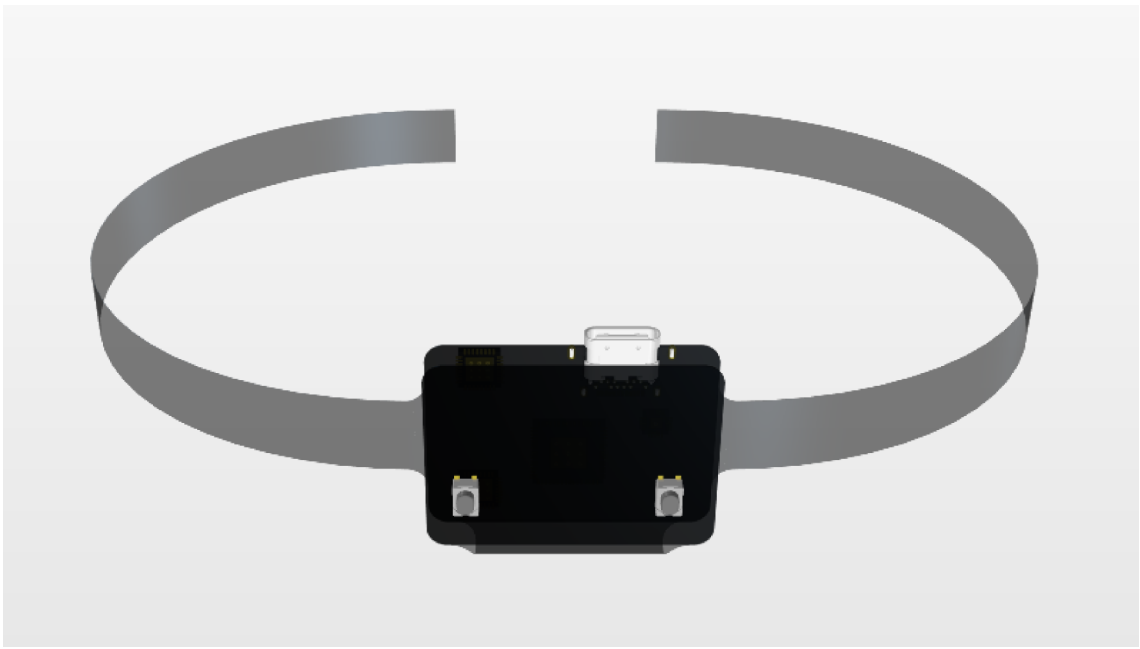
acelerómetro consiste en pads expuestos en los que se suelda un cable entrante, y el micrófono se conecta mediante un *jack* de 2.5 mm. Se desea reemplazar el conector para el micrófono y los pads expuestos del acelerómetro por un conector de menor tamaño que idealmente transmita las señales de ambos sensores de forma confiable y sin introducir ruido electromagnético.

1.3. Alternativas de solución

Opción 1 - Circuito completamente flexible: Se puede diseñar el circuito de forma completamente flexible, de esta forma se pueden integrar tanto la sección principal como los brazos a los que se conectan los sensores en una sola pieza. También se puede diseñar de forma de que el circuito se pliegue en torno a la batería, permitiendo así montar componentes a ambos lados de ésta como se muestra en la figura 1.3. La batería se ubica entre entre las dos secciones principales, y los sensores a los extremos de los brazos del collar.



(a) Extendido.



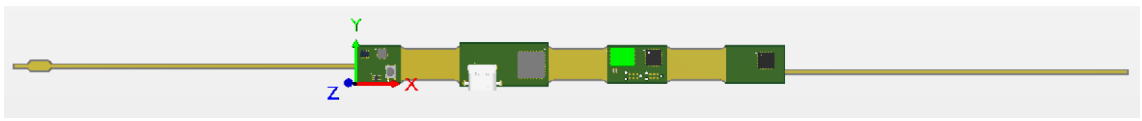
(b) Forma de collar.

Figura 1.3: Prototipo del circuito impreso flexible para la alternativa 1.

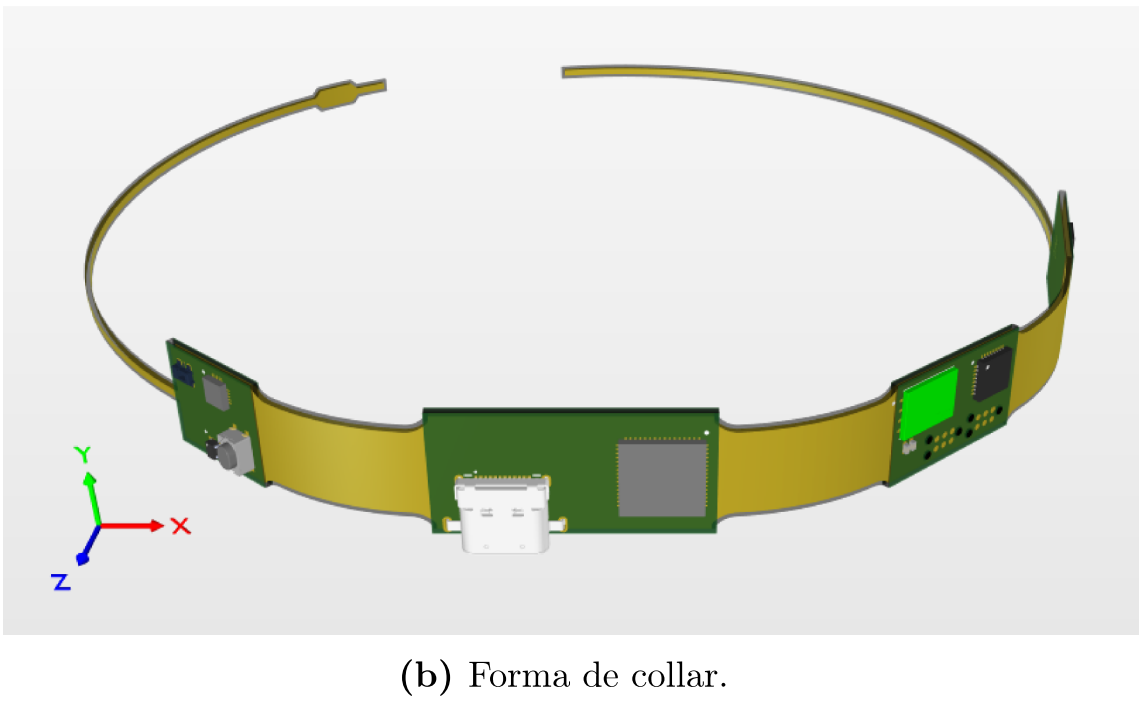
Una desventaja de este diseño es que al ser totalmente flexible, se dificulta el proceso de montaje y soldado de los componentes, lo que se puede solucionar con el uso de placas híbridas rígido-

flexibles. En este prototipo se puede reemplazar las secciones principales por *PCB* rígida, desde la cual se extienden los brazos y la sección que une las dos placas principales como circuitos flexibles.

Opción 2 - Circuito híbrido *rigid-flex*: Bajo el concepto de placas híbridas rígido-flexibles, se puede diseñar un circuito compuesto por varias secciones rígidas unidas por secciones flexibles, lo que permite una distribución de los módulos a lo largo del collar. El prototipo mostrado en la figura 1.4 permite que el collar sea más angosto y que los circuitos puedan ser menos evidentes a la vista, consiguiendo así un diseño más cómodo para el usuario. El circuito cuenta con secciones rígidas que alojan los componentes más importantes y secciones flexibles que permiten una mayor libertad de movimiento del collar.



(a) Extendido.



(b) Forma de collar.

Figura 1.4: Prototipo del circuito *rigid-flex* para la alternativa 2.

El diseño de este circuito requeriría un cambio en el tamaño de la batería, la cual debe quedar sobre una de las secciones rígidas. También es posible usar una batería con forma curva, pero esto restringe el movimiento completo del collar.

Opción 3 - Circuito híbrido con apartado para batería: Para solucionar el problema del tamaño y forma de la batería, se puede considerar un diseño en que la batería se ubica

en un extremo del collar y la placa principal en el otro extremo de forma simétrica, con los sensores en el medio como muestra la figura 1.5. La sección rígida de la derecha contiene los componentes principales y en el extremo izquierdo de la sección flexible se monta un conector para la batería. De esta forma, la placa principal, con los botones a los que accede el usuario queda en el lado de su cuello y no en la parte posterior, facilitando el uso del dispositivo. La batería se puede adecuar al tamaño de la placa principal para mantener la simetría y las diferencias que existan se pueden corregir dando distintas formas a la carcasa plástica externa de cada lado. También se facilita el ajuste del collar, quedando en la parte posterior espacio para una correa o manija ajustable que une los dos extremos.

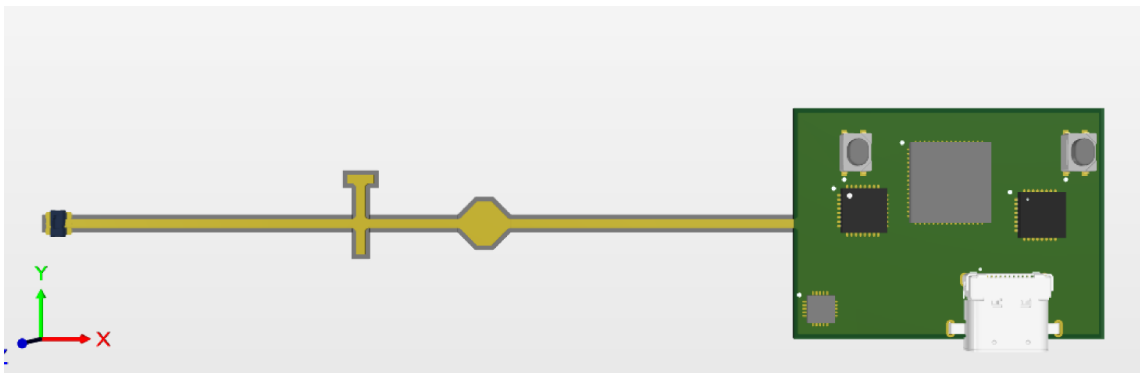


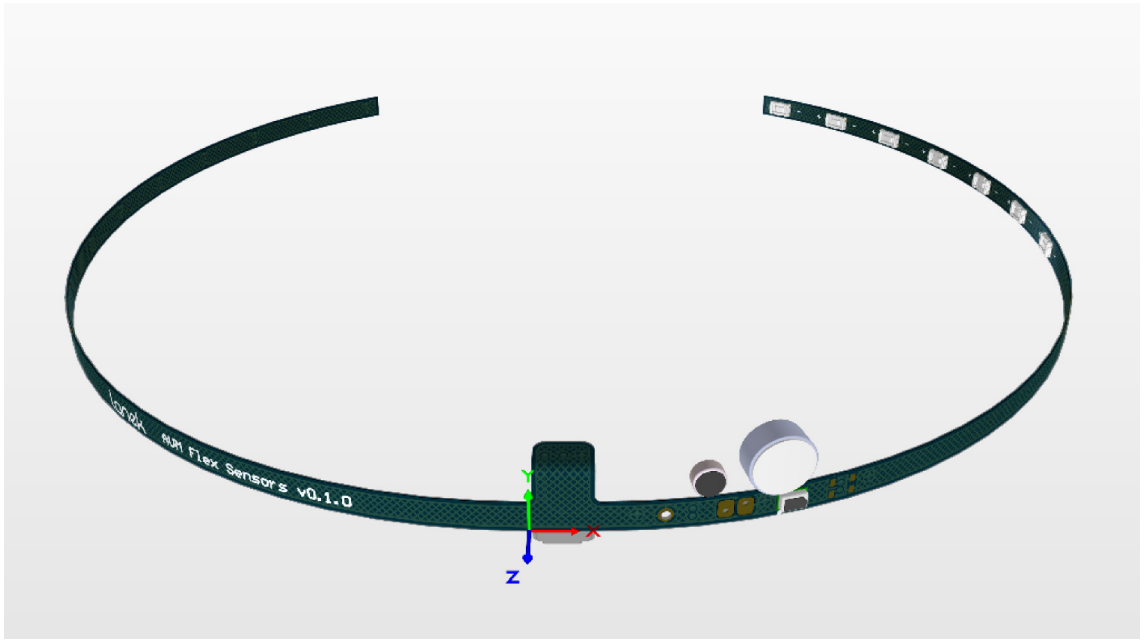
Figura 1.5: Prototipo del circuito *rigid-flex* para la alternativa 3

Opción 4 - Circuito con secciones separadas: Algunas desventajas de los circuitos híbridos rígido-flexibles son el alto costo de fabricación, poca estandarización en cuanto a materiales, y poca compatibilidad con distintos software de diseño. Es por esto que se tiene como alternativa el uso de circuitos rígidos y flexibles unidos por un conector *PCB-FPC*. Esto también trae la ventaja de poder diseñar de manera independiente la placa principal rígida y el collar flexible, logrando un diseño más modular.

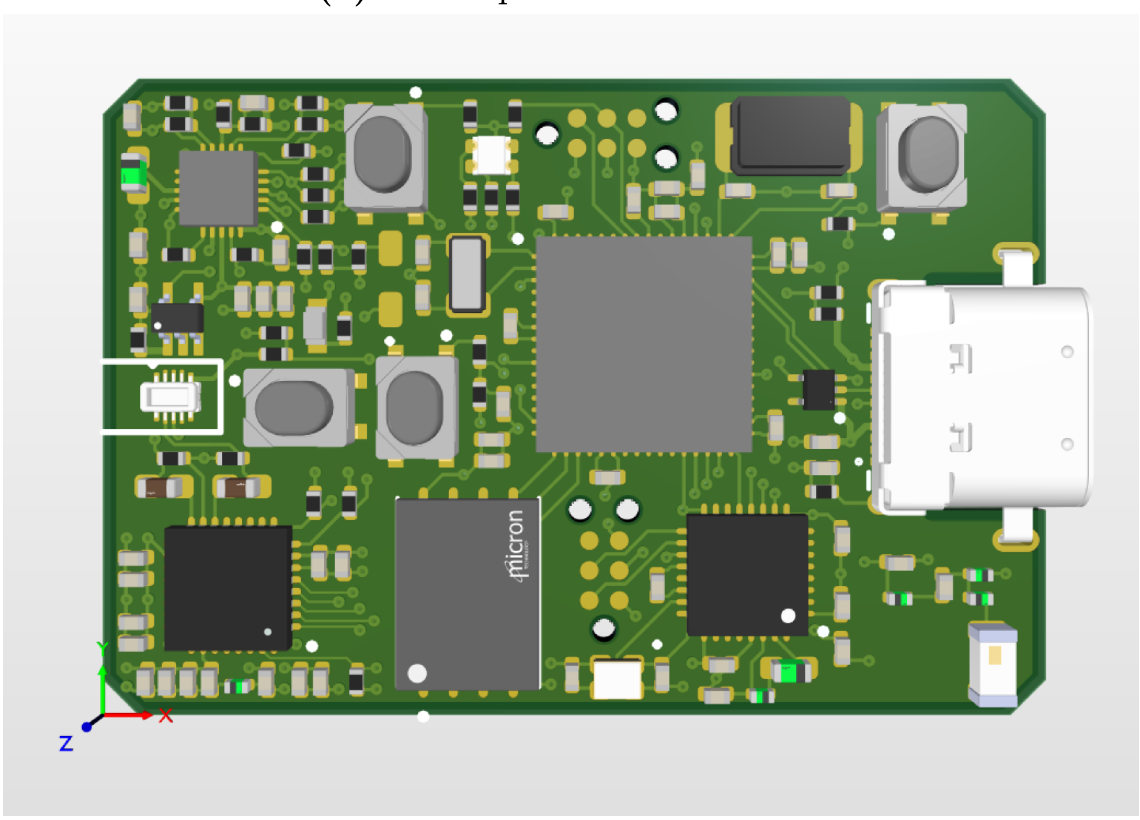
Se diseña a partir del prototipo de la figura 1.5, dividiendo la parte flexible y la rígida en dos secciones independientes. La parte flexible consiste solo en el collar, que cuenta con los sensores y conexiones hacia la placa principal y hacia la batería. En la sección rígida se encuentran los componentes principales del dispositivo, y un conector para la sección flexible. De esta manera se fabrican collares flexibles de distintos tamaños, que se pueden conectar fácilmente al dispositivo para un mejor ajuste a cada usuario. Para esto se diseña el collar con múltiples puntos de conexión a la placa, separados entre ellos por 1 cm, y todos en paralelo de manera de que se pueda montar un conector en cualquiera de ellos como se muestra en la figura 1.6. Se

hace lo mismo dejando pads expuestos para conectar la batería en el otro extremo del collar.

La modularidad de este diseño permite que se monten distintos modelos de micrófonos y acelerómetros en los collares flexibles y se puedan realizar pruebas de sus diferencias usando un mismo dispositivo simplemente cambiando el collar desde el conector.



(a) Prototipo del collar flexible.



(b) Prototipo de la placa principal.

Figura 1.6: Prototipo de los circuitos para la alternativa 4.

1.4. Características de comparación

Las características que se usan para comparar los prototipos y alternativas de solución son la calidad de la conexión de los sensores, el costo de fabricación del dispositivo, la modularidad que permite el diseño, la factibilidad del proceso de diseño y armado, y la comodidad del usuario al usar el dispositivo. A cada una de estas características se les asigna una ponderación de acuerdo a su importancia en la totalidad del diseño, mostrada en el cuadro 1.1.

Los prototipos presentados como alternativas de solución se comparan usando las características de comparación, siendo asignado un puntaje escalado de 0 a 100 de acuerdo a la efectividad con la que cumplen cada una. Los resultados de la comparación se muestran en el cuadro 1.1, en el que se aprecia que el prototipo 4 es el que mejor cumple las características buscadas, y por lo tanto es la alternativa seleccionada.

Tabla 1.1: Puntajes de las características de comparación para cada alternativa de solución.

Alternativas	**Conexión de sensores (30 %)**	**Costo de fabricación (25 %)**	**Modularidad (20 %)**	**Proceso de armado (15 %)**	**Comodidad del usuario (10 %)**	**Total**
Opción 1	83	100	40	67	70	75
Opción 2	100	40	60	33	50	62
Opción 3	100	40	60	47	80	67
Opción 4	67	80	90	87	100	81

1.5. Selección

De acuerdo a los requerimientos de costo de fabricación, proceso de diseño y armado, modularidad del diseño, comodidad para el usuario, y robustez de conexión de sensores, se selecciona como mejor alternativa el diseño correspondiente a una *PCB* con los componentes y módulos esenciales del dispositivo (placa principal), que se conecta a un *FPC* en forma de collar que contiene los sensores usados y la batería, como se muestra en la figura 1.6.

2. Objetivos del trabajo

Se tiene como objetivo el diseño electrónico de un dispositivo de monitoreo de voz consistente en múltiples sensores como un micrófono y un acelerómetro, de los cuales se debe adquirir y almacenar datos pertinentes al esfuerzo de las cuerdas vocales en el uso cotidiano de la voz. El sistema debe asegurar la integridad de las señales y el correcto funcionamiento de los distintos módulos que lo componen, manteniendo un tamaño adecuado para ser usado por largos periodos de manera cómoda.

El diseño corresponde a una actualización para el dispositivo *AVM*, el cual se encuentra en proceso de desarrollo y posee un prototipo funcional. El modelo de la *PCB* actual se muestra en la figura 2.7, y está conformada por módulos de adquisición de datos, procesamiento, almacenamiento, transmisión y alimentación. Los componentes se ordenan de acuerdo al módulo al cual pertenecen y se posicionan sobre la *PCB*, la cual mide 35 mm de largo y 27 mm de ancho.

El dispositivo cuenta con un micrófono y un acelerómetro que permiten capturar simultáneamente la voz del usuario y el respectivo movimiento de su tracto vocal. Estos datos podrán ser procesados e interpretados para obtener información sobre el esfuerzo vocal.

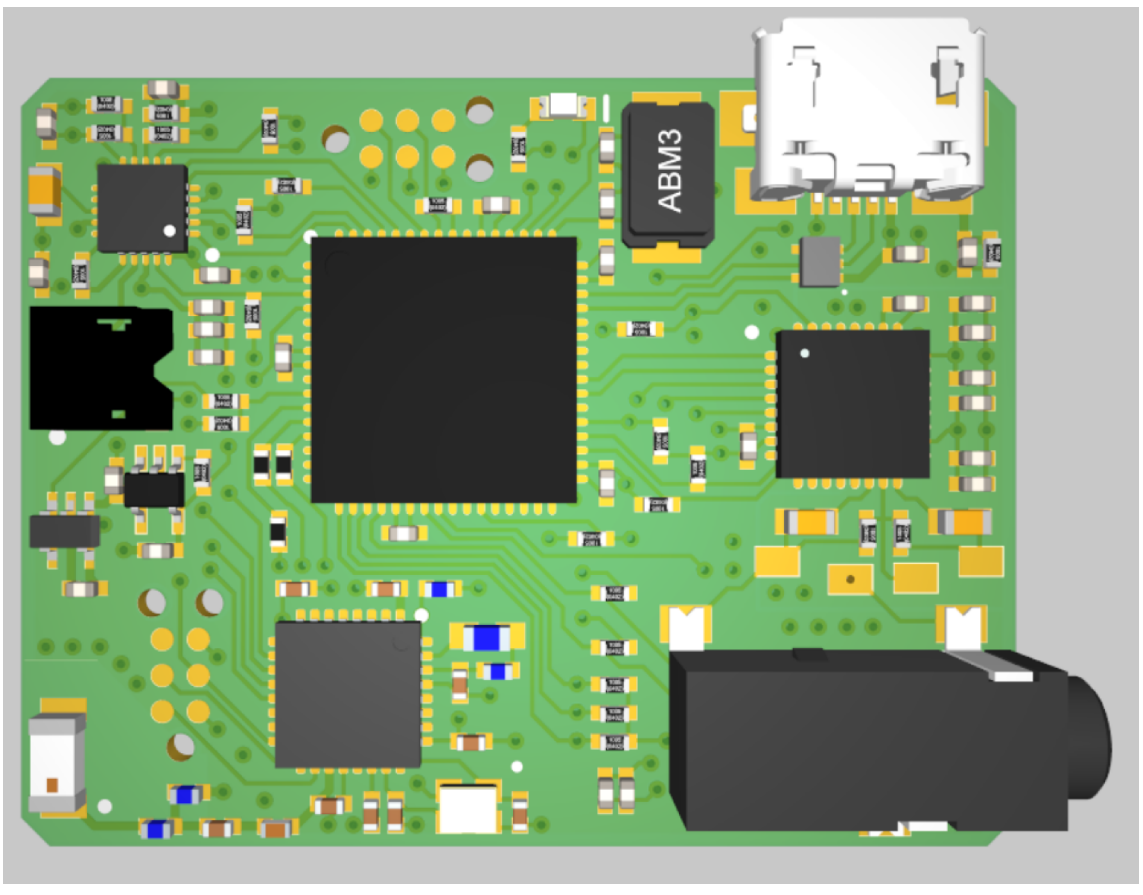


Figura 2.7: Diseño actual de la placa de circuito impreso del dispositivo *AVM*.

Como objetivos específicos se tiene:

Actualización de componentes: Actualizar los componentes, conectores y posicionamiento de botones en el *AVM* para un mejor funcionamiento y experiencia de usuario.

Calidad de las señales: Lograr una mejor relación señal-ruido de las señales que se adquieren con el dispositivo (micrófono y acelerómetro) con el nuevo diseño.

Proceso de fabricación: Lograr un diseño que simplifique el proceso de fabricación de los dispositivos *AVM*.

2.1. Trabajo a desarrollar

El trabajo a desarrollar consiste en el estudio del dispositivo *AVM*, para posteriormente recrear el funcionamiento en un nuevo diseño, que consiste en un *FPC* en forma de collar en el que van soldados los sensores acelerómetro y micrófono. Este collar lleva también soldada la batería del dispositivo, por lo que requiere un circuito de poder además de los sensores. De forma paralela se diseña una *PCB* con los módulos de procesamiento, adquisición, alimentación, *BLE* y almacenamiento de datos. El diseño se realiza usando el software de diseño electrónico *Altium Designer*. Se realiza una validación del nuevo diseño a través de pruebas de funcionamiento del hardware, las cuales consisten en pruebas de poder y de calidad de las señales.

Tareas asociadas a los objetivos

- Investigación y selección del hardware a usar, tanto sensores como componentes que garanticen la mejor relación señal/ruido considerando también el costo del dispositivo.
- Revisión y actualización de los planos esquemáticos del dispositivo, incorporando componentes y módulos nuevos.
- Diseño de la *PCB*, siendo importante el tamaño, factibilidad de fabricación y densidad de componentes.
- Diseño electrónico del collar flexible.
- Revisión y corrección de errores en diseño en caso de ser requerido.
- Fabricación y montaje del dispositivo *AVM*.
- Pruebas de poder del dispositivo.

- Pruebas de funcionamiento del dispositivo.
- Pruebas de calidad de señal de los sensores con el collar flexible.

2.2. Evaluaciones a realizar

Durante el proceso de diseño, se debe evaluar la posición de cada uno de los elementos para procurar mantenerse dentro de los parámetros físicos mínimos establecidos por el fabricante. Este proceso se realiza con ayuda del software *Altium Designer*, en el cual se mantiene una lista de reglas de fabricación que se deben cumplir.

Tras finalizar el proceso de diseño, se fabrica y se montan los componentes del dispositivo. Posteriormente se evalúa su funcionamiento en base a las siguientes pruebas:

- Medición de continuidad de las pistas, para comprobar que no se generen cortocircuitos.
- Medición de voltajes, asegurando que se obtienen los voltajes deseados en cada uno de los componentes.
- Inyección del firmware a usar en el microprocesador, verificando que se programa correctamente y cumple las funciones requeridas.
- Pruebas de blancura de la señal. Se verifica que las señales de interés no tienen ruido electromagnético introducido en el dispositivo.

2.3. Resultados esperados

Se espera que esta nueva versión del dispositivo *AVM* funcione de manera correcta, permitiendo la captura y procesamiento de los datos entregados por los sensores, sin introducir ruido electromagnético significativo en estas señales.

3. Estado del arte

Durante el proceso de investigación para el trabajo se encuentra información sobre los distintos problemas que se deben solucionar, y el trabajo existente que puede ayudar a resolver estos problemas. Además se tiene la información y documentación preexistente relevante para el proyecto, la que será de asistencia al momento de desarrollar el dispositivo.

3.1. Estado actual del proyecto

El proyecto actualmente se encuentra en proceso de desarrollo, con un prototipo funcional del dispositivo. El modelo actual, mostrado en la figura 3.8, consiste de una placa de circuito impreso, a la cual se conectan los sensorers usados a través de un cable blindado que se coloca alrededor del cuello del usuario en forma de collar. Los sensores consisten de un micrófono y un acelerómetro. El prototipo adquiere los datos y los almacena en una tarjeta microSD conectada al reverso de la placa. La batería se carga mediante conexión micro USB, la cual también permite el intercambio de archivos entre un computador y el dispositivo. El diseño y el procesamiento realizado por el dispositivo se basa en la publicación *Mobile Voice Health Monitoring Using a Wearable Accelerometer Sensor and a Smartphone Platform* [1].



Figura 3.8: Diseño actual del dispositivo *AVM*.

3.2. Hardware actual del dispositivo

Para el desarrollo del proyecto de considera el uso del siguiente hardware, tanto para procesamiento o como referencia de los distintos módulos del dispositivo.

3.2.1. Microcontrolador SAMD51

La serie de microcontroladores SAMD51 de Microchip Technology usa un procesador ARM Cortex-M4, de hasta 120 MHz. Permite alto rendimiento manteniendo un bajo consumo de energía. La gran cantidad de interfaces permite integrar fácilmente los distintos módulos del dispositivo, y la configuración de modos de bajo consumo energético permiten extender la duración de la batería mientras el dispositivo no está en uso. [2]

3.2.2. Chip integrado de administración de poder LTC3553

El LTC3553 de Analog Devices es un chip integrado de administración de poder y cargador de batería Li-Ion. Está diseñado para cumplir con el estándar USB, limitando la corriente de carga a 500 mA. Este chip permite generar distintos voltajes, teniendo así fuentes de alimentación para los módulos que requieran diferentes voltajes de entrada. [3]

3.2.3. Códec de audio TLV320AIC3101

El códec de audio estéreo TLV320AIC3101 de Texas Instruments permite la captura de datos a frecuencias de muestreo de hasta 96 kHz. Incluye la posibilidad de agregar etapas de procesamiento de datos y filtración de ruido durante la captura. Posee un bajo consumo energético, y la capacidad de control a través de una interfaz I^2S facilita la comunicación con el resto del dispositivo. [4]

3.2.4. SoC Bluetooth Low Energy nRF52810

El chip bluetooth nRF52810 de Nordic Semiconductors dispone de una CPU ARM Cortex-4, se comunica al resto de los módulos por interfaz SPI y permite la conexión y control del dispositivo a través de una aplicación para *smartphone*. De esta forma el dispositivo puede mostrar información relevante al usuario mientras está en uso. Esta funcionalidad se encuentra en desarrollo y no está disponible en el dispositivo actual.

Además de estos módulos, el modelo actual del dispositivo cuenta con un lector de tarjetas microSD para almacenar los datos de los sensores, un jack de 2.5 mm para la conexión del micrófono, y pads expuestos para soldar el cable de conexión al acelerómetro. Además se cuenta con botones y LEDs para la interfaz e interacción con el usuario.

3.3. Dispositivo inalámbrico para detección de fatiga vocal

Investigadores de la *Universidad Northwestern* han desarrollado un dispositivo inteligente inalámbrico que ayuda a detectar y alertar a usuarios sobre la sobrecarga y fatiga en el uso de la voz. Este dispositivo consiste en una pieza flexible que se sitúa en la piel sobre el pecho, y detecta el uso de la voz a través de vibraciones. Con esto se logra medir de manera precisa la

amplitud y frecuencia del habla. El dispositivo no cuenta con micrófonos, tanto por preocupaciones de privacidad de los datos y para evitar interferencia del ruido ambiente en los datos de voz.

El dispositivo transmite los datos de uso acumulativo de la voz vía *Bluetooth* a un dispositivo inteligente del usuario mediante una aplicación. En la aplicación el usuario debe presionar un botón cada vez que sienta fatiga en la voz, y de esta forma se entrena un algoritmo capaz de predecir y alertar al usuario para prevenirla. Se incorpora el uso de un dispositivo háptico separado en forma de pulsera, también conectado a través de *Bluetooth*, que puede dar variadas alertas al usuario a través de vibraciones de distintas intensidades. [5] [6]

Este dispositivo es de particular interés debido a la similitud de funciones con el dispositivo *AVM*, sirviendo así como ejemplo de un diseño de tamaño y forma adecuados que permite ser usado con comodidad de manera ambulatoria por los usuarios. Sin embargo, no se tiene mayor información del hardware usado ni de la autonomía del dispositivo.

3.4. Diseño de circuitos impresos flexibles

Existe una variedad de métodos para diseñar la placa de circuito impreso que se requiere para el dispositivo, en especial la manera de conectar los sensores a la placa principal, manteniendo la integridad de las señales sin introducir ruido electromagnético no deseado. Un método de particular interés es el uso de circuitos impresos flexibles (FPC por sus siglas en inglés), los que permiten un mejor factor de forma y confiabilidad en las conexiones, especialmente en dispositivos de monitoreo de uso cotidiano.

Una de las preocupaciones al usar este tipo de circuitos flexibles es la degradación que pueden sufrir las pistas de cobre tras continuas flexiones del material. El estudio *Flexible PCB Failures From Dynamic Activity and Their Impacts on Bioimpedance Measurements: A Wearable Case Study* determina que de tres participantes usando un dispositivo con circuitos flexibles por 7 días, dos de ellos sufrieron degradación de las pistas de cobre, incluso tras solo 30 horas de uso. Estas degradaciones solo ocurrieron en las zonas en que se transiciona de una pista a un pad. [7] Si bien este estudio consiste en un dispositivo que se usa en la rodilla, una zona con más movimiento que el que afectará el collar, se deben considerar un diseño que minimize las

posibilidades de degradación.

Diversas formas de optimizar la durabilidad del circuito flexible se pueden derivar del estudio *Rigid-Flexible Printed Circuit structure optimization by simulations*, el cual concluye que la mayor parte del estrés al flexionar el material se concentra en las capas exteriores, y destaca la importancia de los materiales usados en los conectores de estos circuitos.[8]

Cabe destacar que un método de fabricación que puede ser de utilidad es el de circuitos híbridos rígido-flexibles. Estos permitirían incluir de forma continua los distintos módulos del dispositivo a lo largo de todo el collar, logrando que el dispositivo sea cómodo y que el diseño aparente el de un collar tradicional. Este tipo de circuito impreso está igualmente expuesto a las fallas mecánicas, por lo que igualmente se deben considerar los estudios anteriores para su diseño.

4. Metodología

4.1. Proceso de diseño

Se realiza el diseño electrónico del dispositivo *AVM* usando el software *Altium Designer*, el cual permite importar los márgenes y espaciados mínimos entre componentes y pistas de cobre establecidas por el fabricante, como reglas de diseño. Así el software asegura que no se sitúan componentes fuera de estas reglas y que el diseño es factible para su fabricación.

En este caso la fabricación es realizada por la empresa *PCBWay*, quienes establecen las capacidades de fabricación mostradas en la tabla 4.2 [9].

Tabla 4.2: Capacidades de fabricación de *PCBWay*.

Items	**Capacidad de fabricación**
Número de capas	1-10 capas
Material	FR-4, Flex, Rigid-flex, Aluminio, etc.
Tamaño máximo de PCB	500x1100 mm
Tolerancia de tamaño de PCB	±0.2mm/±0.5mm
Trazo mínimo	0.1mm (4mil)
Espaciado mínimo entre componentes	0.1mm (4mil)
Tamaño de perforaciones	0.2-6.3mm
Tamaño mínimo de anillo anular	0.15mm (6mil)

Tras reconocer las necesidades del diseño y realizar una conceptualización de la forma, tamaño y funciones de la nueva versión del dispositivo, se inicia el trabajo de diseño a partir de la versión actual, teniendo acceso a los esquemáticos y planos de diseño de éste. Se revisan y reordenan los esquemáticos, importando y creando en *Altium* los componentes nuevos a usar, principalmente el conector board-to-board, el micrófono, y el conector USB-C. La figura 4.9 muestra la ventana de creación de componentes en *Altium*, donde se puede apreciar el componente del conector USB-C, mostrando su representación en el esquemático y el *footprint* para el posicionamiento en la *PCB*.

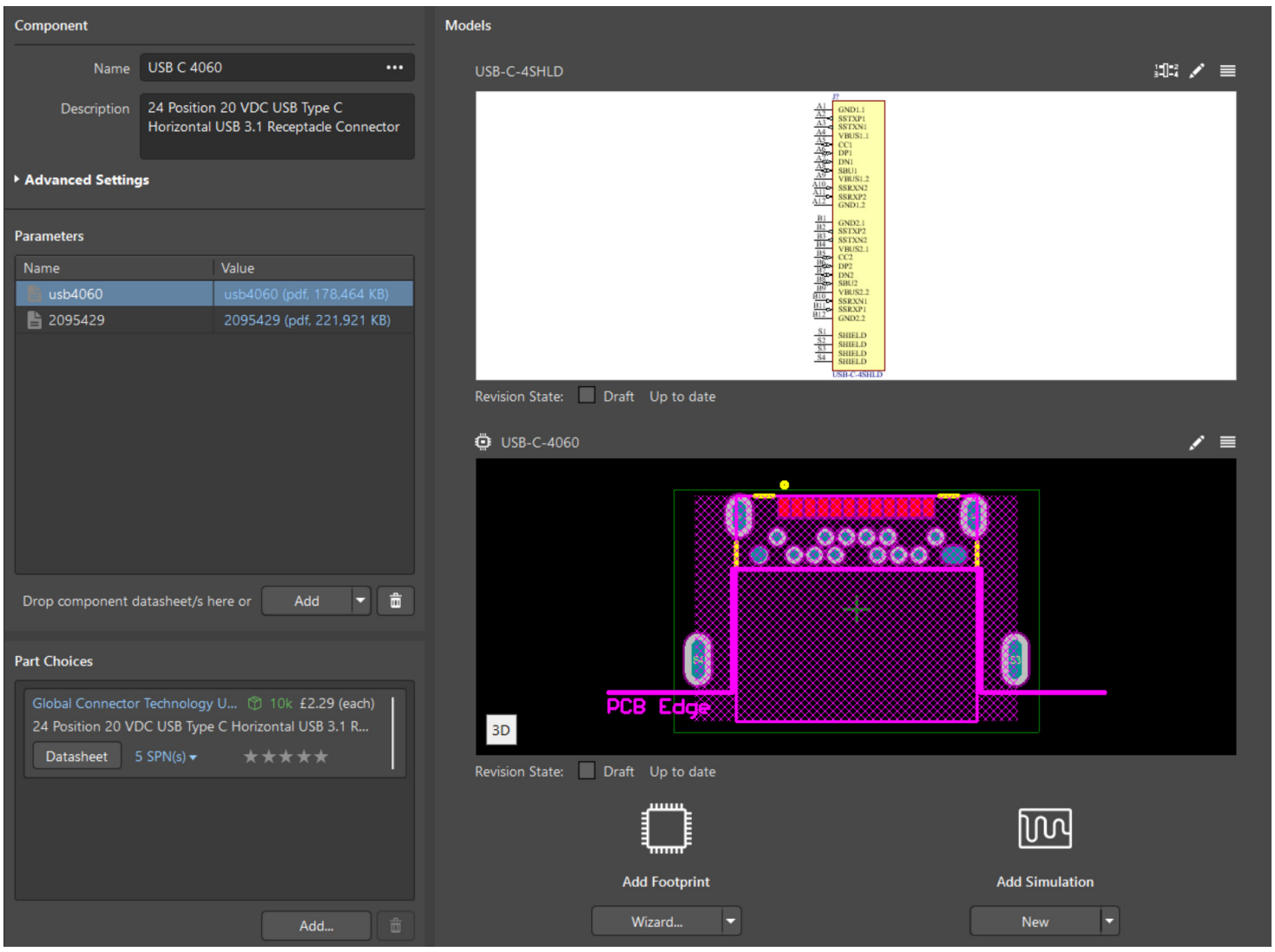


Figura 4.9: Ventana de creación de componentes en *Altium*, mostrando el conector USB-C.

Se diseña la *PCB* principal como una placa de 4 capas, manteniendo el tamaño anterior de 35 milímetros por 27 milímetros. Se tiene como indicación colocar la mayor cantidad de componentes en la cara superior de la *PCB*, para facilitar el proceso de montaje y soldadura de éstos.

El módulo de procesamiento del dispositivo, mostrado en la figura 4.10, consiste en un microprocesador ARM Cortex-M4F SAM D51, cristales osciladores de 32 kHz y 48 MHz, botones y LEDs para interfaz con el usuario y un conector USB-C. Se decide mantener el modelo de microprocesador para tener la mejor compatibilidad con el firmware actual, requiriendo así solo ajustes menores para funcionar. Los pines de conexión con el resto de los módulos se mantienen en su mayoría, reemplazando solo los que ya no cumplen las funciones existentes en el dispositivo anterior, como el pin para detectar la conexión del jack de audio.

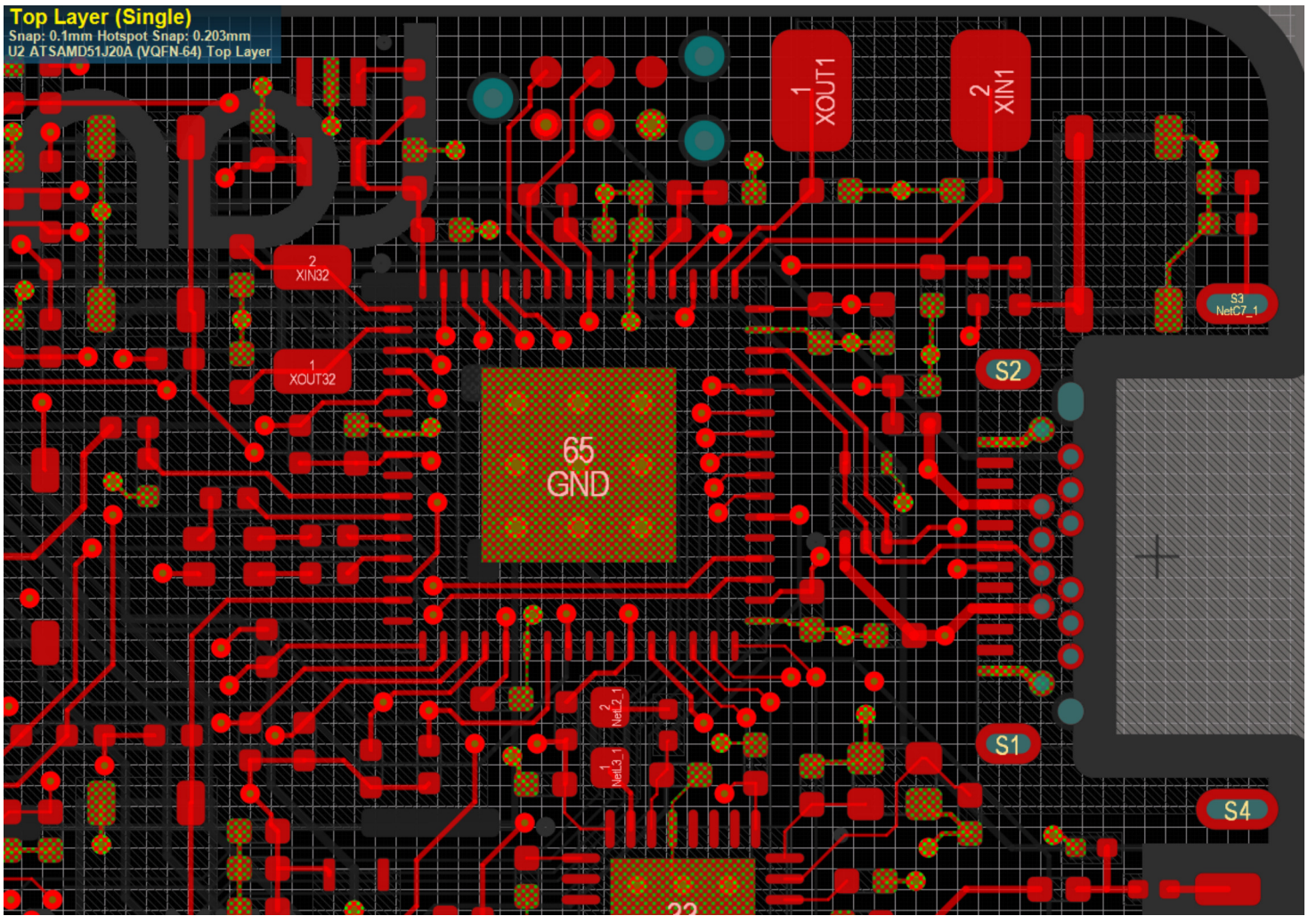


Figura 4.10: Diseño del módulo de procesamiento del nuevo dispositivo.

Se reemplaza el conector micro USB actual por un conector USB-C para brindar un diseño actualizado y dar mayor facilidad al usuario al momento de cargar la batería. Por el momento se usa el conector en modo de retro compatibilidad con el estándar USB 2.0, no usando las pistas extras que se requieren para las funciones de USB 3.0. Además se agrega un circuito de reducción de voltaje para poder detectar automáticamente la conexión del dispositivo y entrar en modo de periférico USB para transferencia de datos.

El módulo de poder, mostrado en la figura 4.11, es controlado por un circuito integrado de administración de poder LTC3553, que proporciona un voltaje de salida de 3,3 V para alimentar los módulos del dispositivo. Los cambios realizados en este módulo son principalmente la inclusión de resistencias de pull-up junto a las de pull-down para las señales de control, lo que permite, dependiendo de qué resistencias se montan, el funcionamiento del modo de bajo consumo o la capacidad de depurar el dispositivo, lo que causa problemas en la versión actual.

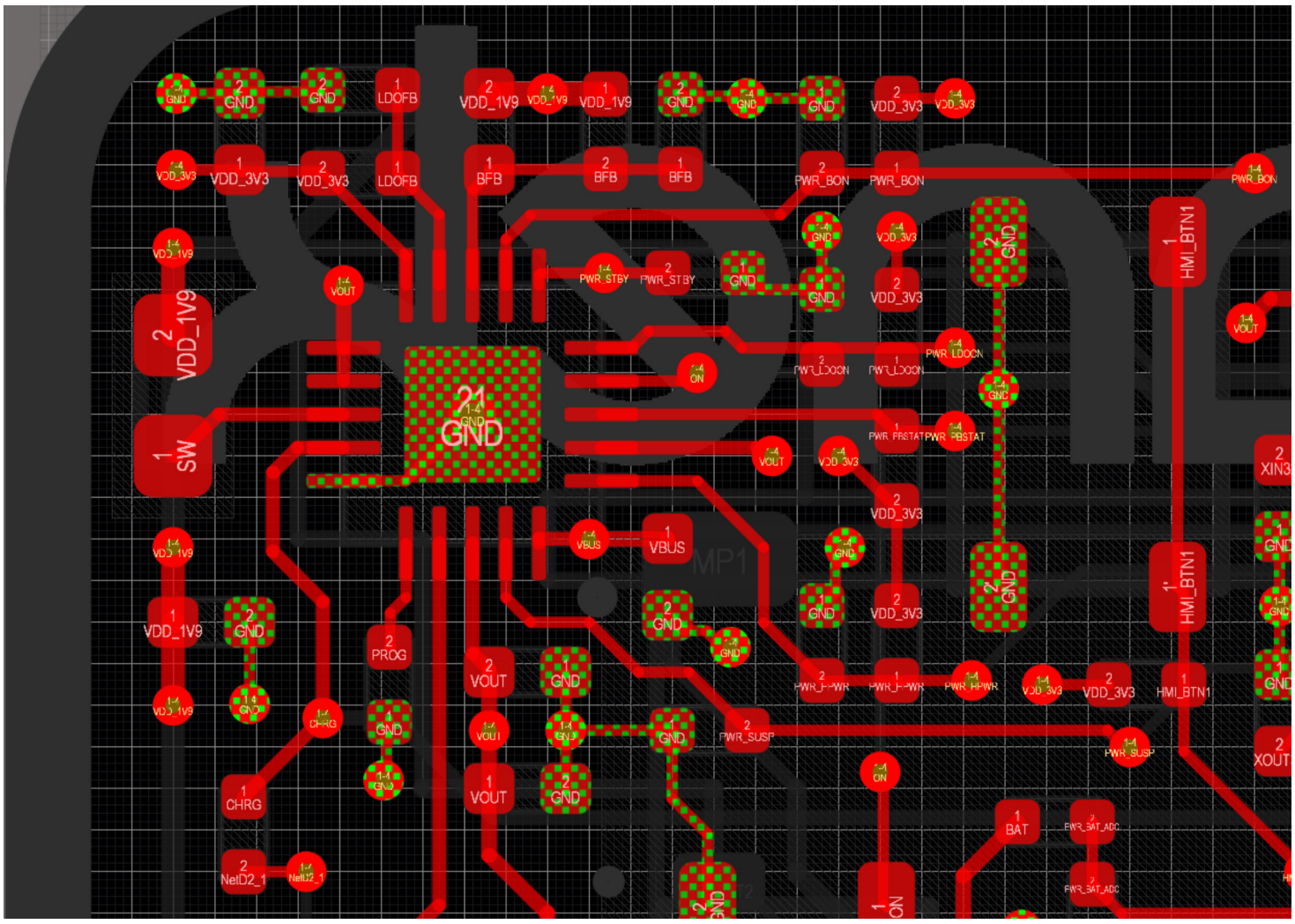


Figura 4.11: Diseño del módulo de poder del nuevo dispositivo.

El módulo de adquisición de datos, mostrado en la figura 4.12, consiste en un códec de audio TLV320AIC3101, cuyo ADC soporta frecuencias de muestreo de 8 kHz a 96 kHz. En este módulo se reemplaza la conexión de entrada de los sensores, la que actualmente consta de un jack de audio de 2,5 mm para el micrófono y un set de pads expuestos para soldar la conexión del acelerómetro del dispositivo. Éstos se reemplazan por un conector Board-to-Board de 6 pines, lo que permite la conexión de la placa rígida con el collar flexible, transmitiendo las señales de los sensores y el voltaje de alimentación desde la batería.

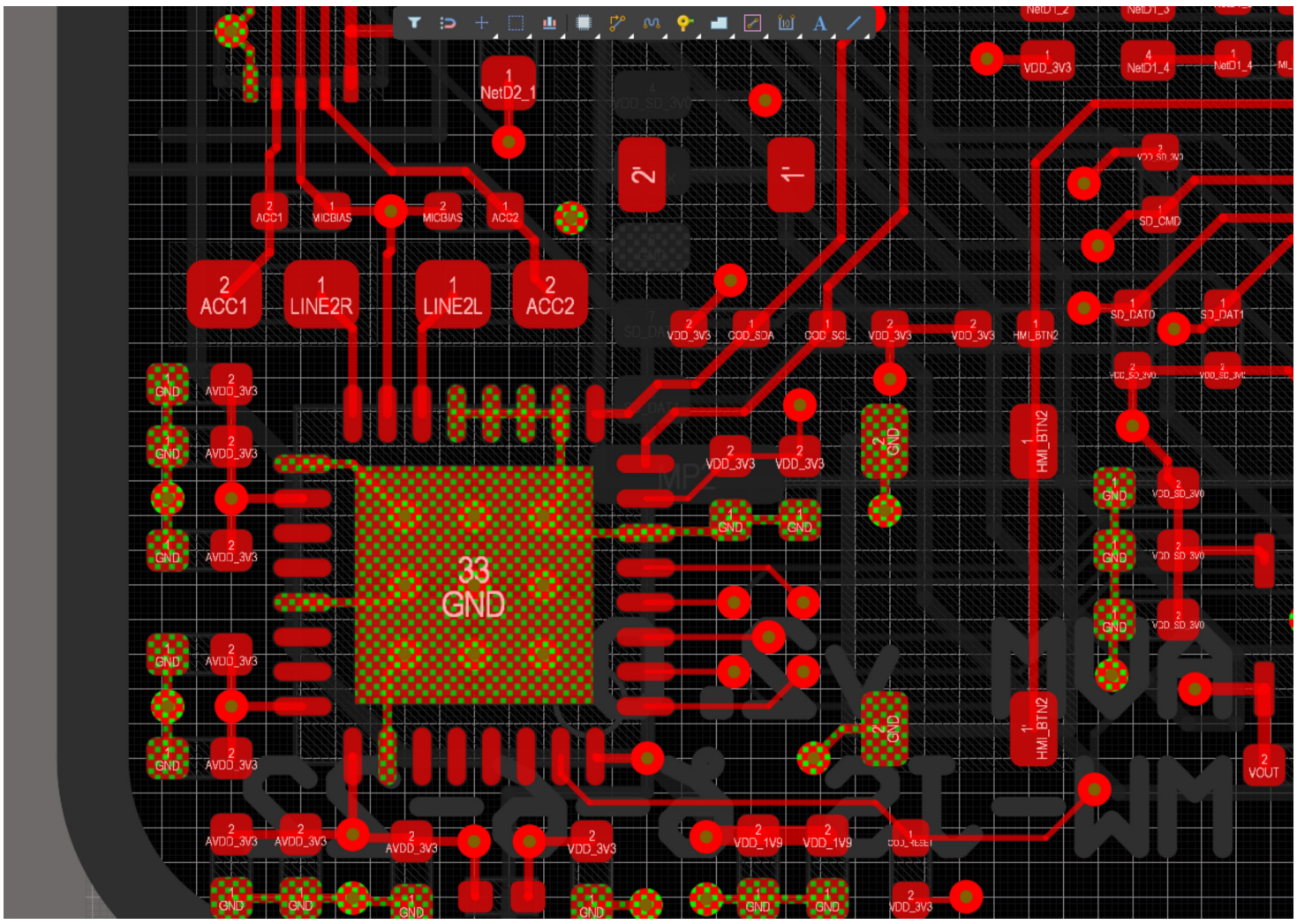


Figura 4.12: Diseño del módulo de adquisición de datos del nuevo dispositivo.

El collar flexible consiste en una *FPC* de 4 capas, la cual cumplirá las funciones de abarcar los sensores y la batería del dispositivo, y las pistas para transmitir la alimentación y las señales de los sensores.

Para la conexión del collar flexible a la placa principal, se decide usar un conector Board-to-Board SlimStack de 6 circuitos *Molex 505413-0610*, mostrado en la figura 4.13. Esto permite una conexión más confiable y segura, facilitando además el proceso de remover el collar en caso de ser necesario para reemplazo o reparaciones del hardware. Con el objetivo de hacer que el tamaño del collar sea ajustable y de acuerdo a la necesidad de cada persona, se sitúan *footprints* para este conector cada 1 centímetro en el borde del collar, a lo largo de 10 centímetros. De esta forma se puede soldar el conector en un *footprint* más cercano al centro en caso de requerir un collar de menor largo. Este mismo concepto se aplica para los pads de la batería al otro extremo del collar, disponiendo de 10 posibles ubicaciones a lo largo de 10 centímetros.

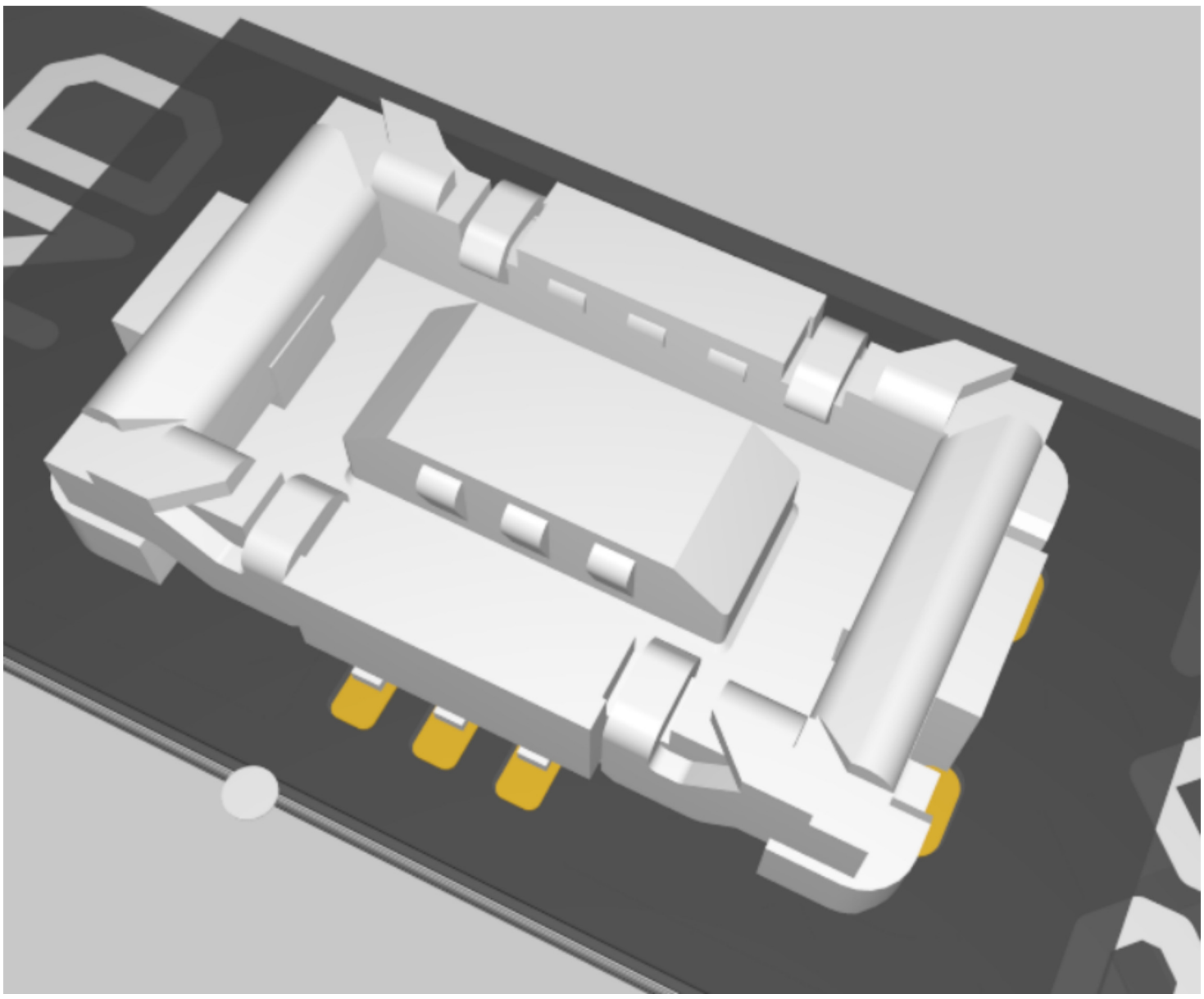


Figura 4.13: Modelo 3D del conector sobre el collar.

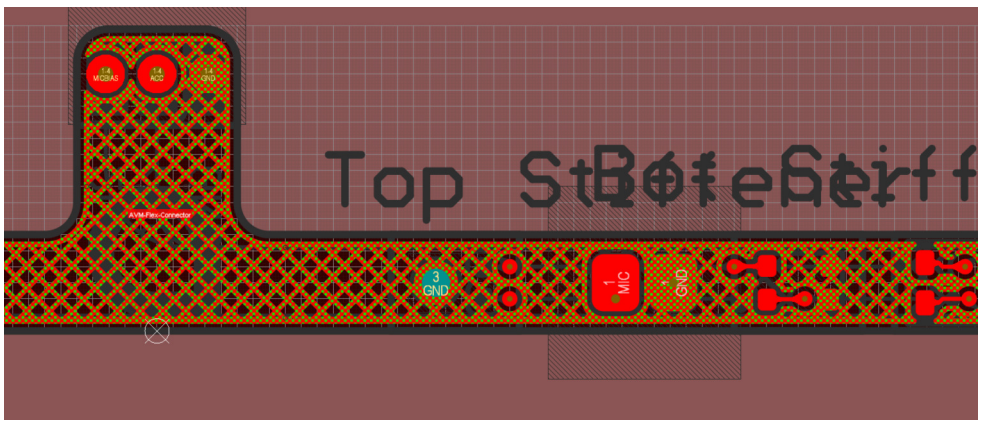
Para la sección del micrófono, se hace provecho del diseño alargado del collar flexible para colocar en el espacio disponible cuatro *footprints* de posibles micrófonos, para poder así elegir cuál de estos será usado en cada collar. Esto facilita el proceso de pruebas del prototipo y permite el intercambio de micrófonos en la misma placa de ser necesario.

Los posibles micrófonos a elegir para conectar al dispositivo son los siguientes: PUI Audio AMM-2738-B-R, PUI Audio AMM-2742-T-WP-R [10], DB Unlimited MM034202-10 y un micrófono capacitivo genérico de 6 milímetros.

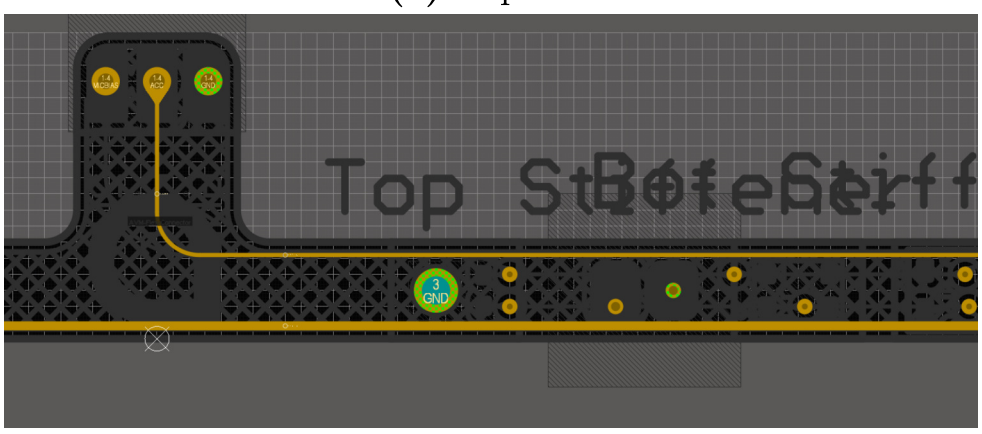
El acelerómetro usado es un Knowles bu-21771-000 [11], el mismo utilizado en la versión anterior del collar. Así la sensibilidad de éste ya es conocida y por lo tanto se tiene la máxima compatibilidad con el firmware actual del dispositivo.

Uno de los principales preocupaciones es evitar la introducción de ruido electromagnético en

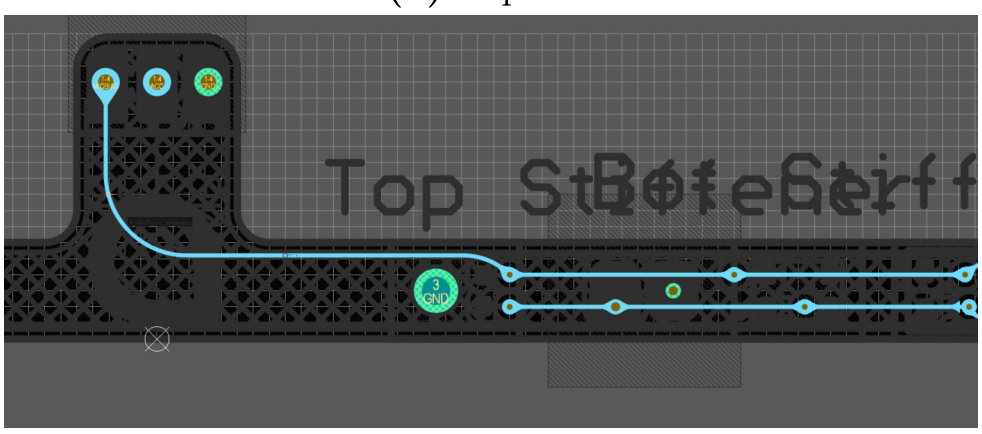
las pistas que llevan las señales análogas del micrófono y el acelerómetro. En la versión actual esto se logra con el uso de cables blindados eléctricamente, lo que aumenta su tamaño, peso y precio. Considerando que el circuito flexible del collar tiene cuatro capas disponibles para circuitos, se pueden usar la capa superior e inferior como planos de tierra, protegiendo así las capas internas del ruido electromagnético del exterior. Para mantener la flexibilidad, se opta por usar un diseño enmallado en lugar de un plano sólido, y para mayor resistencia estructural se coloca la malla en diagonal a la dirección en que se dobla el collar. En la figura 4.14 se aprecia esta malla en las capas 1 y 4.



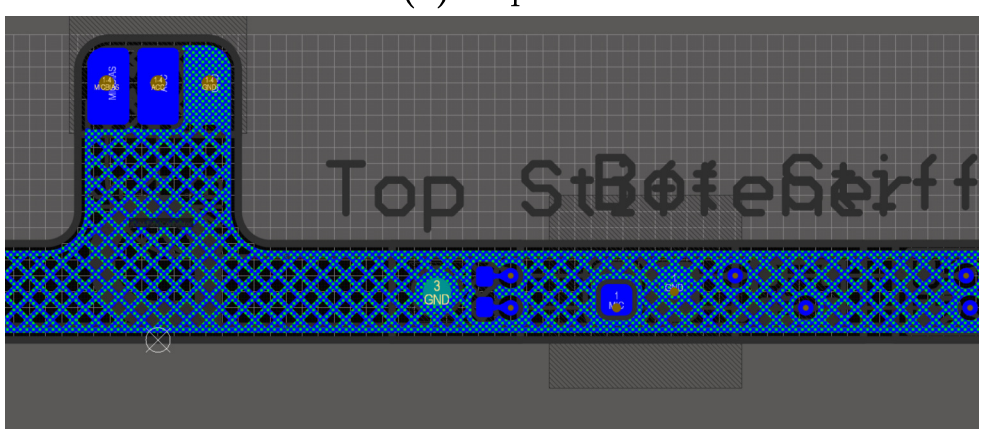
(a) Capa 1.



(b) Capa 2.



(c) Capa 3.



(d) Capa 4.

Figura 4.14: Capas del collar flexible.

4.2. Pruebas de poder del dispositivo

Una vez fabricado y montado el dispositivo, se mide con el uso de un multímetro el voltaje en las pistas de poder, comprobando que todos los componentes están conectados de forma correcta y que reciben los voltajes de alimentación correspondientes. Para esto se usa como guía el diagrama de flujo de potencia del dispositivo mostrado en la figura 4.15, en el que se aprecia la conexión de líneas de alimentación entre componentes y su respectivo voltaje de funcionamiento.

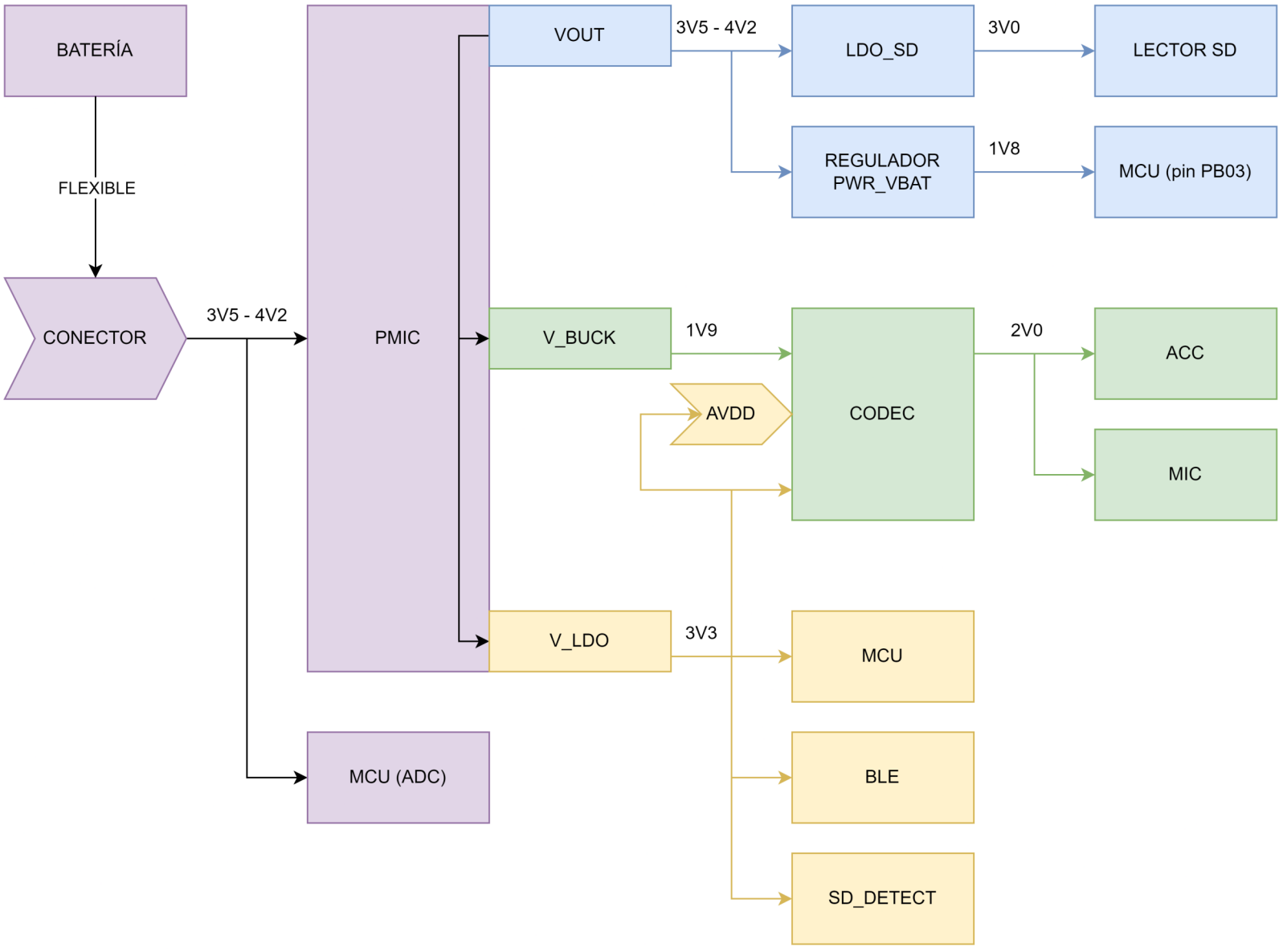


Figura 4.15: Diagrama de flujo de poder del dispositivo.

4.3. Pruebas de funcionamiento del dispositivo

Tras comprobar que el dispositivo está correctamente alimentado, se inyecta el firmware correspondiente y se comprueba que los módulos funcionan de forma correcta. Para esto se realiza una grabación de audio de 5 minutos. Se inspecciona el archivo guardado para confirmar que

los metadatos y las señales guardadas son correctas. Con esto se confirma la comunicación entre componentes como muestra la figura 4.16, en donde se aprecia los protocolos y métodos de comunicación entre los módulos del dispositivo. Por el momento se descartan hacer pruebas del módulo BLE, probando solo las funciones básicas.

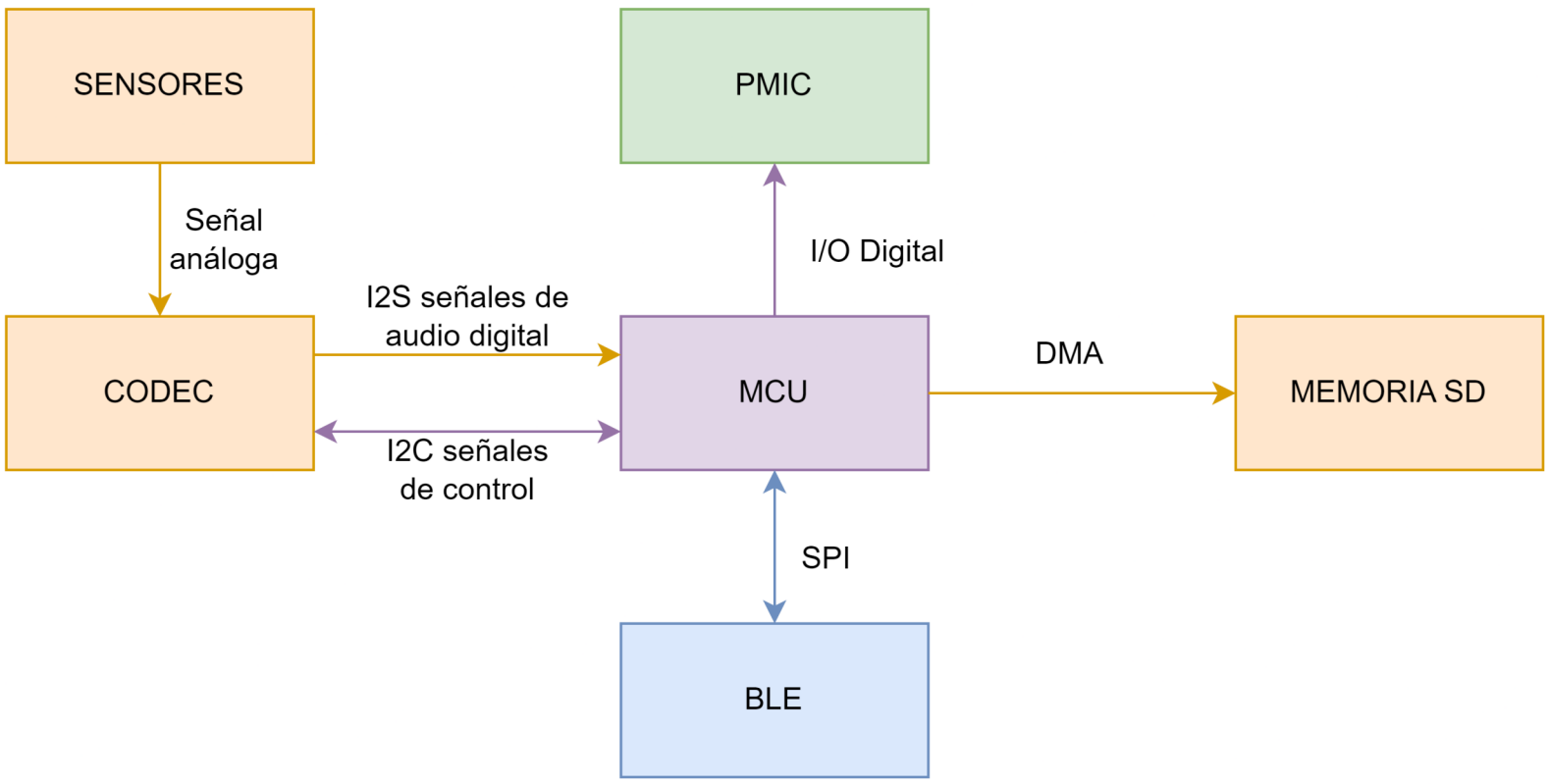


Figura 4.16: Diagrama de conexión entre componentes del dispositivo.

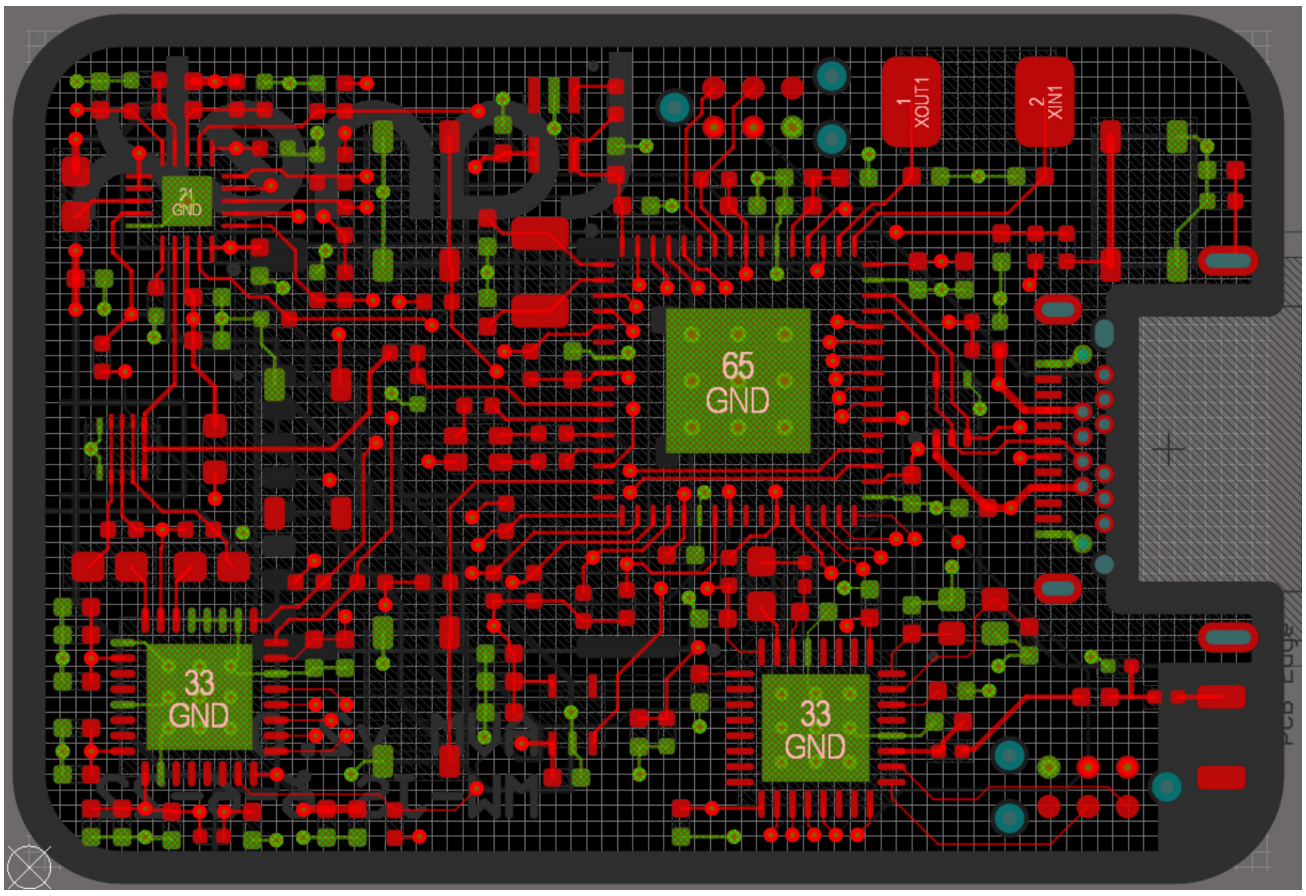
4.4. Pruebas de calidad de señal del dispositivo

Se realiza una grabación usando la versión nueva y la versión anterior del dispositivo de forma simultánea, usando como entrada a los sensores una señal sinusoidal de frecuencia constante proveniente se un parlante, en un ambiente sin ruido acústico externo. Se posicionan los sensores tal que el acelerómetro queda en contacto con la superficie del parlante. Se mide la relación señal a ruido de la frecuencia de interés en la señal grabada, usando el software *Matlab*. Se comprueba que la frecuencia medida es la correspondiente, y posteriormente se comparan los resultados entre dispositivos. Se repite este experimento para 19 frecuencias entre 80 Hz y 950 Hz.

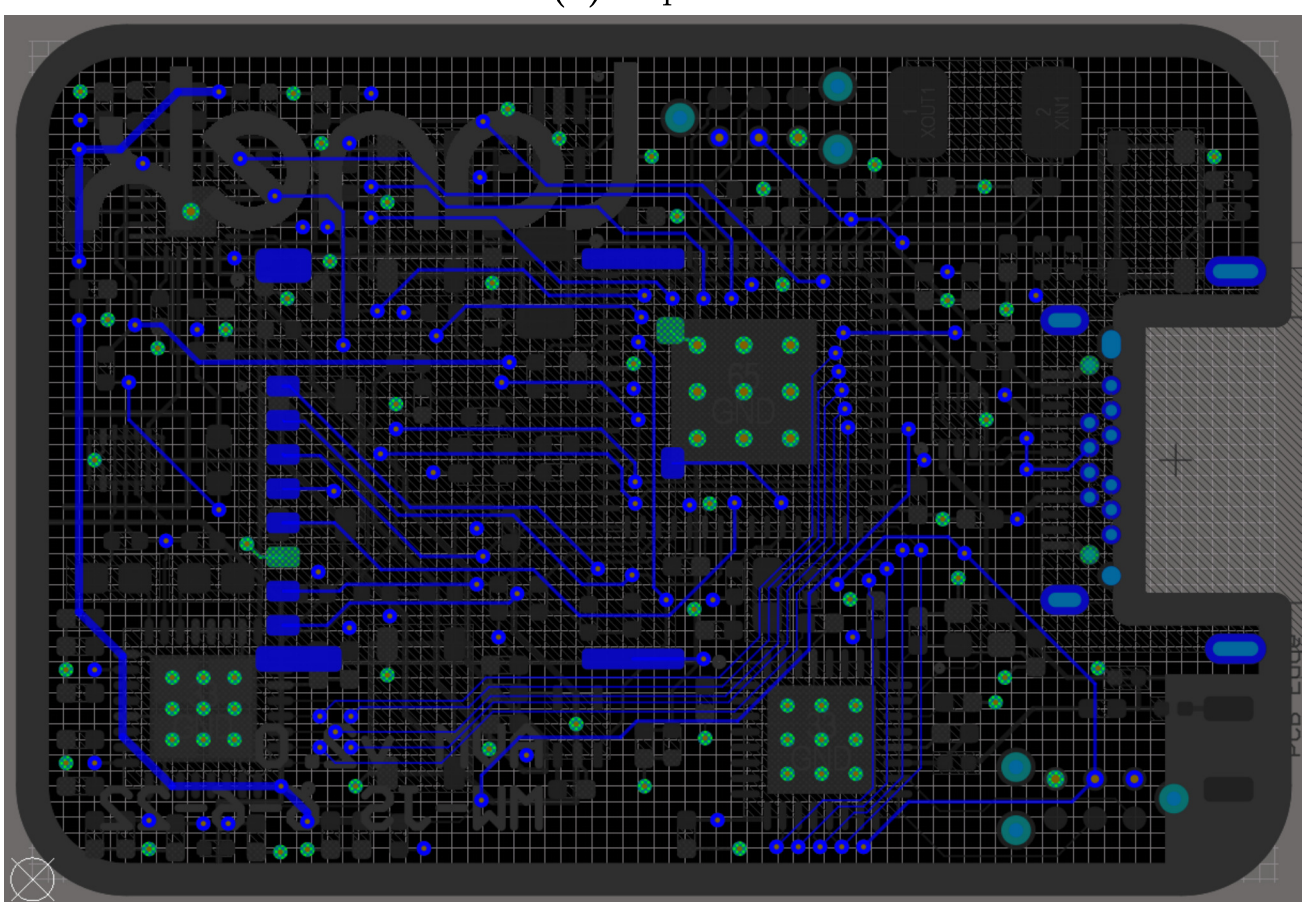
5. Resultados

5.1. Resultados de diseño

Al finalizar el proceso, se tiene un diseño de *PCB* de 4 capas, de 40 milímetros por 27 milímetros, mostrado en las figuras 5.17 y 5.18. Por preferencias de diseño, se agrupa la mayor parte de las componentes en la capa superior, dejando solo el lector microSD en la capa inferior. Las capas internas se utilizan como plano de tierra (capa 2) y plano de poder (capa 3). El software *Altium Designer* permite ver un renderizado 3D de la placa finalizada, el cual se muestra en la figura 5.19.

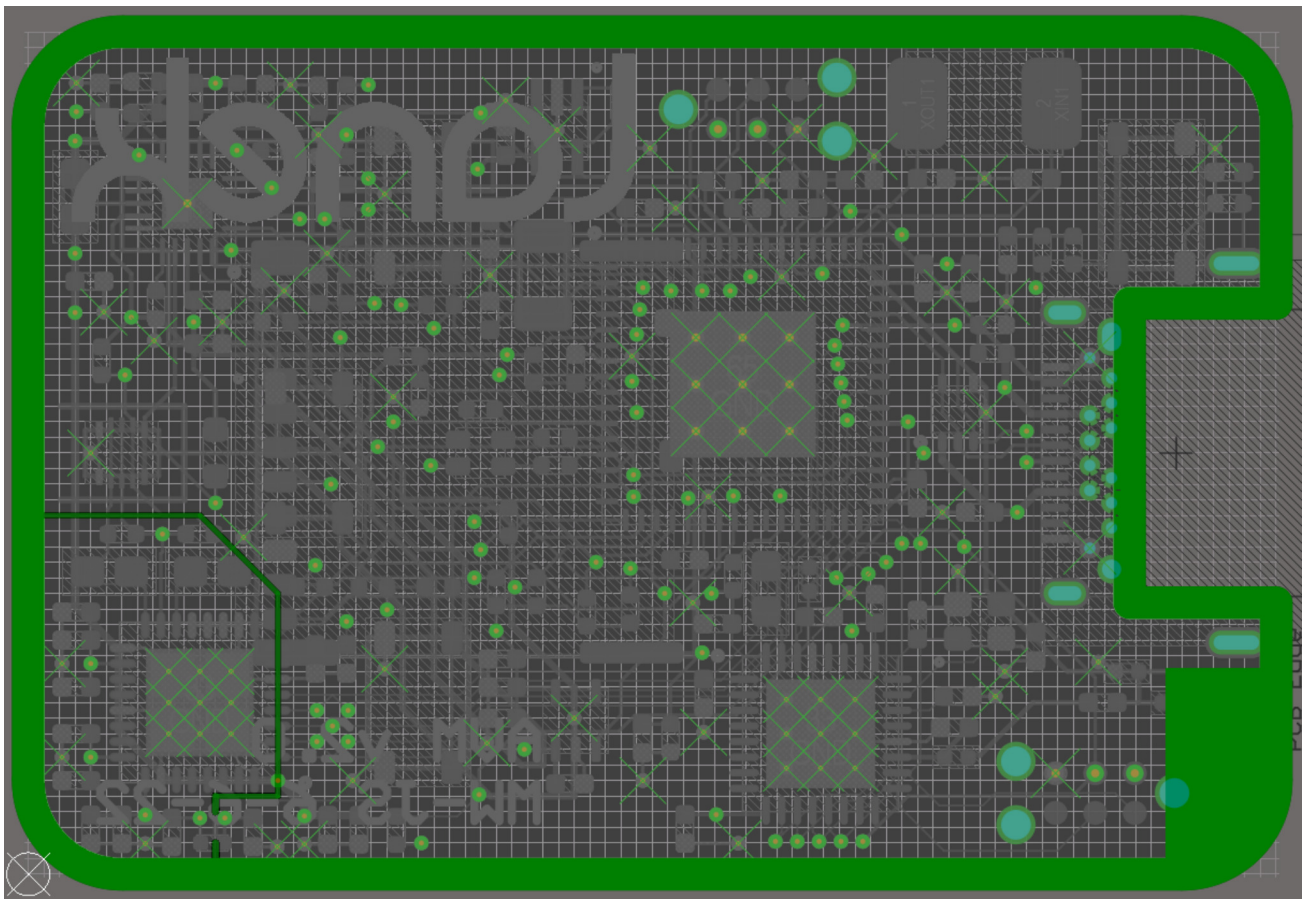


(a) Capa 1.

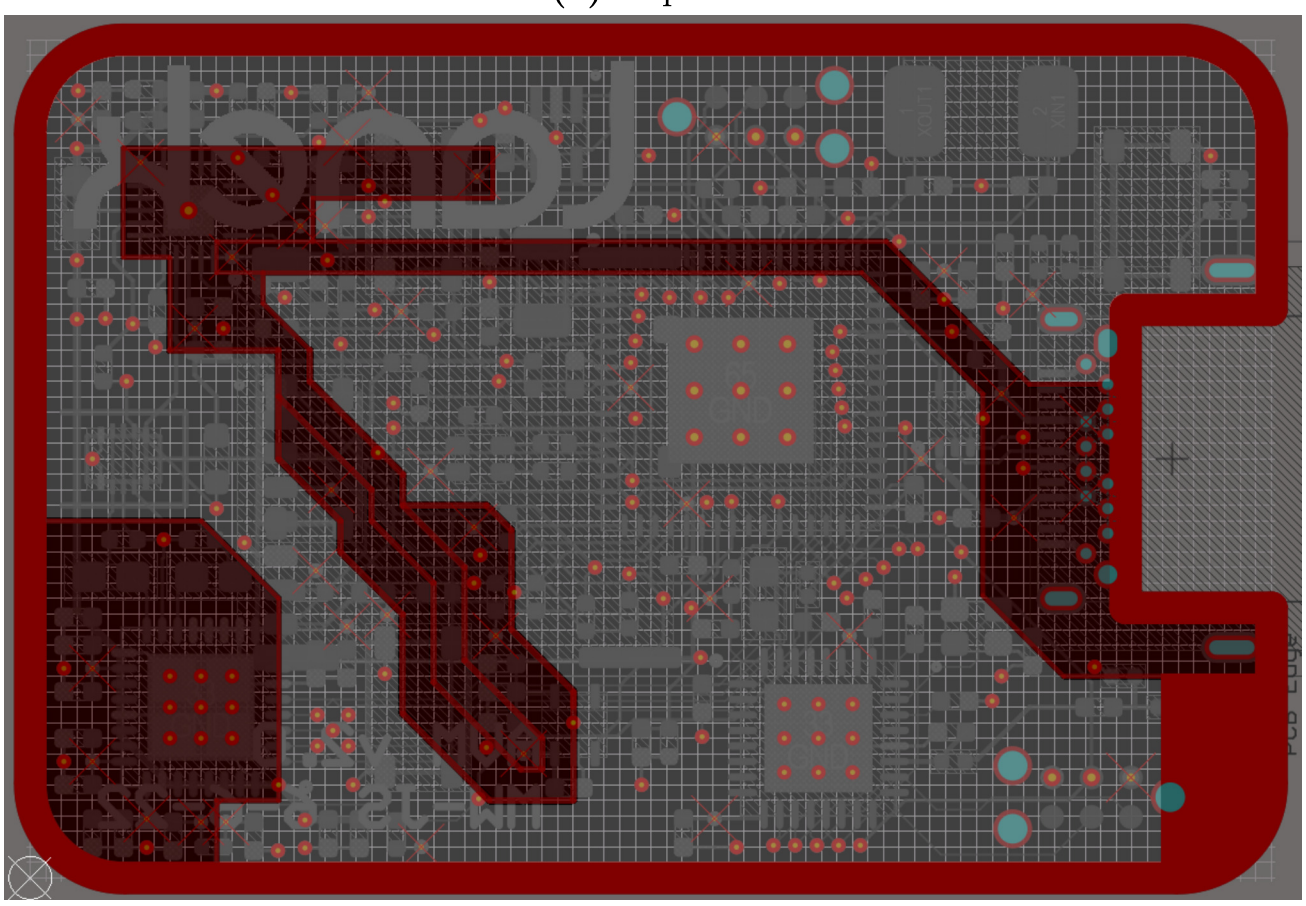


(b) Capa 4.

Figura 5.17: Capas externas del nuevo diseño para el dispositivo *AVM*.

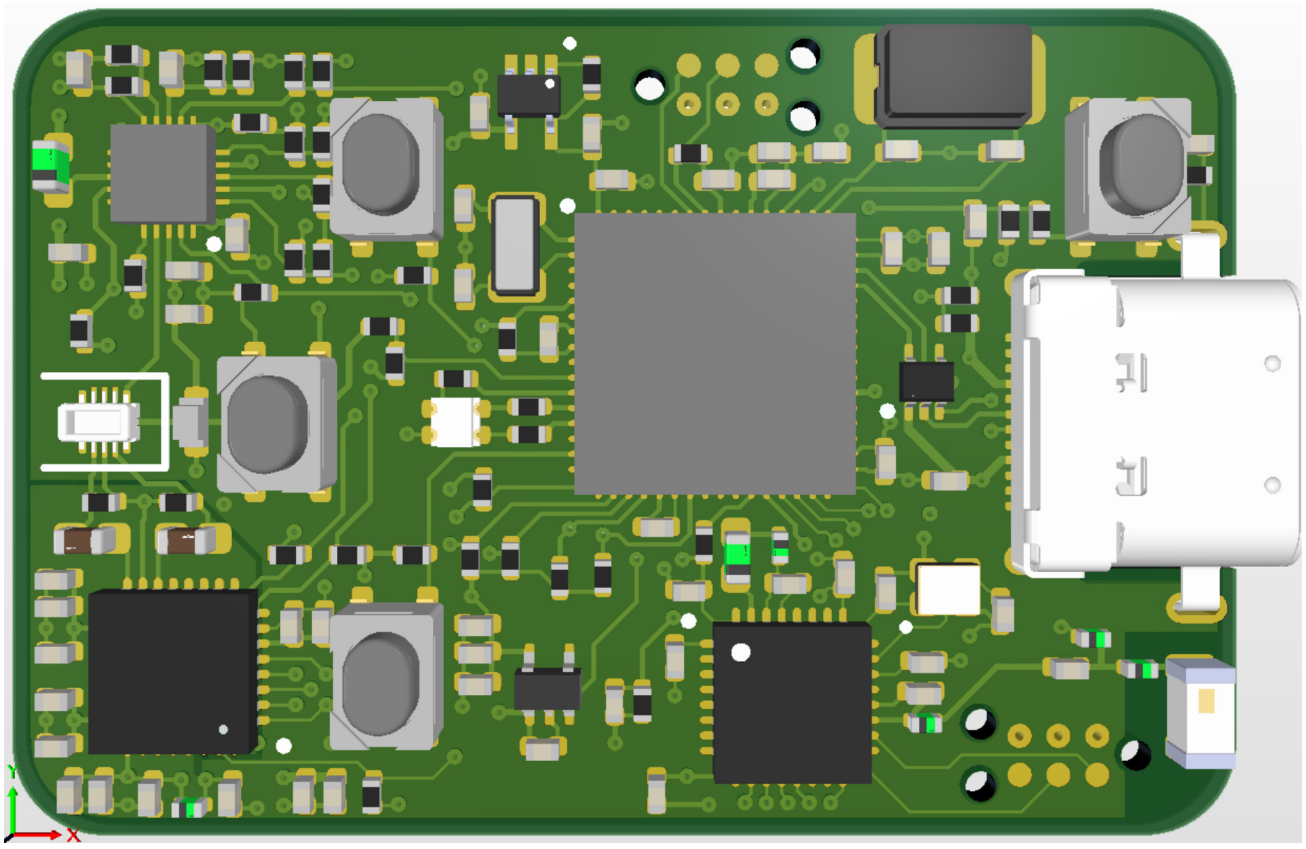


(a) Capa 2.

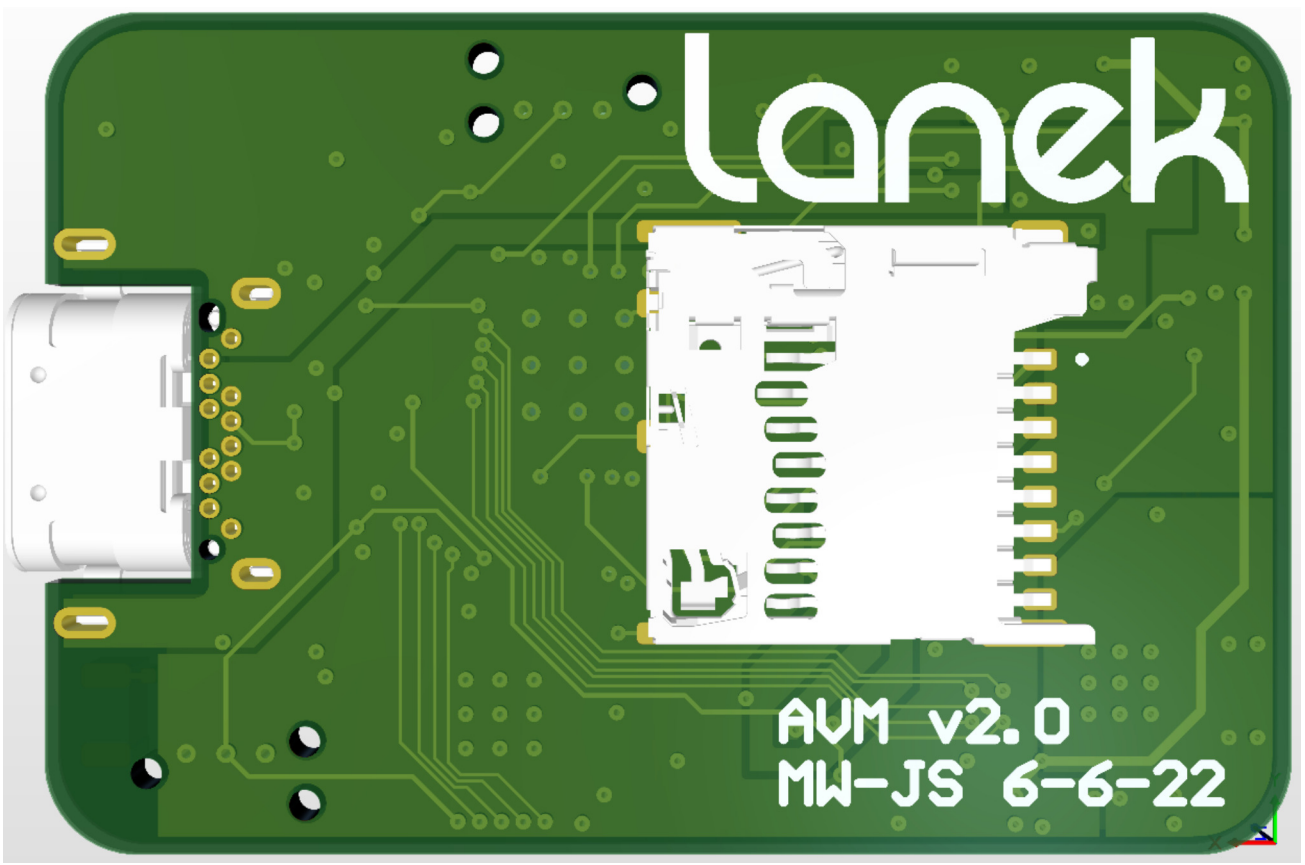


(b) Capa 3.

Figura 5.18: Capas internas del nuevo diseño para el dispositivo *AVM*.



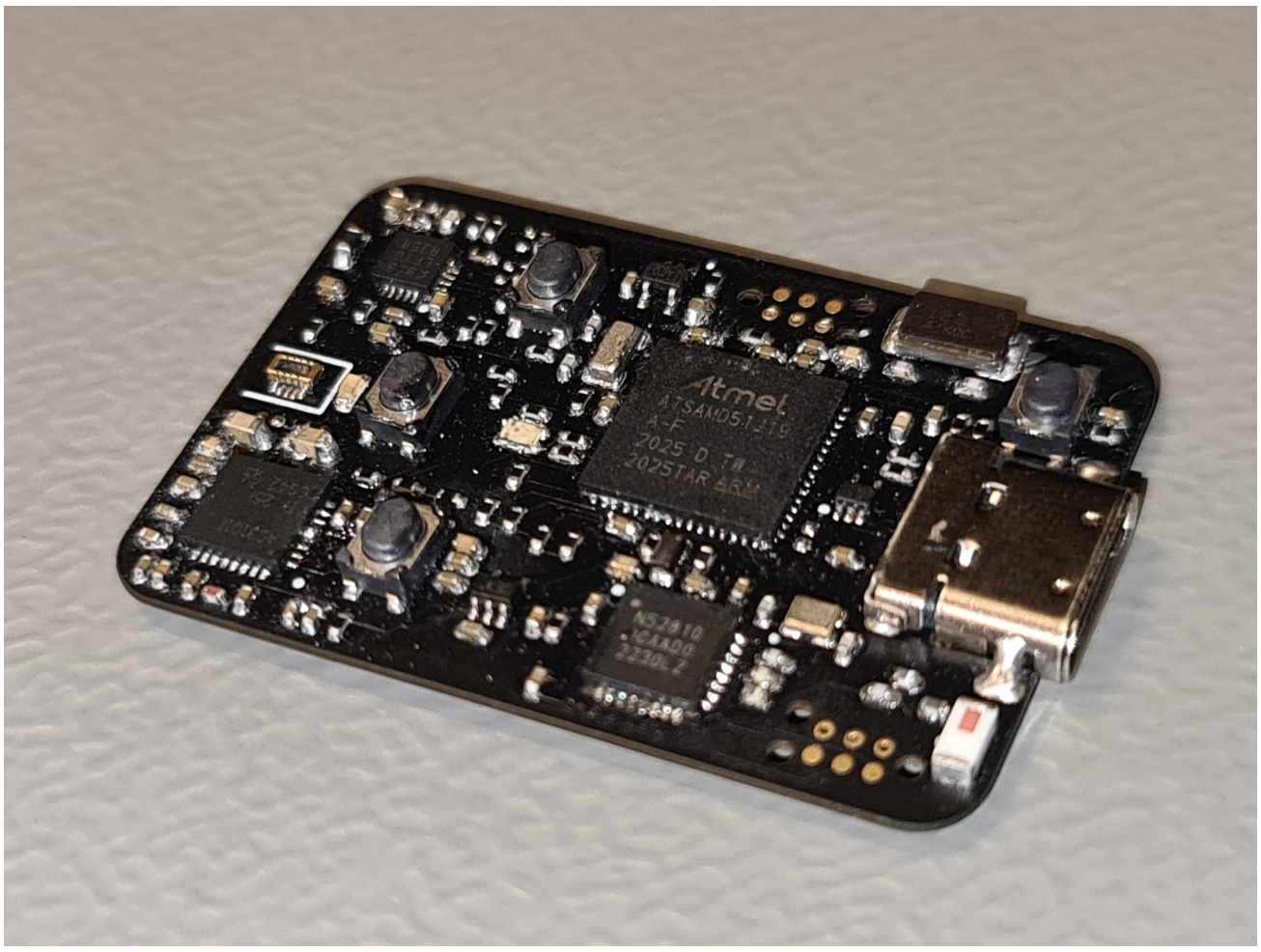
(a) Vista superior.



(b) Vista inferior.

Figura 5.19: Renderizado 3D de la *PCB*.

Una vez finalizado el diseño, es enviado para su fabricación y posteriormente las *PCB* son montadas y soldadas por el equipo de *Lanek*. El resultado se muestra en la figura 5.20.



(a) Vista superior.



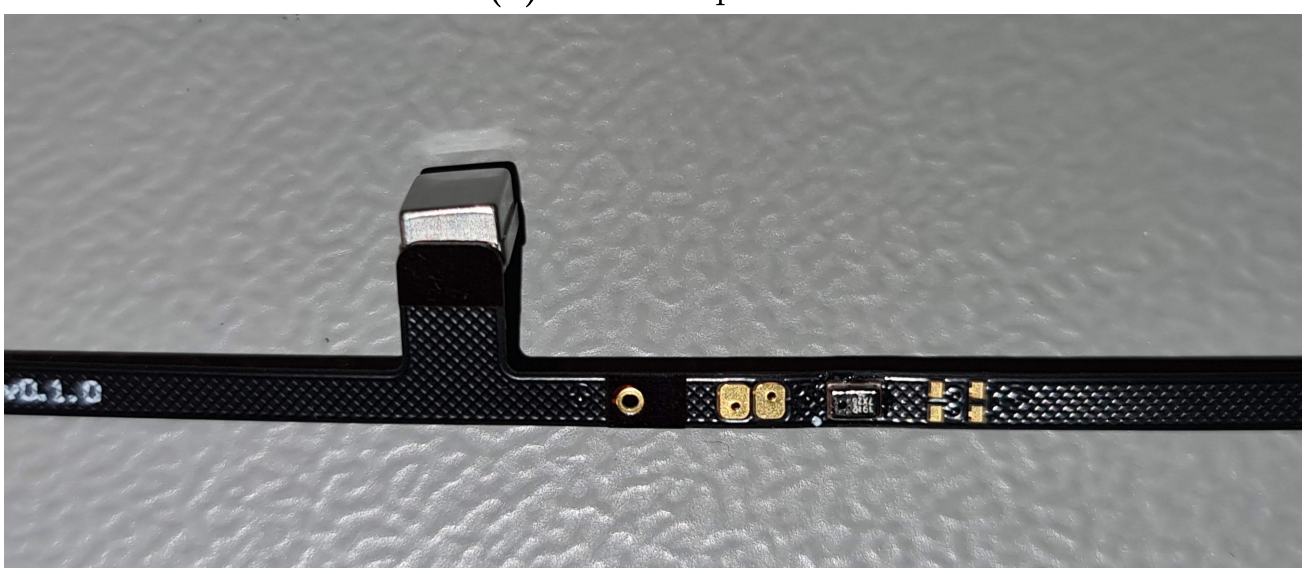
(b) Vista inferior.

Figura 5.20: *PCB* del dispositivo *AVM* V2, con componentes montados y soldados.

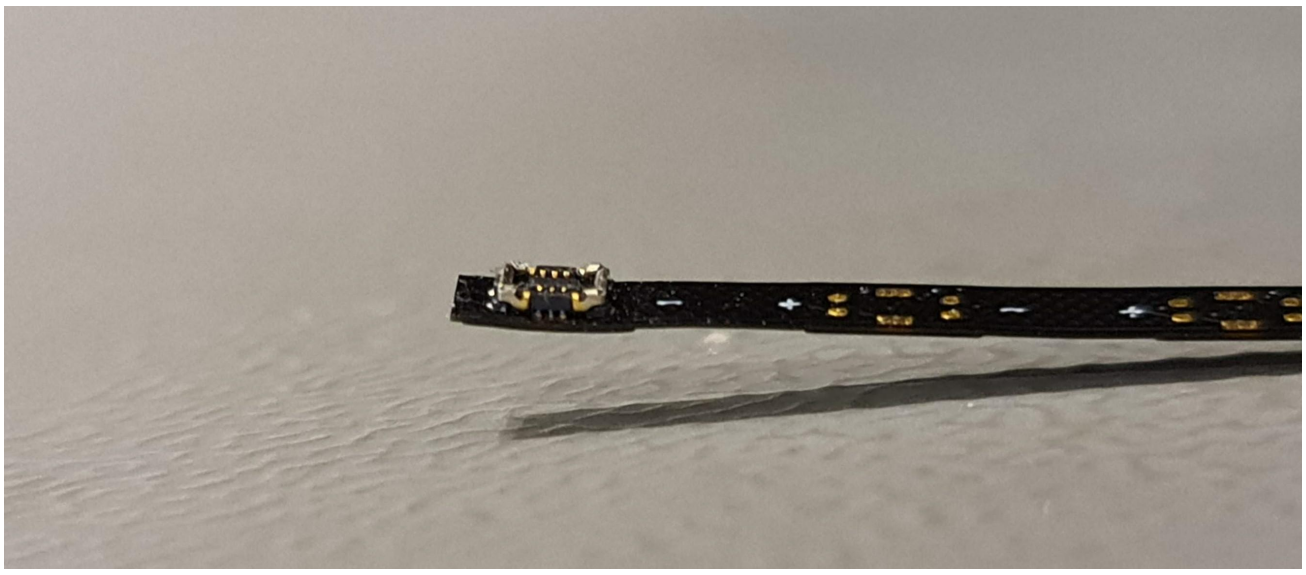
El collar flexible se confecciona de la misma manera y durante el proceso de montaje, debido al mayor stock de componentes y para evitar diferencias entre un dispositivos, se decide usar el micrófono PUI Audio AMM-2742-T-WP-R. El resultado se muestra en la figura 5.21.



(a) Vista completa.



(b) Énfasis en montaje de sensores.



(c) Énfasis en montaje de conector Board-to board.

Figura 5.21: *FPC* del collar, con los componentes montados y soldados.

5.2. Pruebas de poder

Tras medir los voltajes en cada uno de las pistas de alimentación se obtienen los resultados mostrados en la tabla 5.3.

Tabla 5.3: Voltajes esperados y medidos en las pistas de alimentación.

Punto de medición	**Voltaje esperado [V]**	**Voltaje medido [V]**
Batería	3.8	3.741
BAT PMIC	3.8	3.681
VOUT	3.8	3.672
VB LDO	3.3	3.325
VB IN	1.9	1.867
LDO SD	3.0	2.97
PWR VBAT	1.8	1.803
AVDD	3.3	3.316
MICBIAS	2.0	2.039

Se debe considerar que el voltaje LDO SD solo está activo mientras se guardan datos en la tarjeta microSD, por lo que mientras el dispositivo se encuentra grabando se activa por 320 milisegundos en intervalos de 1 segundo. Esto se muestra en la figura 5.22, obtenida midiendo el voltaje de esta línea de alimentación con un osciloscopio.

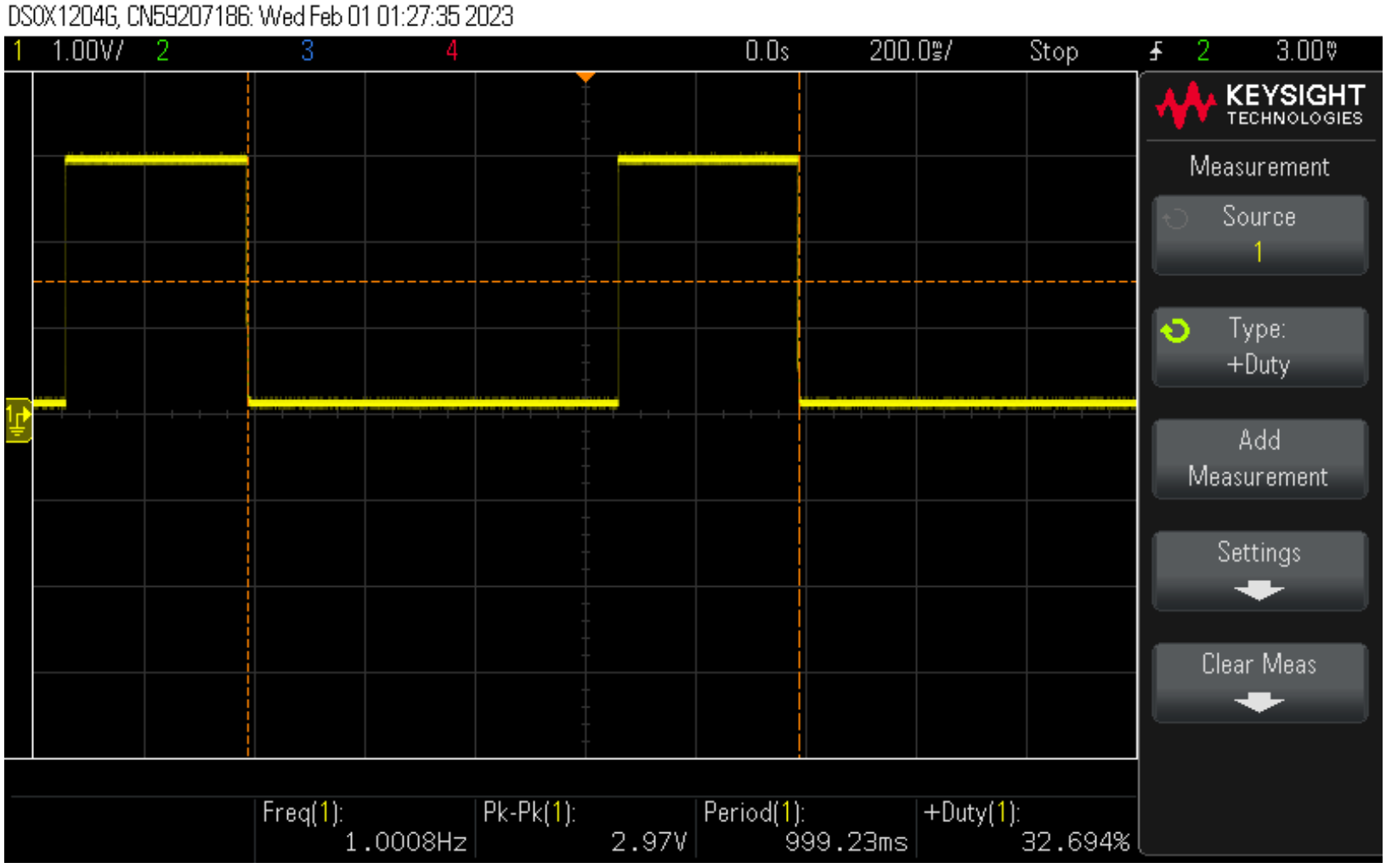


Figura 5.22: Voltaje en la pista LDO SD cuando el *AVM* está grabando.

5.3. Pruebas de funcionamiento

Tras inyectar el firmware del *AVM*, el funcionamiento del dispositivo se comprueba realizando la grabación de un archivo de audio de 5 minutos. El archivo resultante se muestra en la figura 5.23, en el que se aprecia que el nombre, duración, frecuencia de muestreo y profundidad de bits están correctamente configurados.

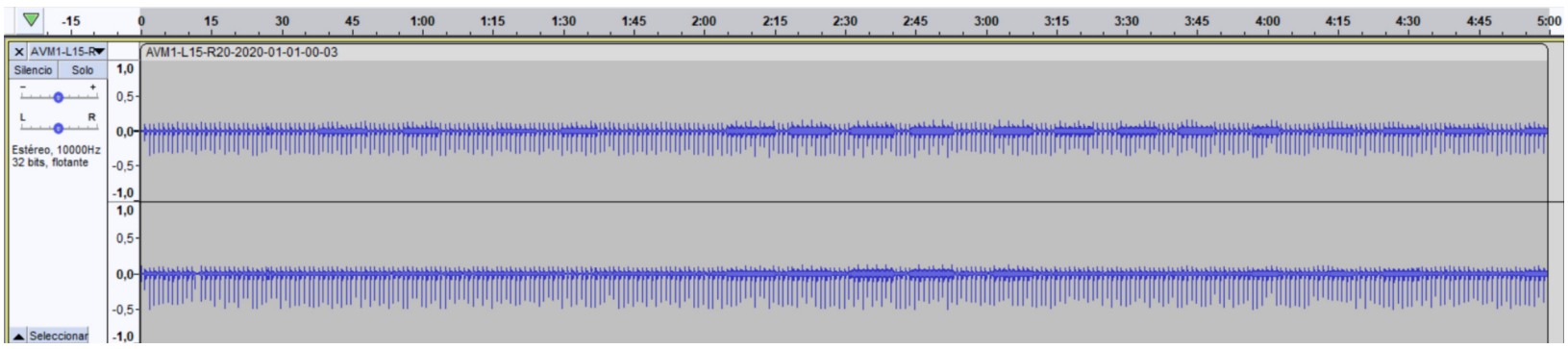
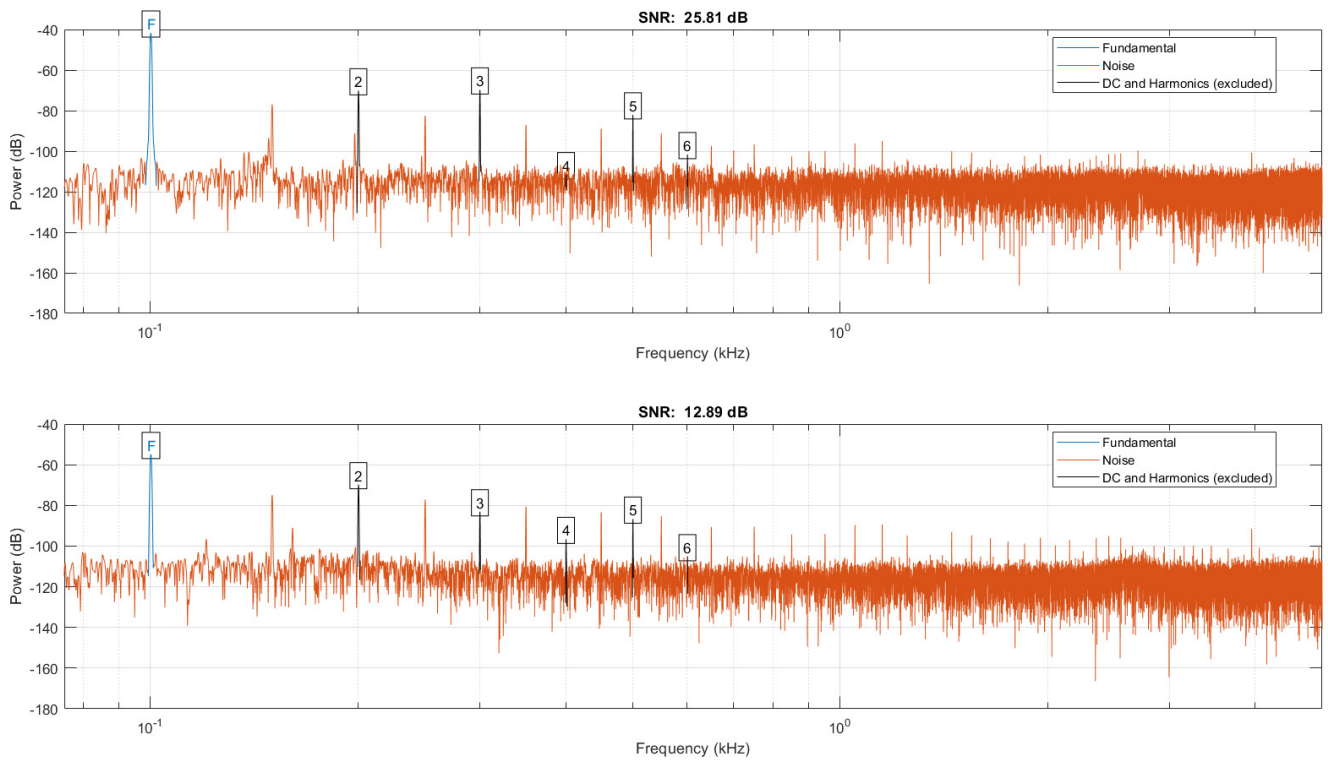


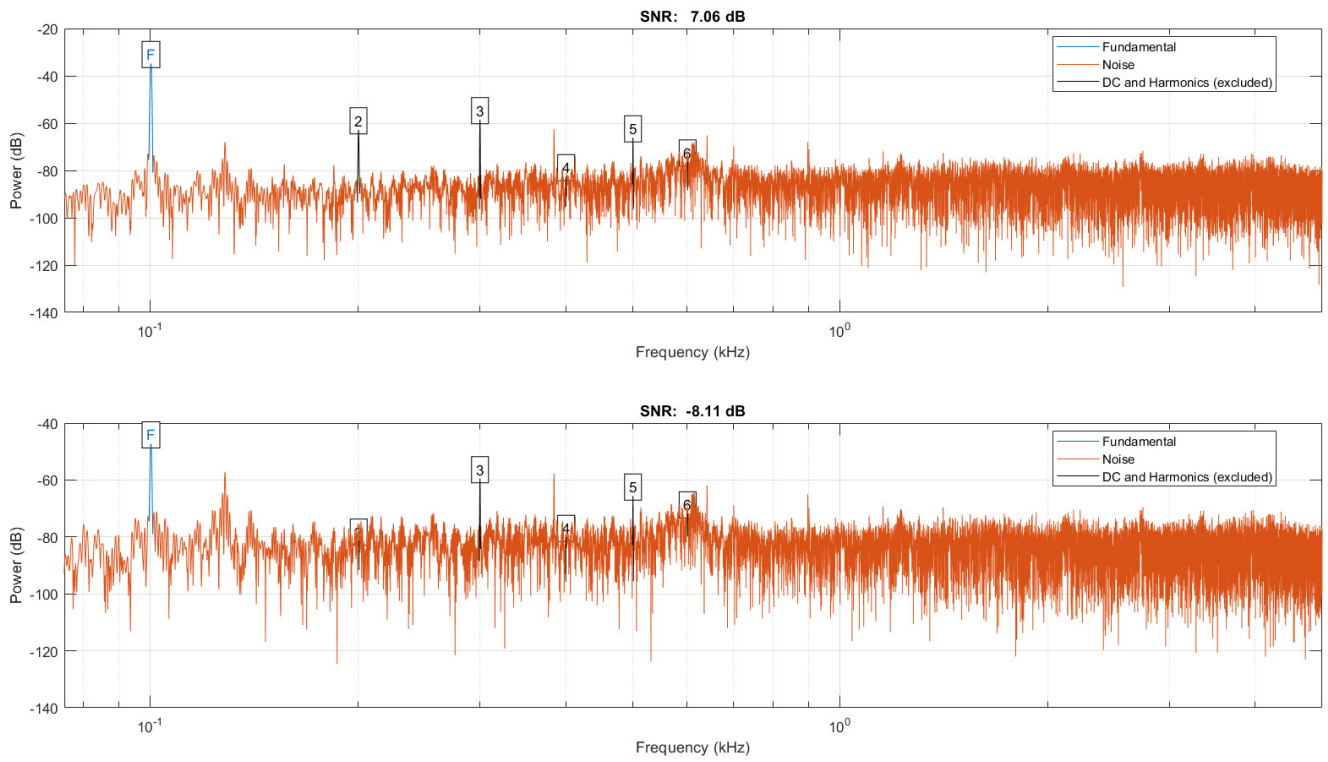
Figura 5.23: Forma de onda y metadatos de archivo de audio guardado.

5.4. Pruebas de calidad de señales

Los resultados obtenidos en las pruebas de calidad de señal se pueden ver en las figuras 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.28. La figura superior muestra los resultados de la medición del micrófono, mientras que la inferior muestra los resultados del acelerómetro. Los resultados para más frecuencias fundamentales se pueden encontrar en el anexo, sección *Resultados de pruebas de calidad de señales*. Se aprecia que la versión nueva posee un menor *SNR* que la anterior.

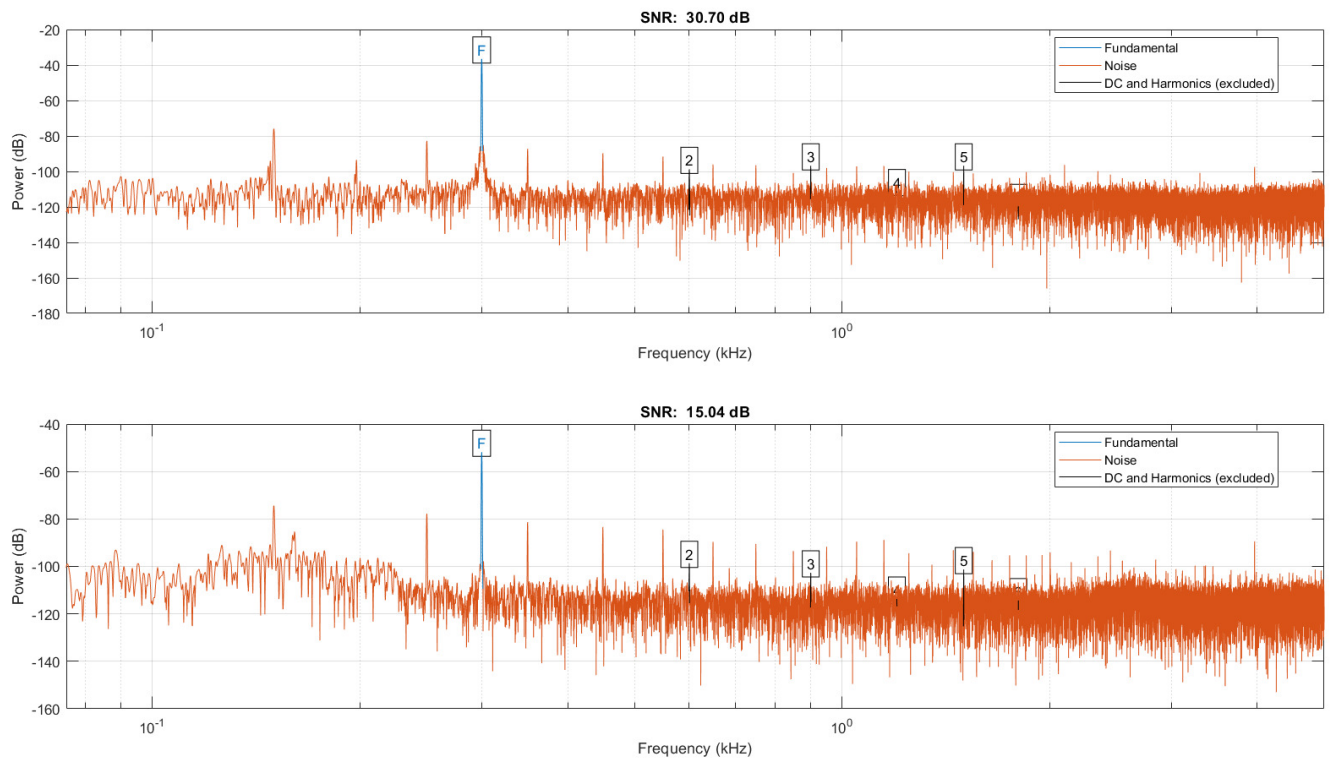


(a) Resultados en versión anterior.

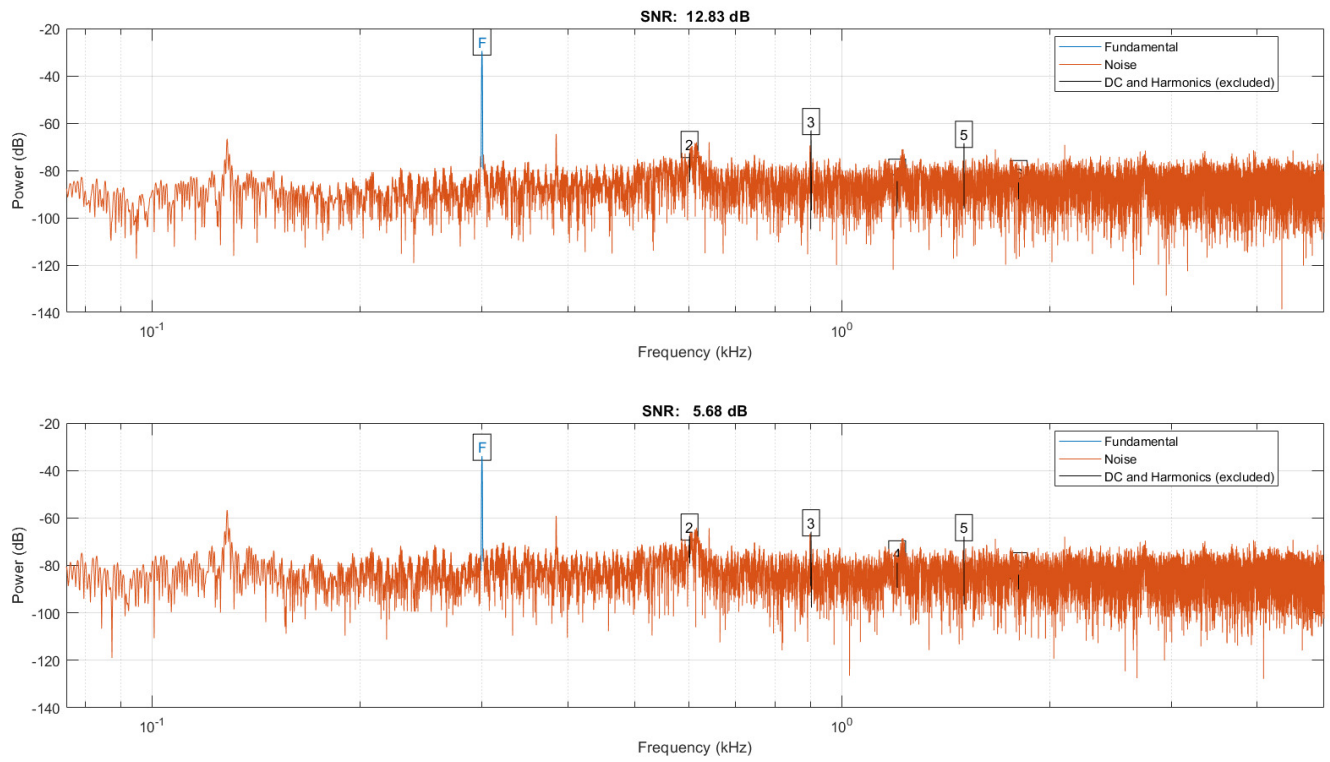


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 5.24: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 100 Hz en ambos dispositivos.

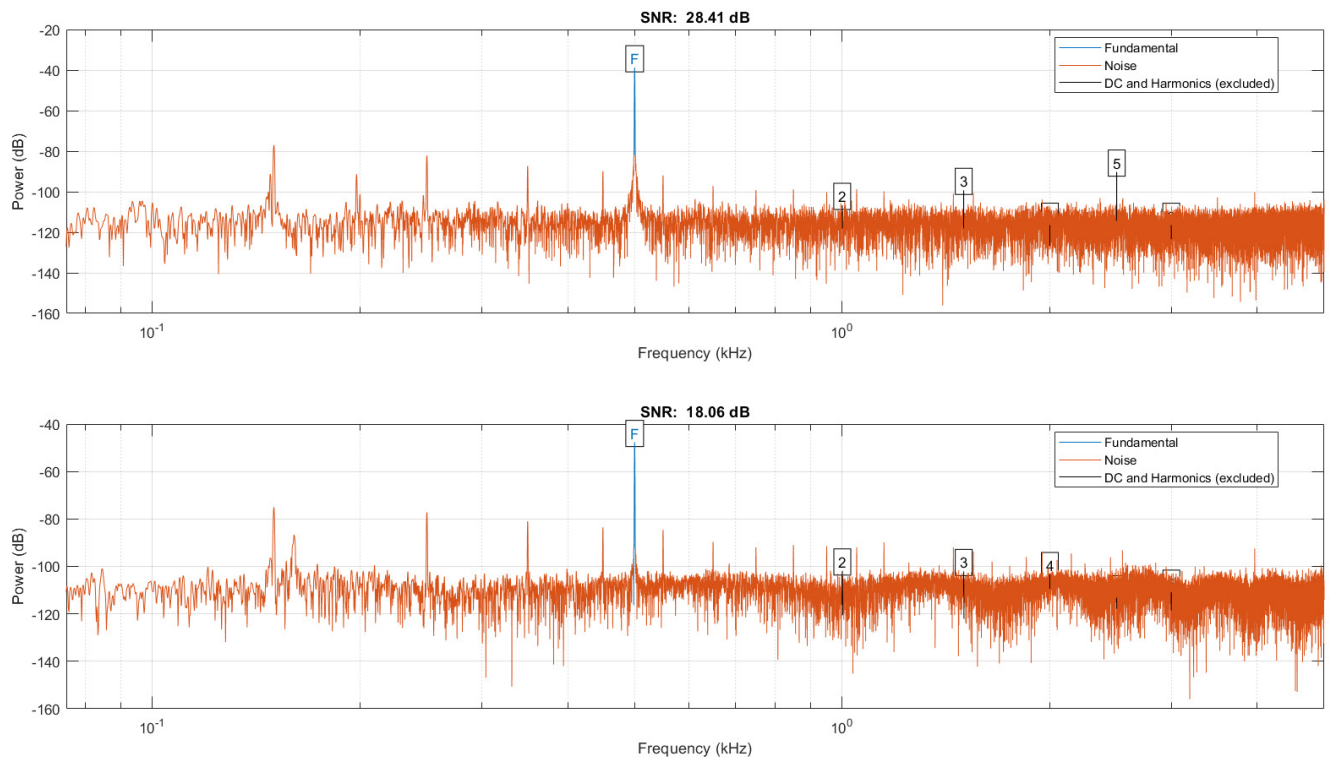


(a) Resultados en versión anterior.

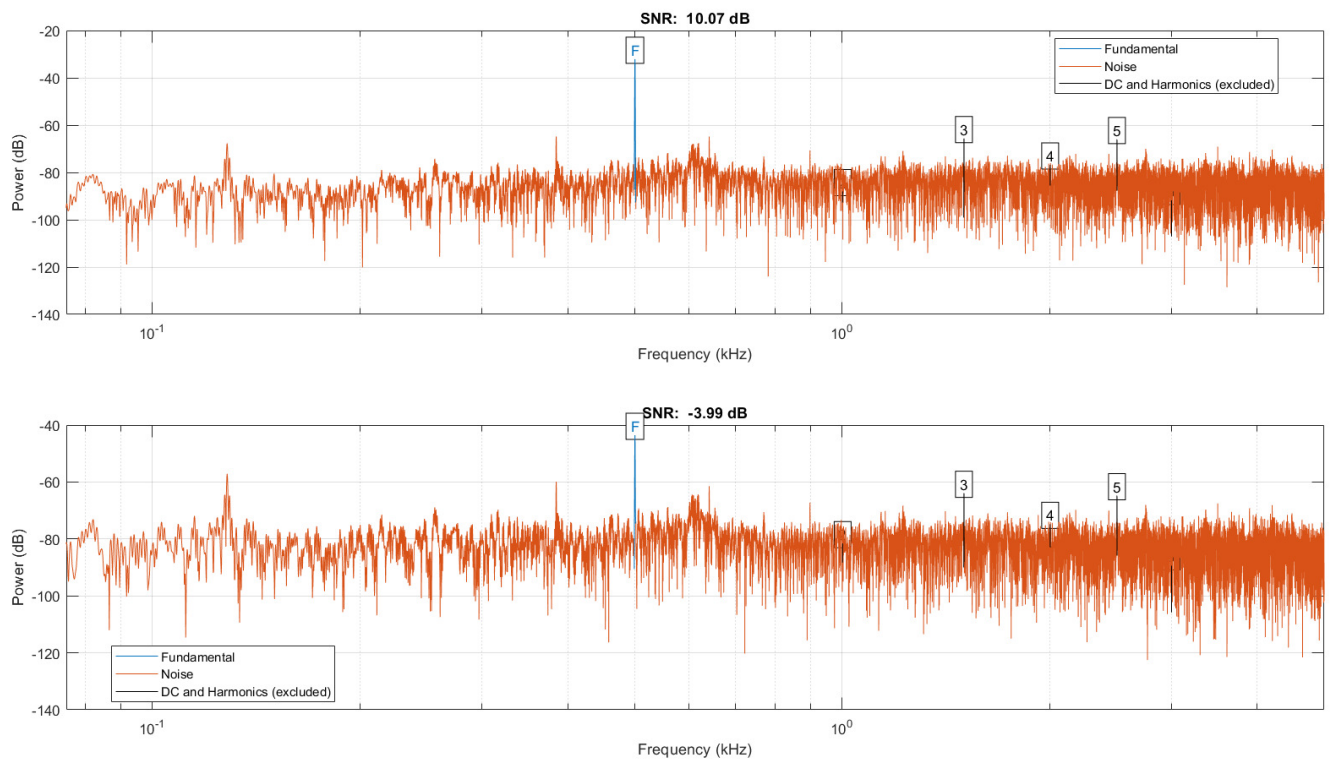


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 5.25: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 300 Hz en ambos dispositivos.

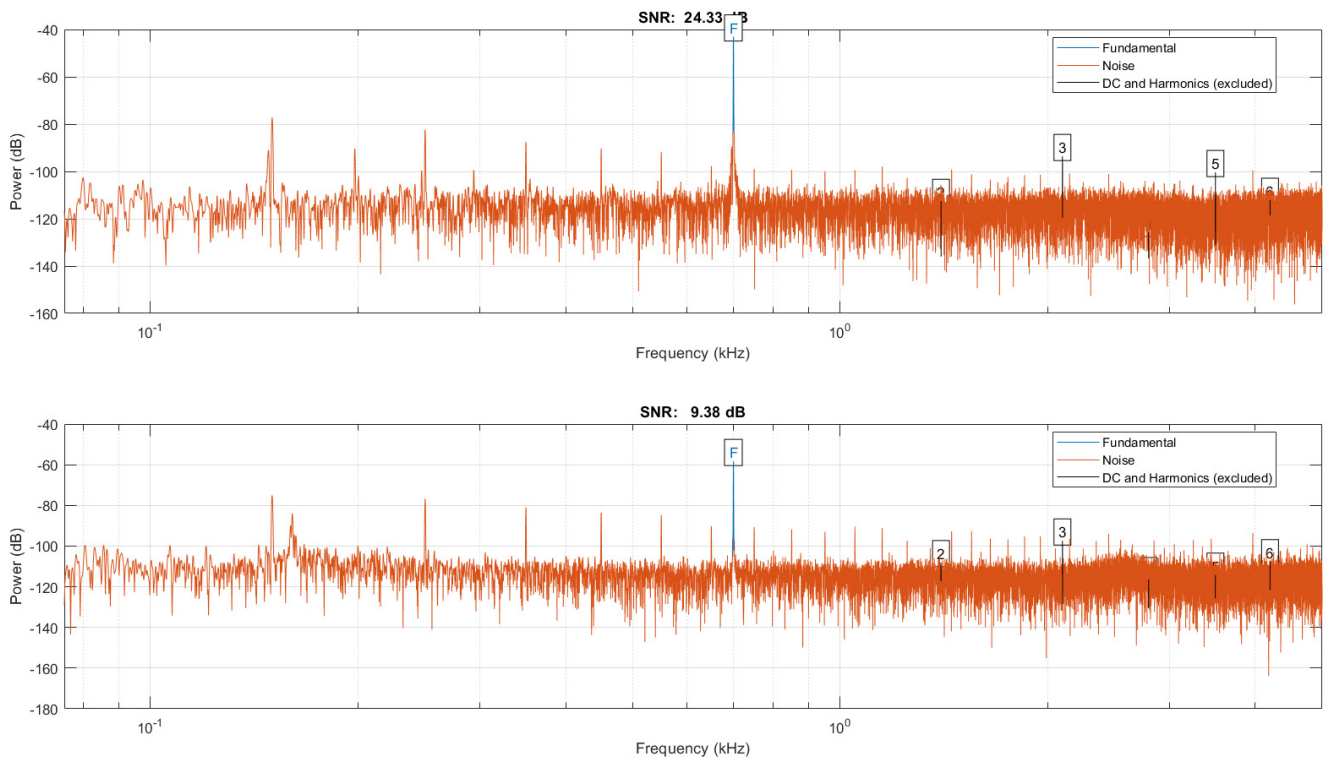


(a) Resultados en versión anterior.

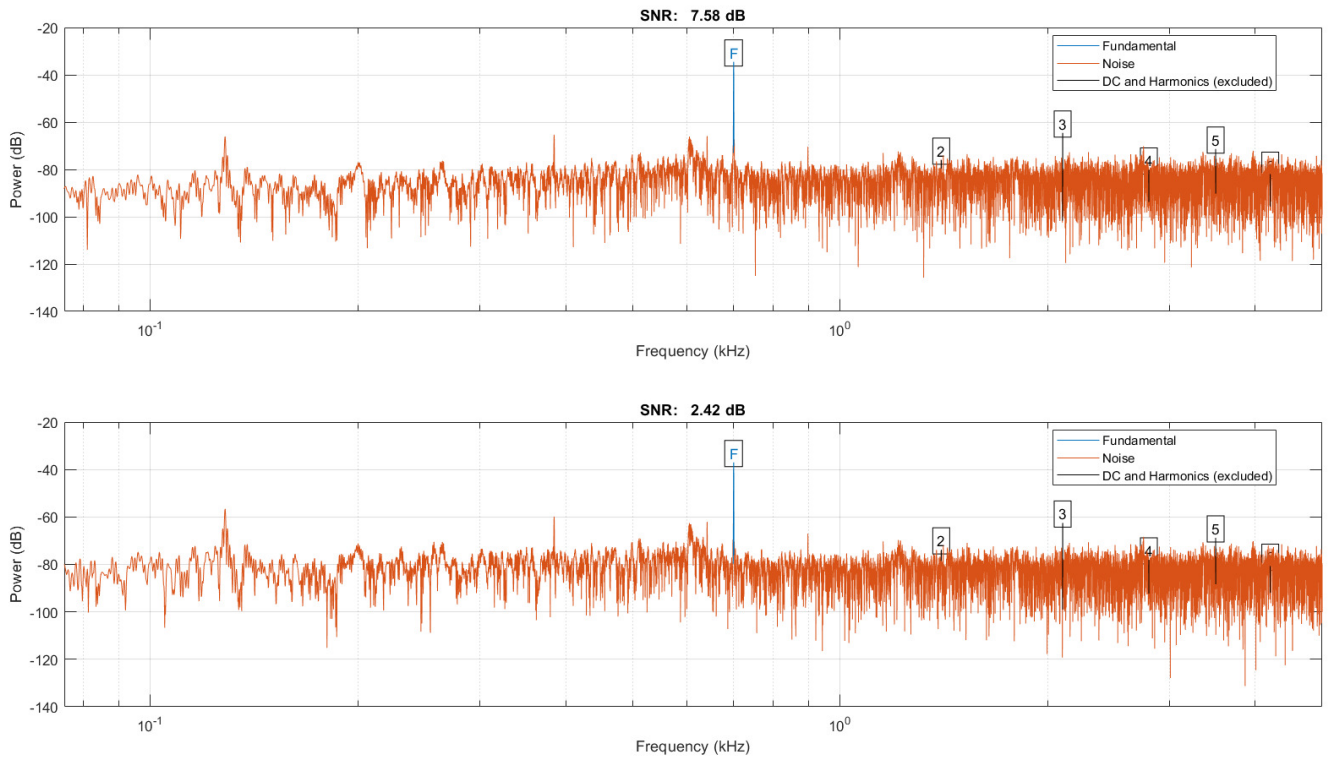


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 5.26: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 500 Hz en ambos dispositivos.

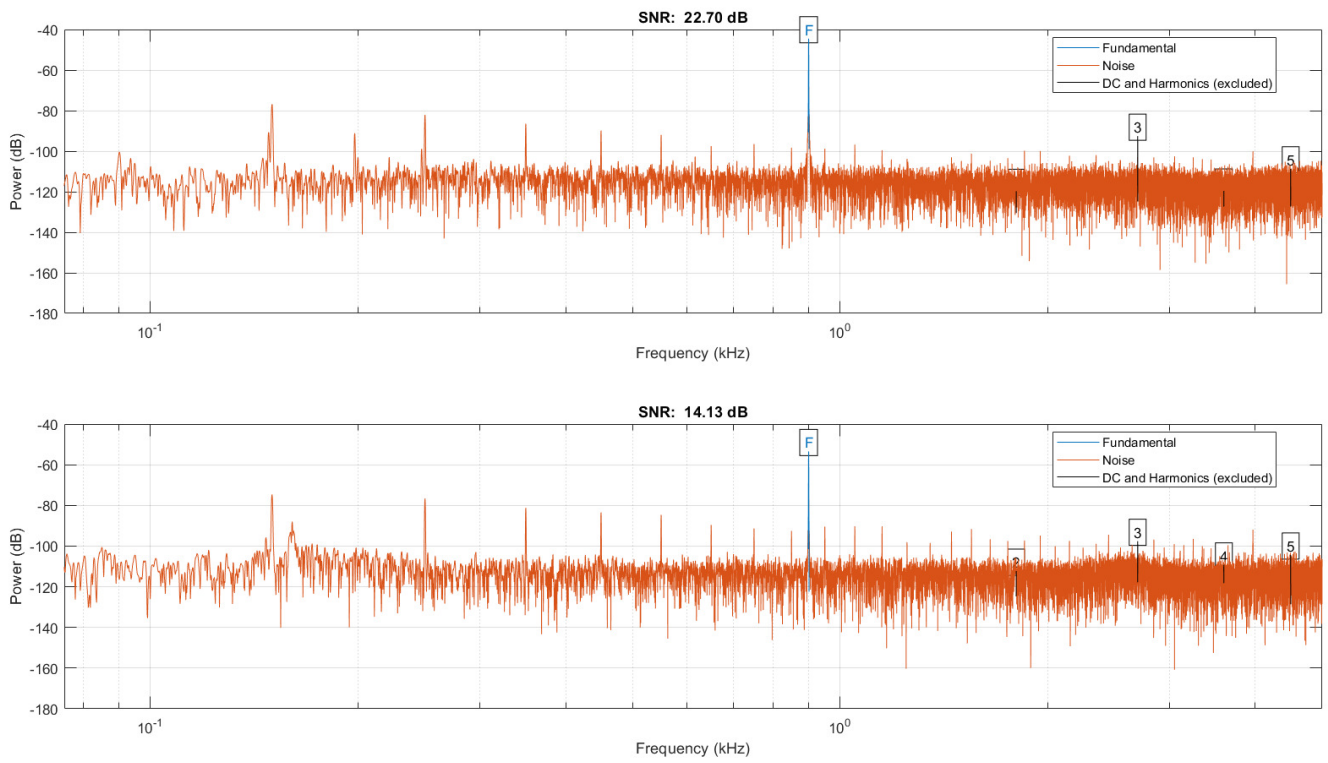


(a) Resultados en versión anterior.

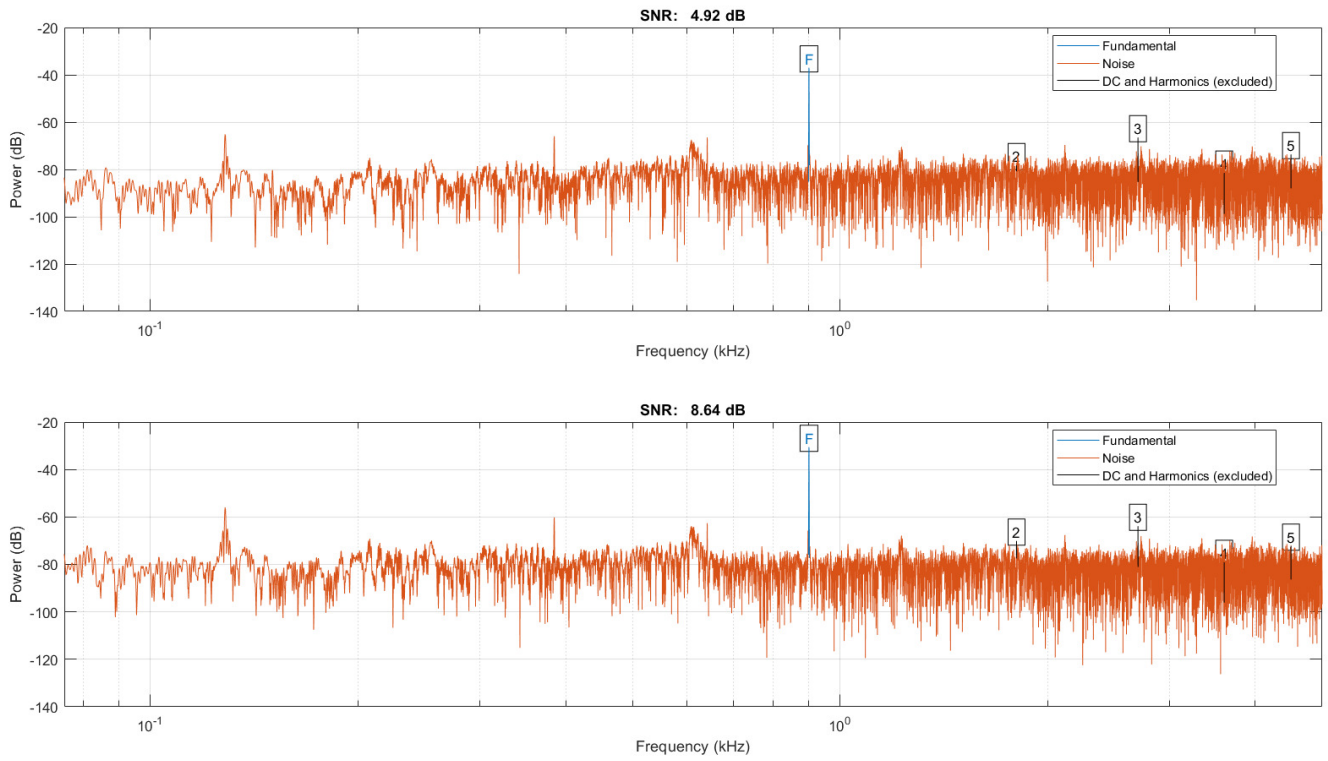


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 5.27: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 700 Hz en ambos dispositivos.



(a) Resultados en versión anterior.



(b) Resultados en versión nueva.

Figura 5.28: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 900 Hz en ambos dispositivos.

Al inspeccionar las señales temporales de audio grabadas con la versión nueva del dispositivo, como las mostradas en la figura 5.29, se observa que la mayor parte de el ruido introducido en la señal aparece en intervalos de 1 segundo, lo cual coincide con el intervalo de grabación de

datos en la tarjeta microSD, cuyo intervalo de consumo de poder se aprecia en la figura 5.22. Esto lleva a inferir que la corriente requerida desde la batería para el funcionamiento de la tarjeta microSD induce en las pistas análogas un voltaje no deseado. Para probar esta teoría se repite el experimento con el dispositivo conectado a la alimentación USB, mostrando los resultados en las figuras 5.31, 5.32, 5.33, 5.34 y 5.35. La forma de onda temporal de un extracto de esta señal de audio se encuentra en la figura 5.30, mostrando una substancial reducción del ruido, pero aún con *peaks* de voltaje cada 1 segundo.

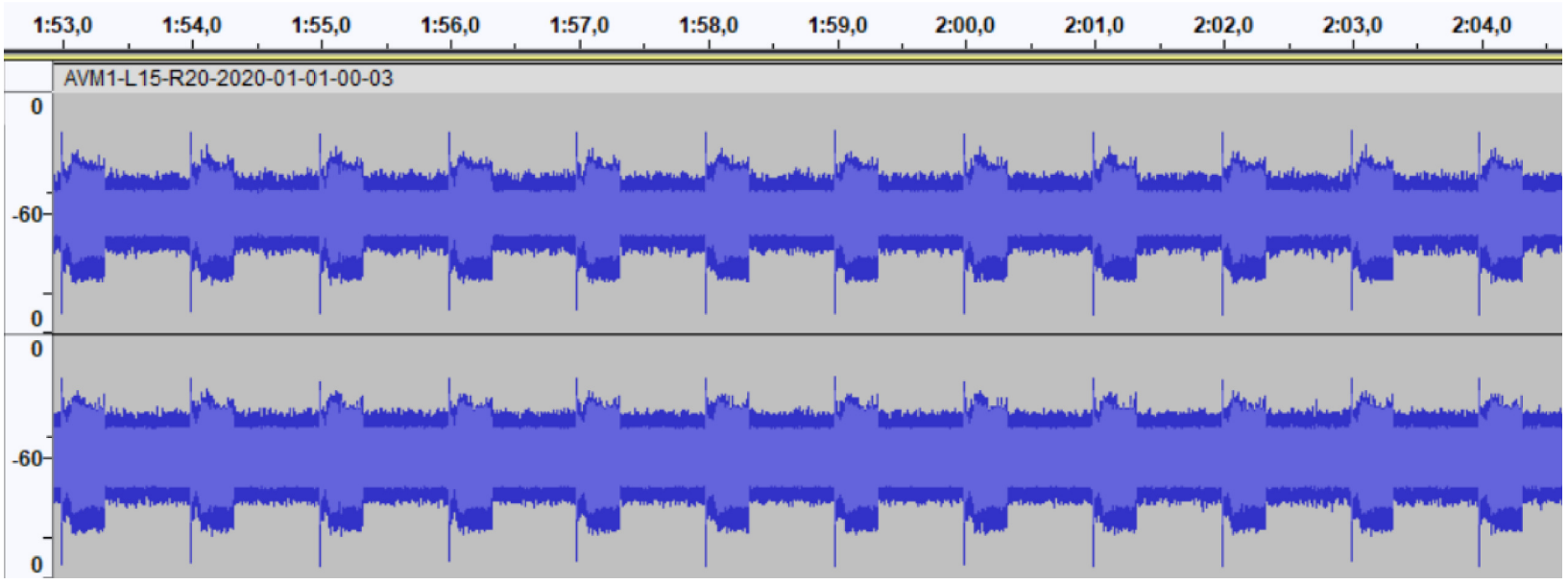


Figura 5.29: Forma de onda de extracto de señal de audio grabada con la versión nueva del dispositivo.

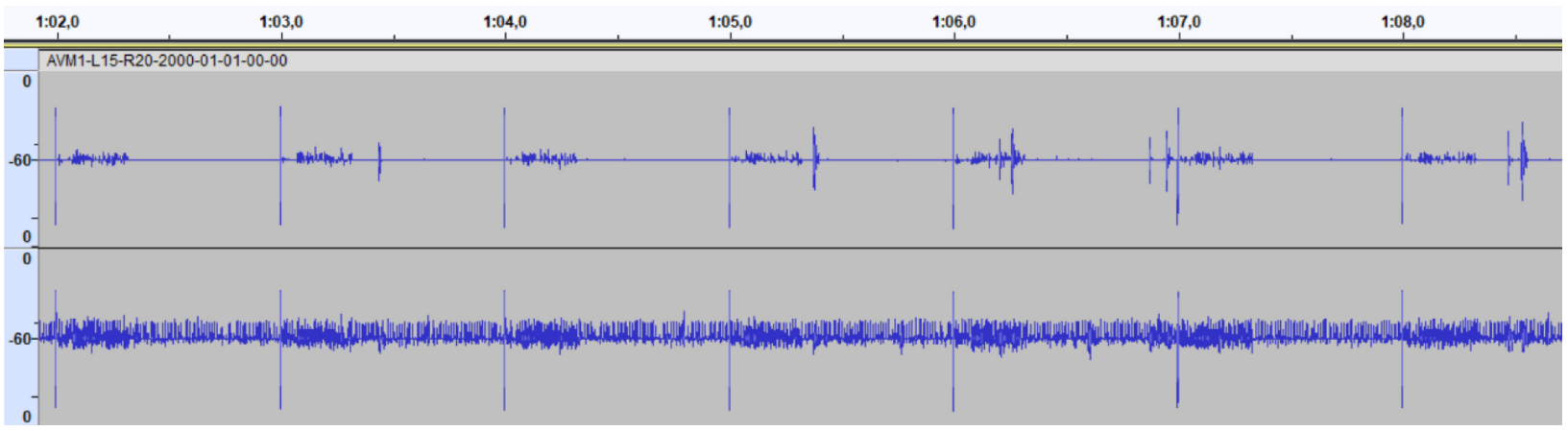
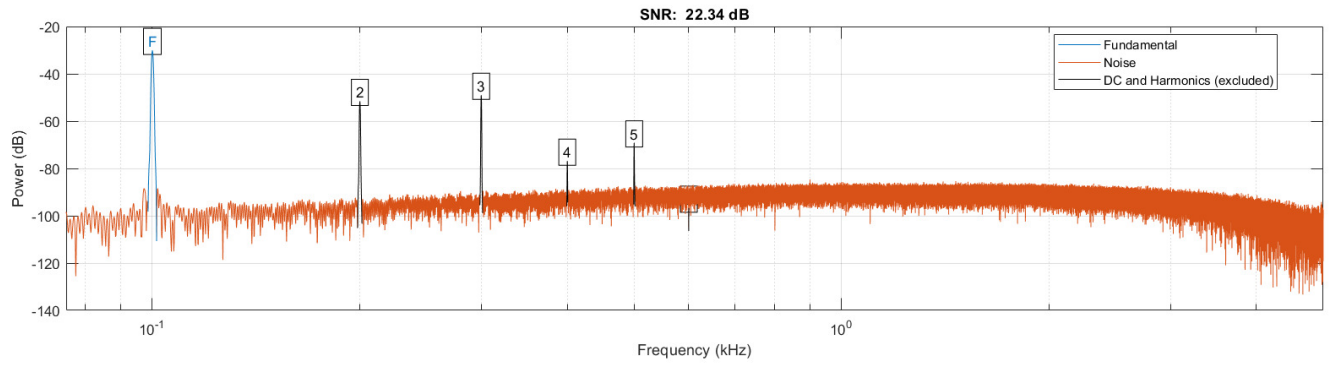


Figura 5.30: Forma de onda de extracto de señal de audio grabada con la versión nueva del dispositivo alimentado por USB.



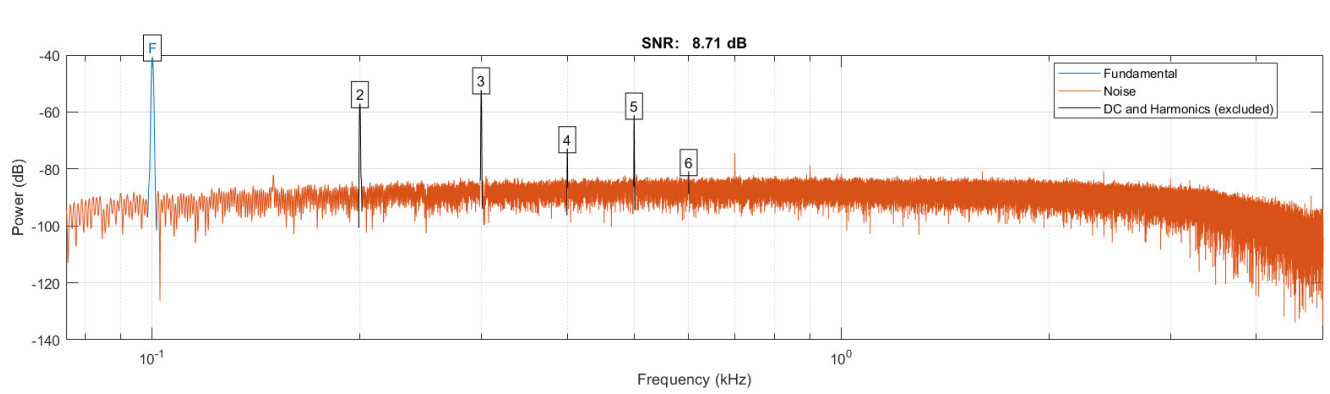
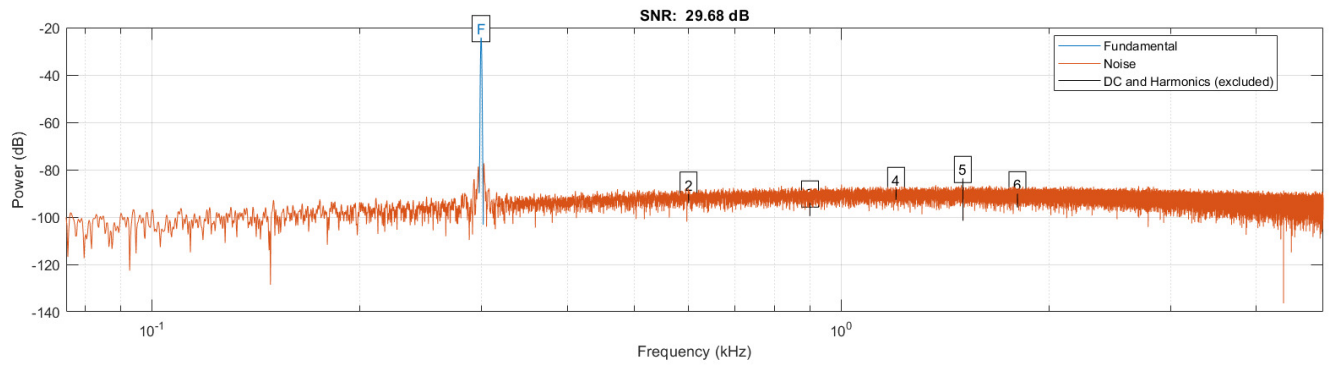


Figura 5.31: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 100 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.



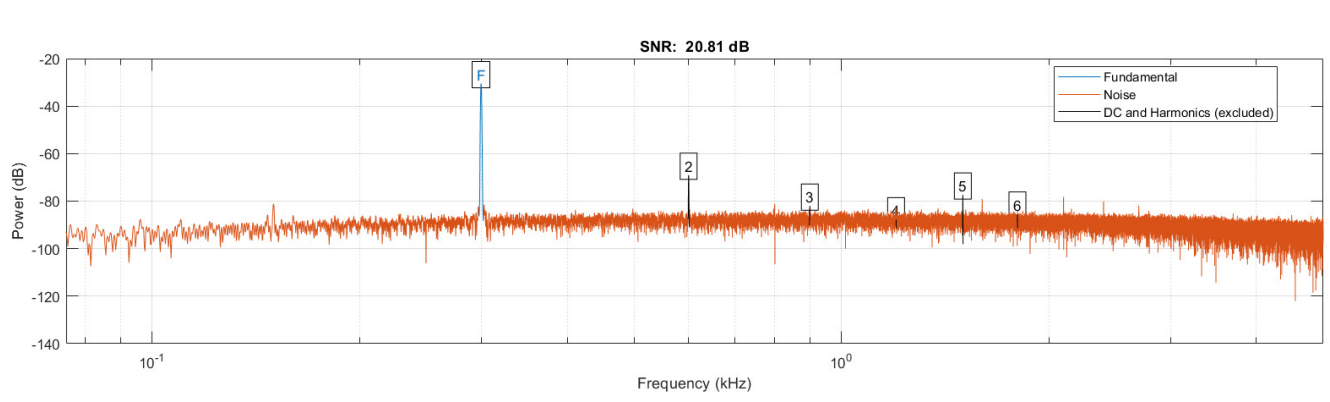


Figura 5.32: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 300 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

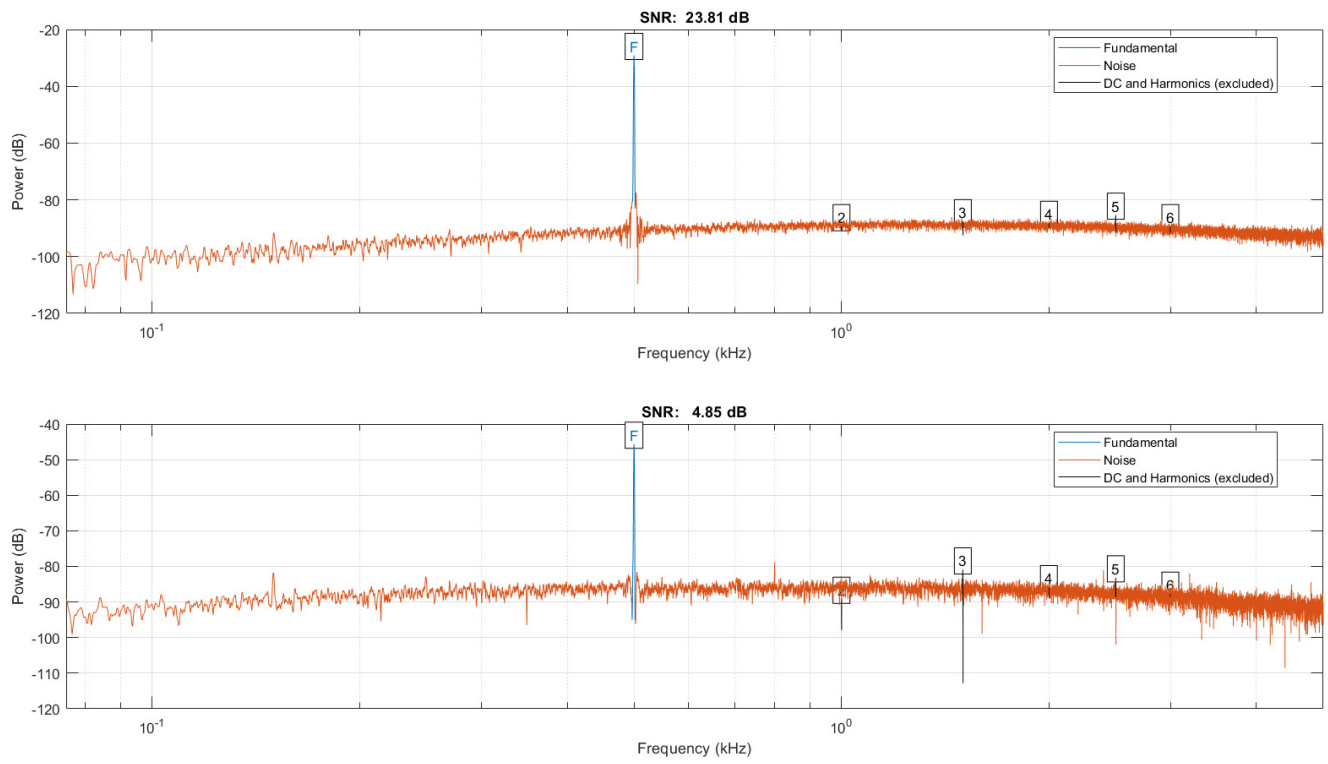


Figura 5.33: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 500 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

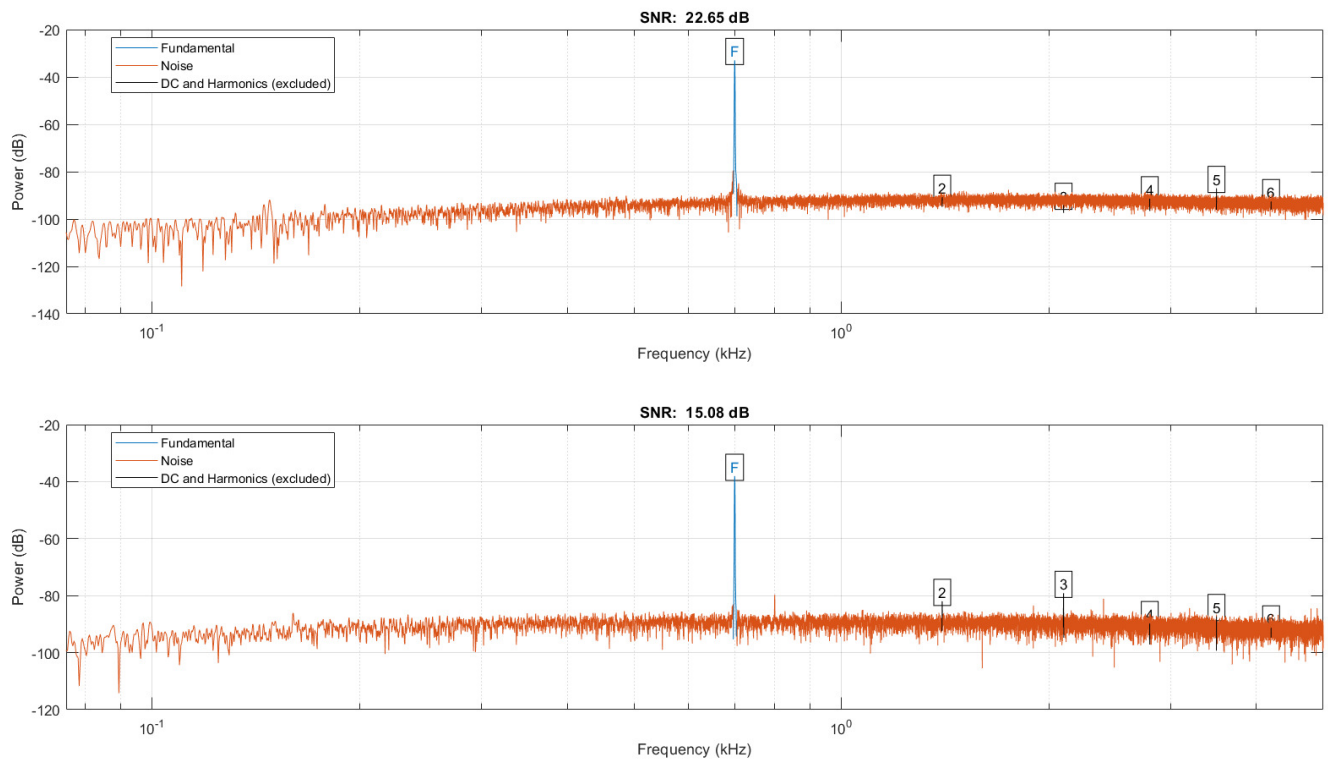


Figura 5.34: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 700 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

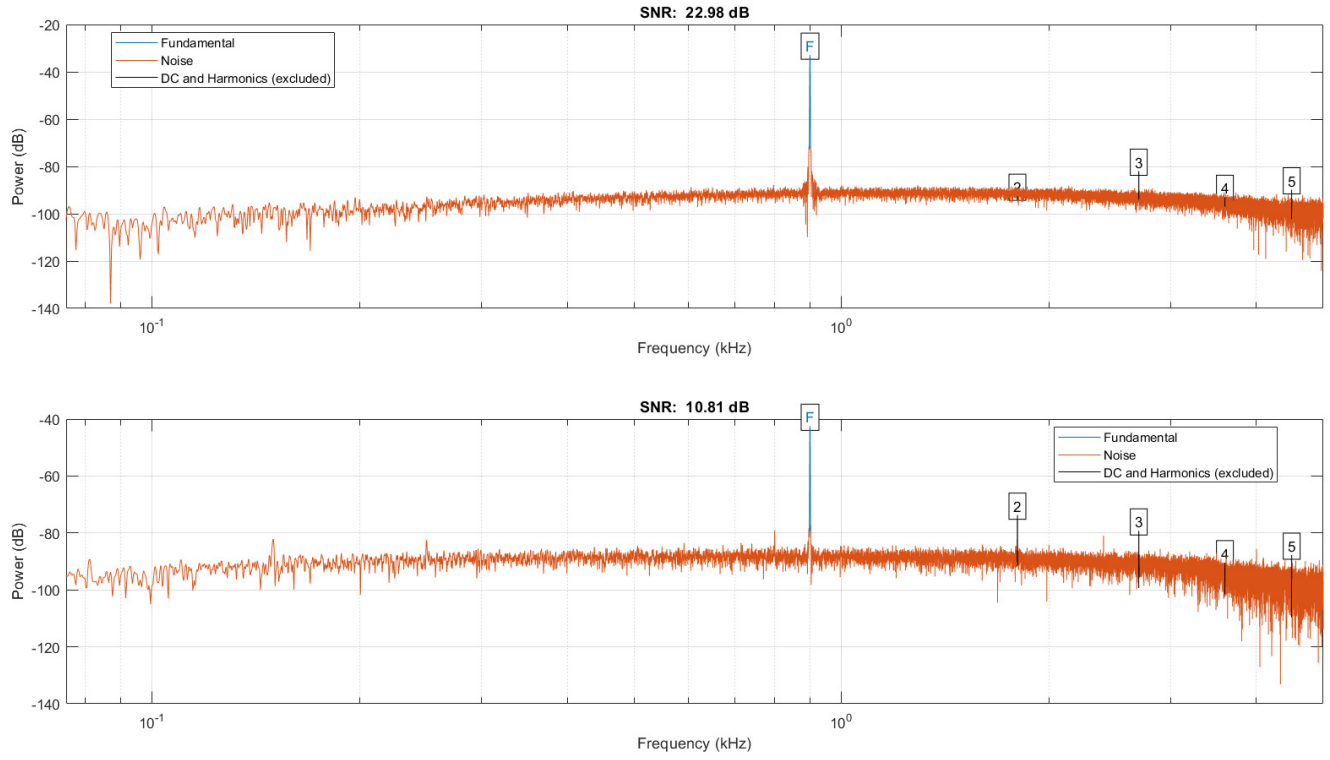


Figura 5.35: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 900 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

Tras una mayor inspección a las pistas de señal en el dispositivo, se llega a la conclusión de que la mayor parte del ruido se introduce en el conector *Board-to-Board*, donde la separación de los pines de alimentación con los de señal no es lo suficientemente grande. También en el conector no hay una correcta separación de pistas de tierra, compartiendo el mismo pin, y por lo tanto conectando eléctricamente los sensores a la tierra digital, en lugar de la tierra análoga usada en el códec como muestra la figura 5.36. Este es un punto de introducción de ruido al sistema que se debe considerar.

Durante el proceso de pruebas, se modifica una *PCB* de *AVM* V2 para separar la conexión de las tierras análoga y digital. Además se conecta la batería de manera directa al módulo de alimentación, omitiendo el paso de corriente por el conector Board-to-board. Con estas modificaciones, se obtiene la señal de audio mostrada en la figura 5.37. Se puede apreciar que el ruido introducido por el consumo de poder de la tarjeta microSD que normalmente aparece cada un segundo está completamente ausente en la señal con este método. Con esto se puede idear un nuevo diseño que considere estas modificaciones y así corregir el nivel de ruido actual del *AVM* V2.

También se estudia la posibilidad de balancear las señales de los sensores, de modo de trabajar-

las como pares diferenciales y así eliminar el ruido electromagnético introducido. Sin embargo, los sensores usados no admiten salida balanceada y el códec de audio usado no permite una entrada balanceada. Esto implica que para lograr balancear las señales se tienen que agregar al diseño amplificadores operacionales en puntos cercanos a los sensores, lo que podría traer problemas en el tamaño de los circuitos y en las pistas de poder requeridas para alimentarlos.

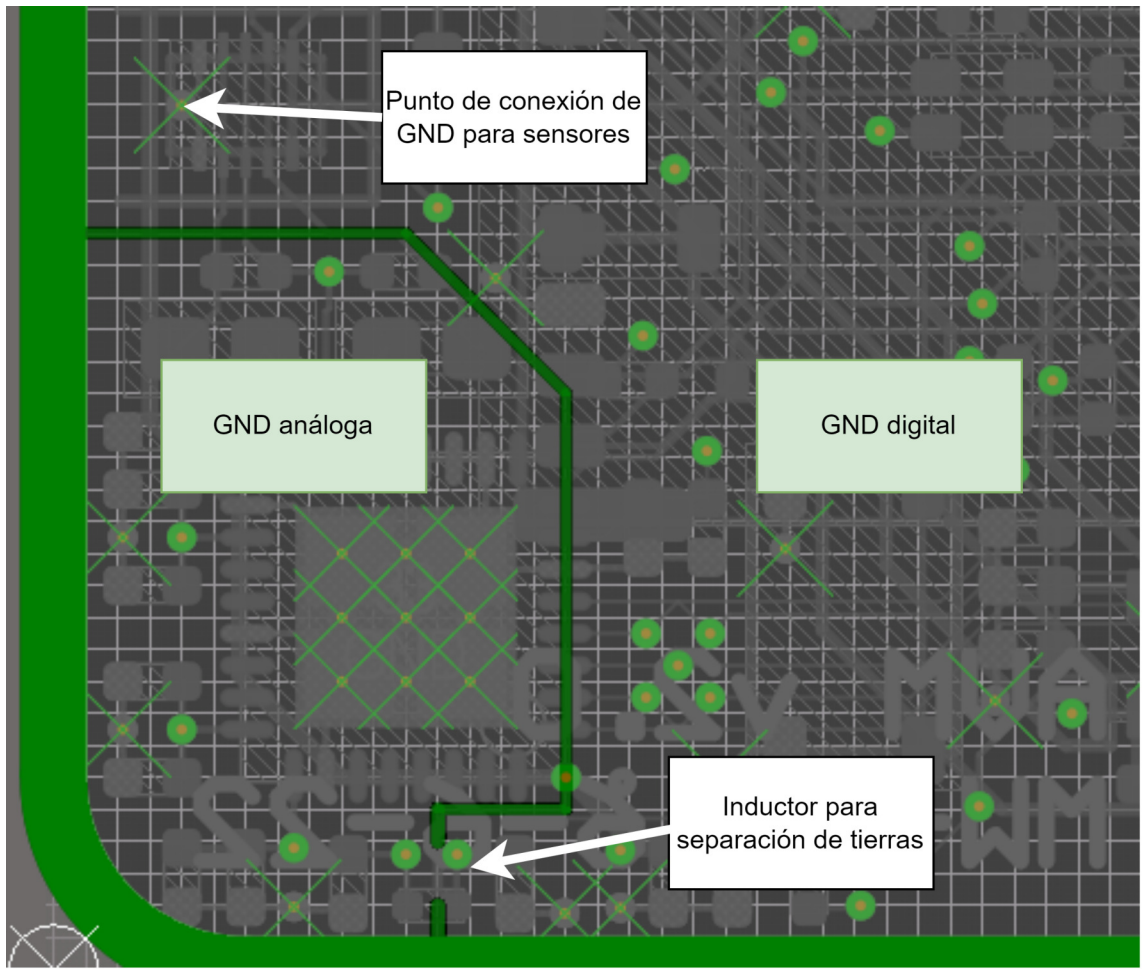
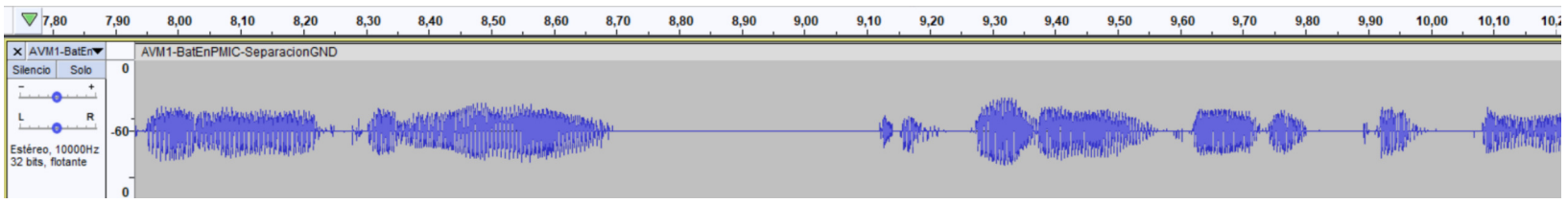
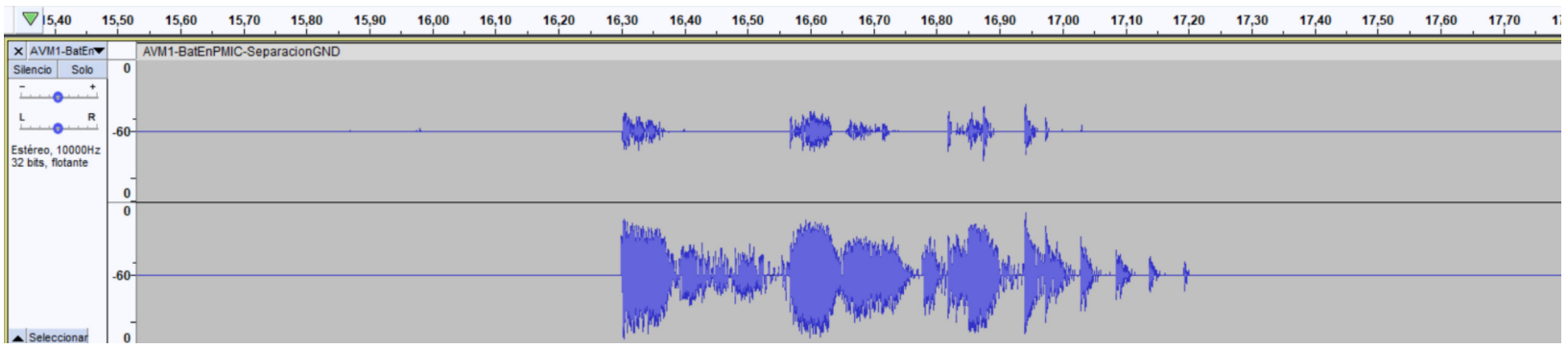


Figura 5.36: Plano de tierra del *AVM* V2, mostrando la conexión de los sensores a la tierra digital en lugar de la tierra análoga.



(a) Extracto 1 de archivo de audio.



(b) Extracto 2 de archivo de audio.

Figura 5.37: Extractos del archivo de audio realizado con las modificaciones al dispositivo.

6. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos, el diseño del nuevo *AVM* V2 un dispositivo con todas las funciones de la versión anterior y funciones nuevas que facilitan su uso. Con un nuevo factor de forma y el uso de *FPC*, esta nueva versión sirve como un acercamiento a lo que se desea conseguir con el *AVM*, un dispositivo simple y cómodo de usar en situaciones cotidianas sin presentar molestias para el usuario.

Los resultados para las mediciones de *SNR* se resumen en las tablas 6.4 para el micrófono y 6.5 para el acelerómetro. La primera columna muestra el *SNR* para el *AVM* V1, la segunda para el *AVM* V2 usando la batería, y la tercera para el *AVM* V2 alimentado por USB. Se aprecia que la *SNR* para el dispositivo *AVM* V2 sin modificaciones es menor que la del *AVM* V1. Sin embargo, si se evita la alimentación del dispositivo a través del conector Board-to-board usando alimentación por USB, se obtiene una *SNR* cercana al *AVM* V1, lo que sugiere que el dispositivo puede cumplir su función si se realizan modificaciones.

Tabla 6.4: Resultados de *SNR* para las mediciones de micrófono.

Frecuencia [Hz]	**SNR AVM V1 [dB]**	**SNR AVM V2 [dB]**	**SNR AVM V2 (USB) [dB]**
100	25.81	7.06	22.34
200	26.41	8.75	25.20
300	30.70	12.83	29.68
400	30.47	12.81	24.63
500	28.41	10.07	23.81
600	30.25	12.74	29.29
700	24.33	7.58	22.65
800	24.89	6.42	23.02
900	22.70	4.92	22.98

Las problemáticas que se presentan durante las pruebas de calidad de señal del dispositivo, corresponden a ruido electromagnético introducido internamente por la demanda intermitente de corriente desde el lector de tarjetas microSD. Esta corriente pasa por el conector Board-to-board por pines muy cercanos a las señales análogas de los sensores, dañando la integridad de

Tabla 6.5: Resultados de *SNR* para las mediciones de acelerómetro.

Frecuencia [Hz]	**SNR AVM V1 [dB]**	**SNR AVM V2 [dB]**	**SNR AVM V2 (USB) [dB]**
100	12.89	-8.11	8.71
200	30.78	-16.98	17.91
300	15.04	5.68	20.81
400	15.99	8.10	13.47
500	18.06	-3.99	4.85
600	18.28	0.69	-1.34
700	9.38	2.42	15.08
800	9.64	-2.48	16.91
900	14.13	8.64	10.81

estas señales en el intervalo de grabación, como se ve en la figura 5.29.

Existen variadas soluciones para este problema, siendo la más simple conectar la batería del dispositivo directamente a la *PCB*, evitando el paso de corriente de alimentación por el conector Board-to-board. De esta forma el nuevo diseño del *AVM* V2 puede ser utilizado y obtener una calidad de señal similar a la del *AVM* V1 sin requerir mayores modificaciones en los circuitos, y por lo tanto usando las mismas *PCB* y *FPC* ya diseñadas.

Si se desea mejorar la calidad de las señales, se pueden realizar modificaciones a partir del diseño actual, como la incorporación de otro conector Board-to-board exclusivamente para la batería, de forma de evitar el acercamiento de las pistas de alimentación a las pistas de señales. Se puede usar también cables para unir la batería desde el collar *FPC* hacia la *PCB*, pero esto anula las ventajas de usar un conector para este fin.

Desde la *PCB* principal, la principal modificación para mejorar la integridad de las señales es la separación de las tierras análoga y digital, como muestra la figura 5.36. Hacer esto durante el proceso de pruebas, en conjunto a la conexión de la batería directamente a la *PCB*, logra disminuir completamente el ruido en las señales, como se ve en la figura 5.37.

Estas modificaciones, junto con posibles mejoras de funcionamiento y tamaño, se consideran

para una nueva revisión a futuro del diseño del dispositivo, la cual se espera que pueda superar las capacidades del *AVM* actual y del *AVM* V2 analizado en este documento.

Referencias

[1] D. D. Mehta, M. Zañartu, S. W. Feng, H. A. Cheyne II, and R. E. Hillman, "Mobile voice health monitoring using a wearable accelerometer sensor and a smartphone platform," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 59, no. 11, pp. 3090–3096, 2012.

[2] M. Technology. Atsamd51n19a microchip technology. [Online]. Available: https://www.microchip.com/en-us/product/ATSAMD51N19A#

[3] A. Devices. Ltc3553 datasheet. [Online]. Available: https://www.analog.com/en/products/ltc3553.html#product-overview

[4] T. Instruments. Tlv320aic3101irhbt. [Online]. Available: https://www.ti.com/product/TLV320AIC3101/part-details/TLV320AIC3101IRHBT

[5] O. W. e. a. Jeong H, Yoo JY, "Closed-loop network of skin-interfaced wireless devices for quantifying vocal fatigue and providing user feedback," *Proc Natl Acad Sci U S A*, vol. 120, no. 9, 2023.

[6] M. Paul. First wearable device for vocal fatigue senses when your voice needs a break. [Online]. Available: https://neurosciencenews.com/neurotech-vocal-device-22535/

[7] S. Critcher and T. J. Freeborn, "Flexible pcb failures from dynamic activity and their impacts on bioimpedance measurements: A wearable case study," *IEEE Open Journal of Circuits and Systems*, vol. 2, pp. 732–742, 2021.

[8] H.-b. Sun, M.-q. Shi, P. Yang, J. Zhong, Q. Chen, T. Xue, T. Zhao, L. Xu, and A. Salo, "Rigid-flexible printed circuit structure optimization by simulations," in *EuroSimE 2009 - 10th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, 2009, pp. 1–4.

[9] "Manufacturing tolerances." [Online]. Available: https://www.pcbway.com/pcb_prototype/PCB_Manufacturing_tolerances.html

[10] PUIaudio. Amm-2742-t-wp-r datasheet. [Online]. Available: https://puiaudio.com/product/s/AMM-2742-T-WP-R

[11] Knowles. bu-21771-000 datasheet. [Online]. Available: https://www.knowles.com/docs/default-source/model-downloads/bu-21771-000.pdf

7. Anexos

7.1. Imágenes

7.1.1. Resultados de diseño

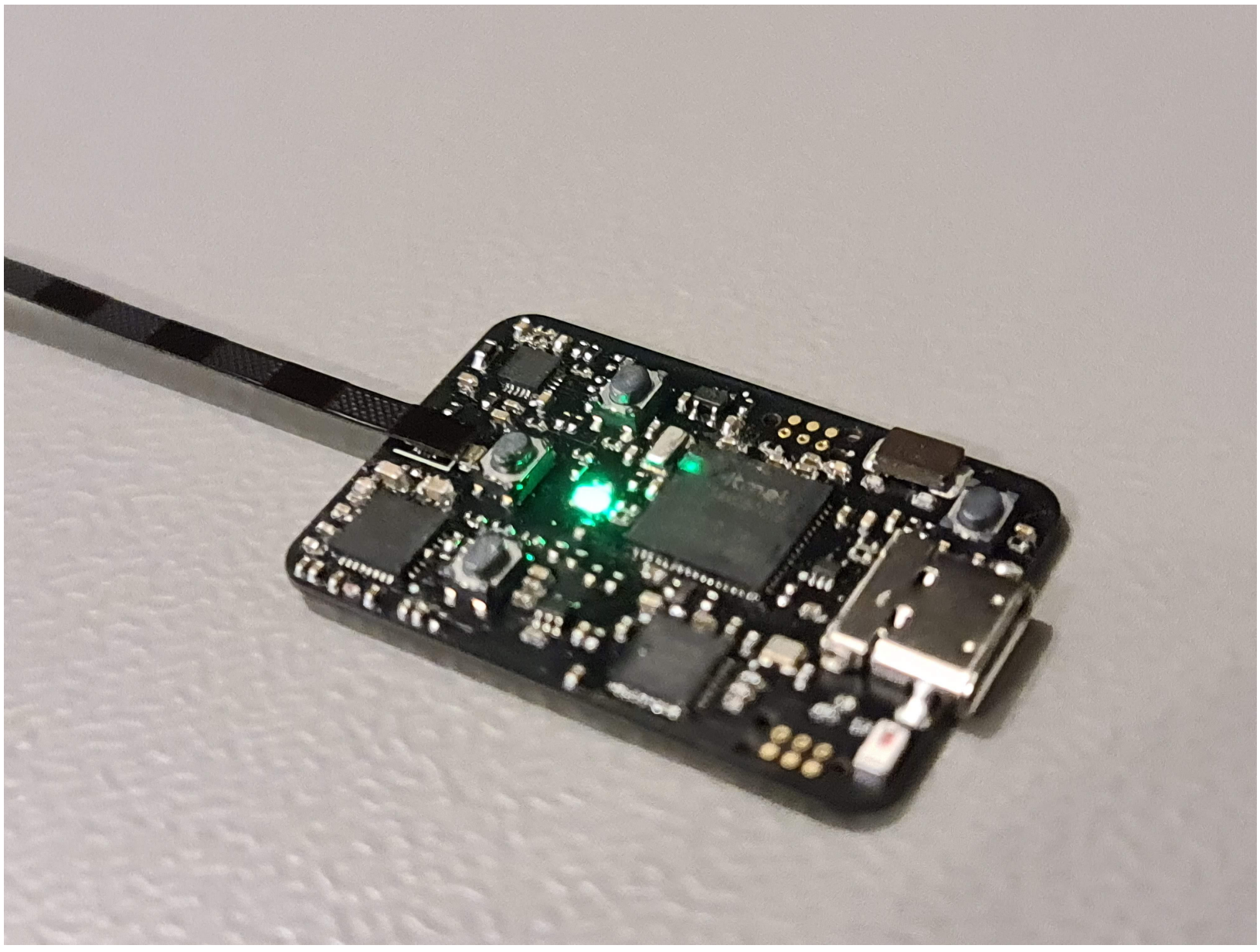


Figura 7.38: *AVM* V2 con el collar flexible conectado y funcionando.

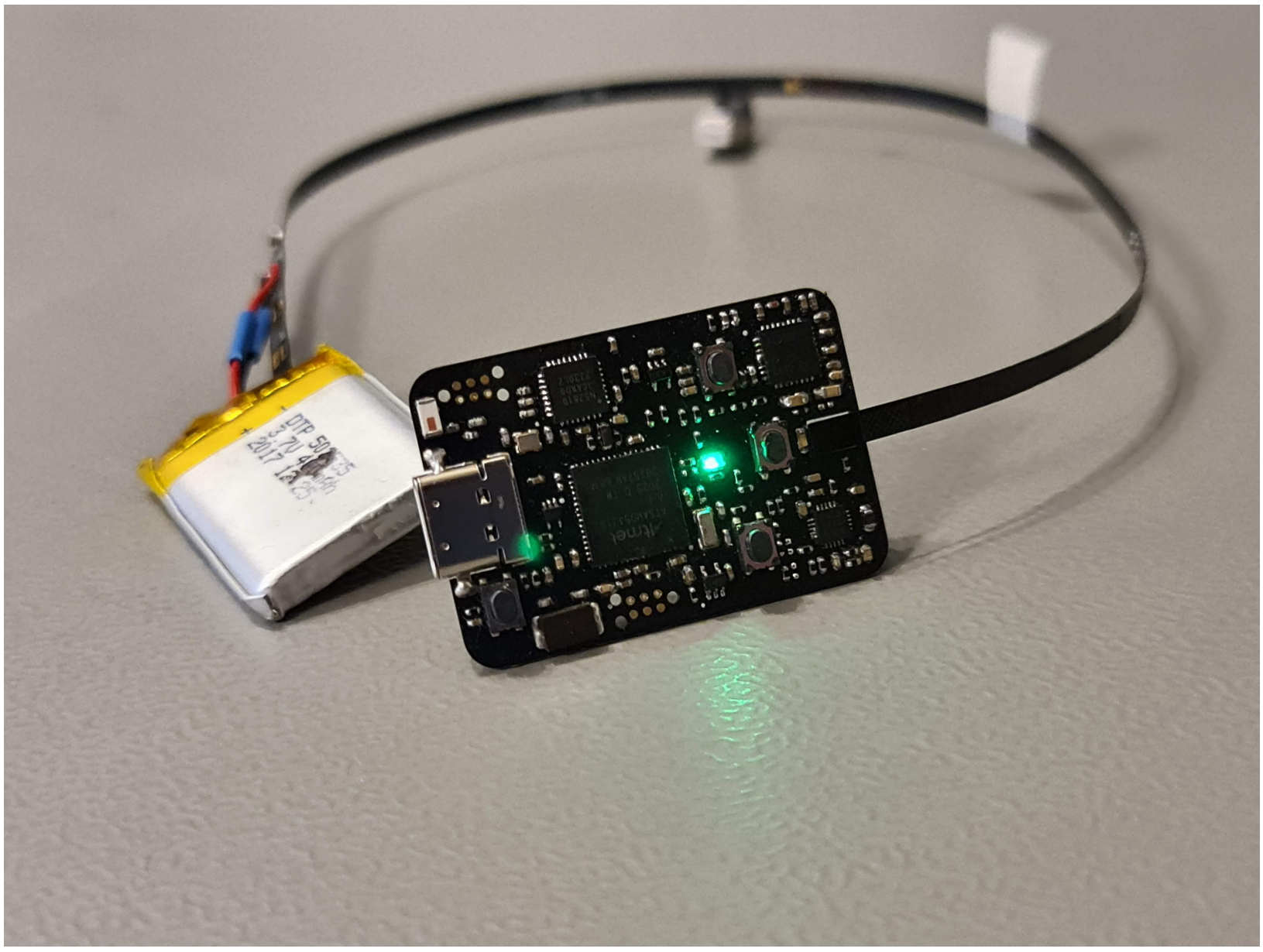


Figura 7.39: *AVM* V2 mostrando la curvatura del collar flexible.

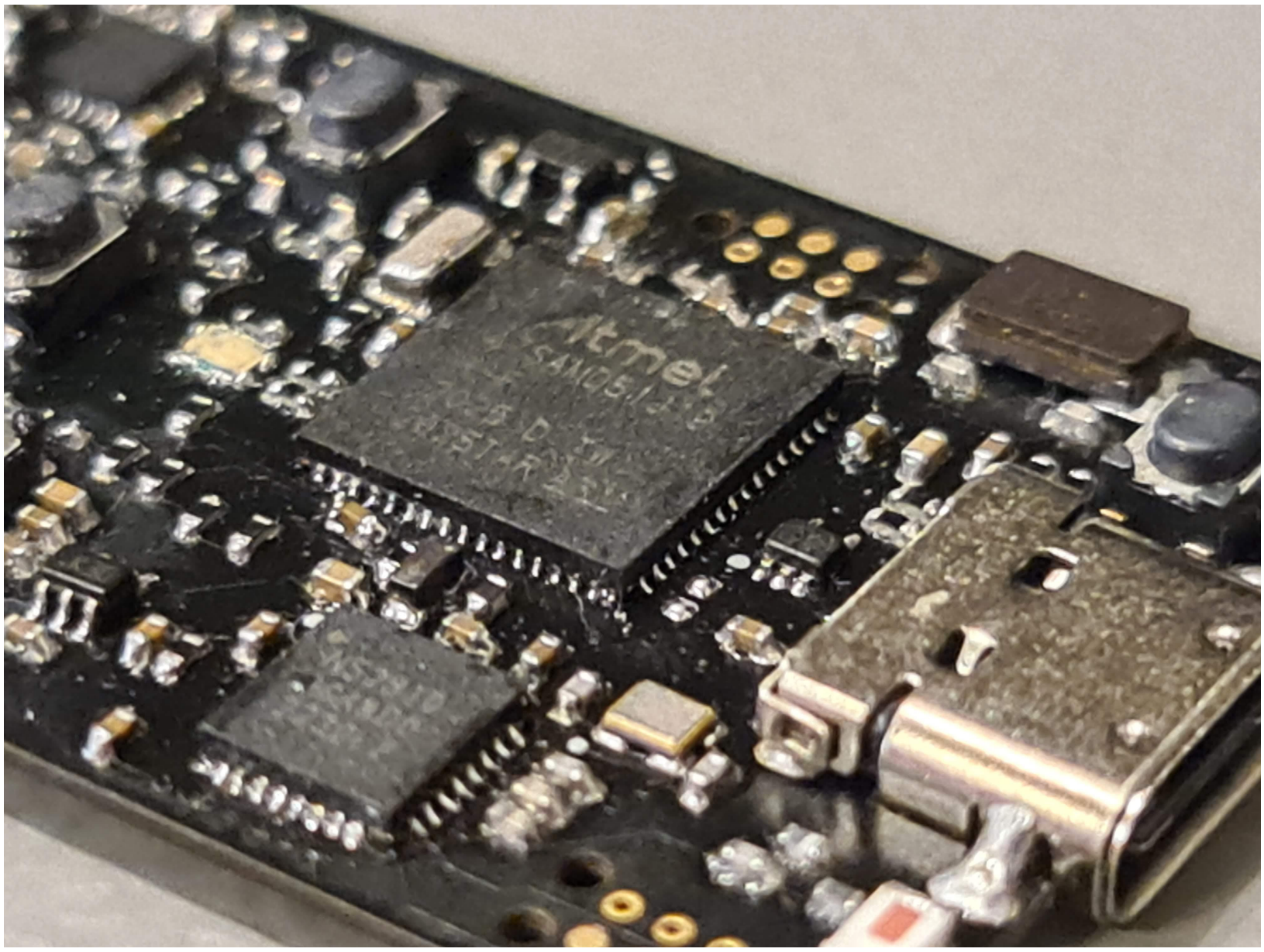


Figura 7.40: *PCB* de *AVM* V2, énfasis en el *MCU*.

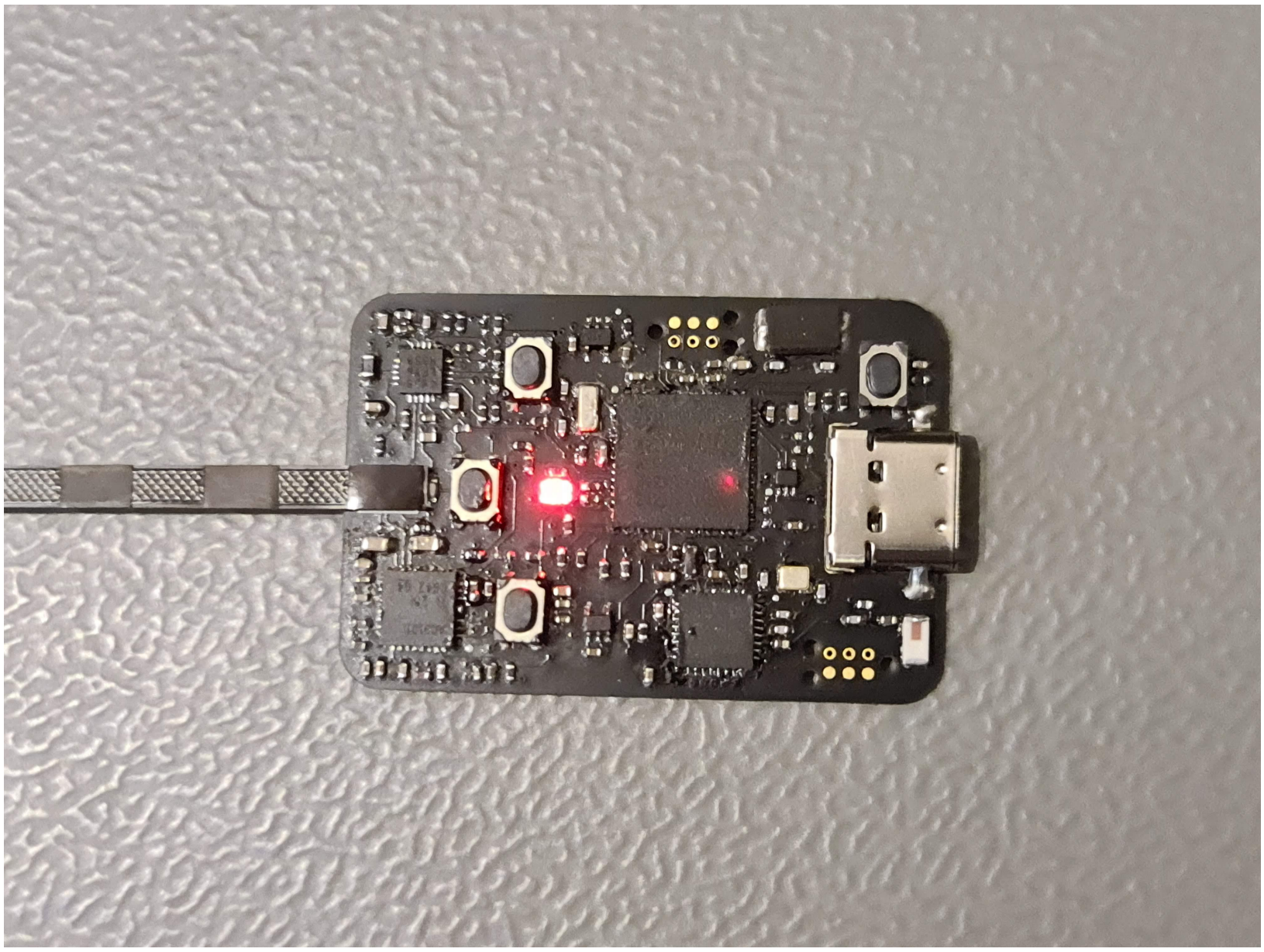


Figura 7.41: *AVM* V2 en estado de grabación, mostrando el indicador de luz roja.

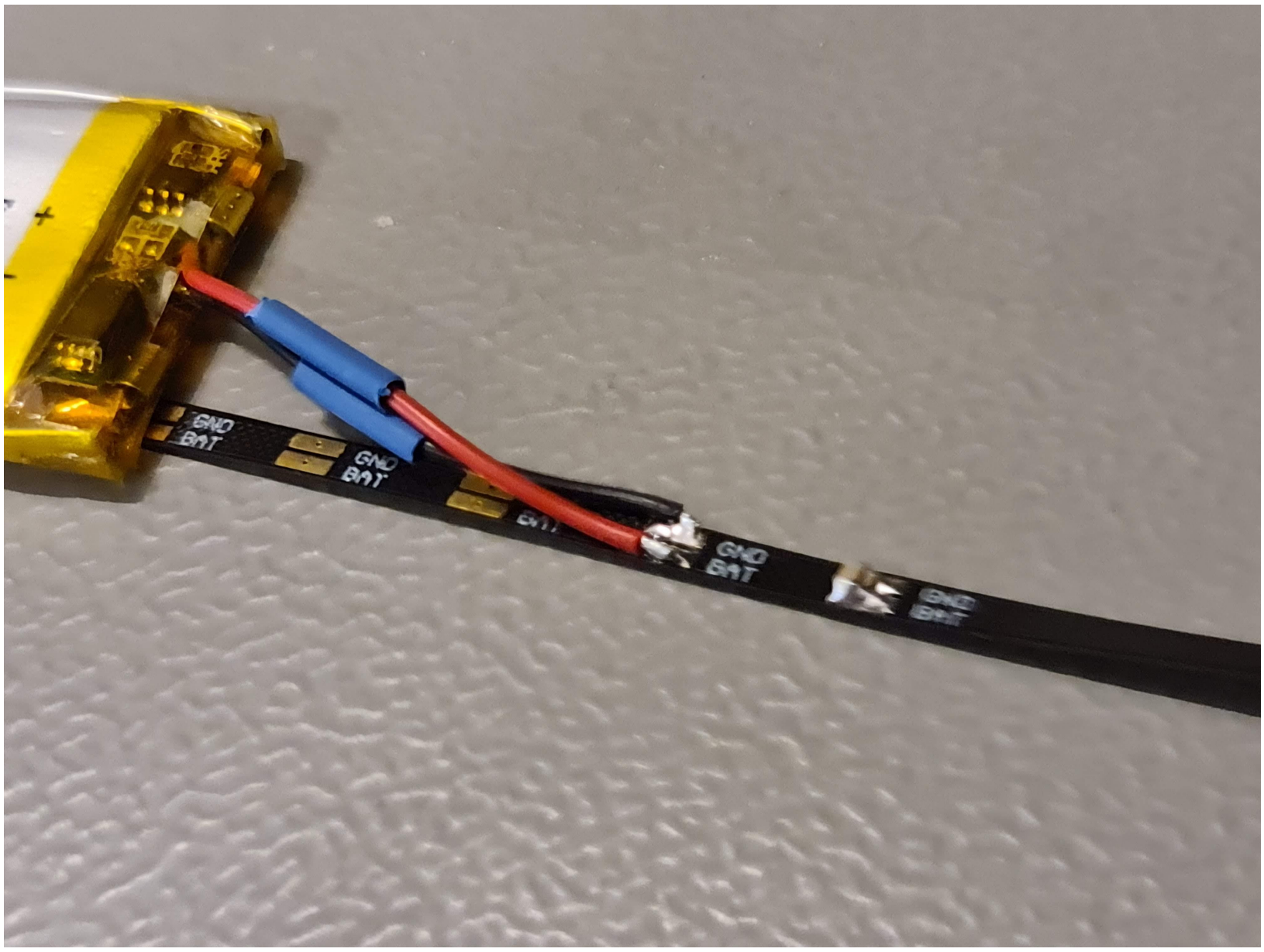


Figura 7.42: Conexión de la batería al collar flexible.

7.1.2. Resultados de pruebas de poder

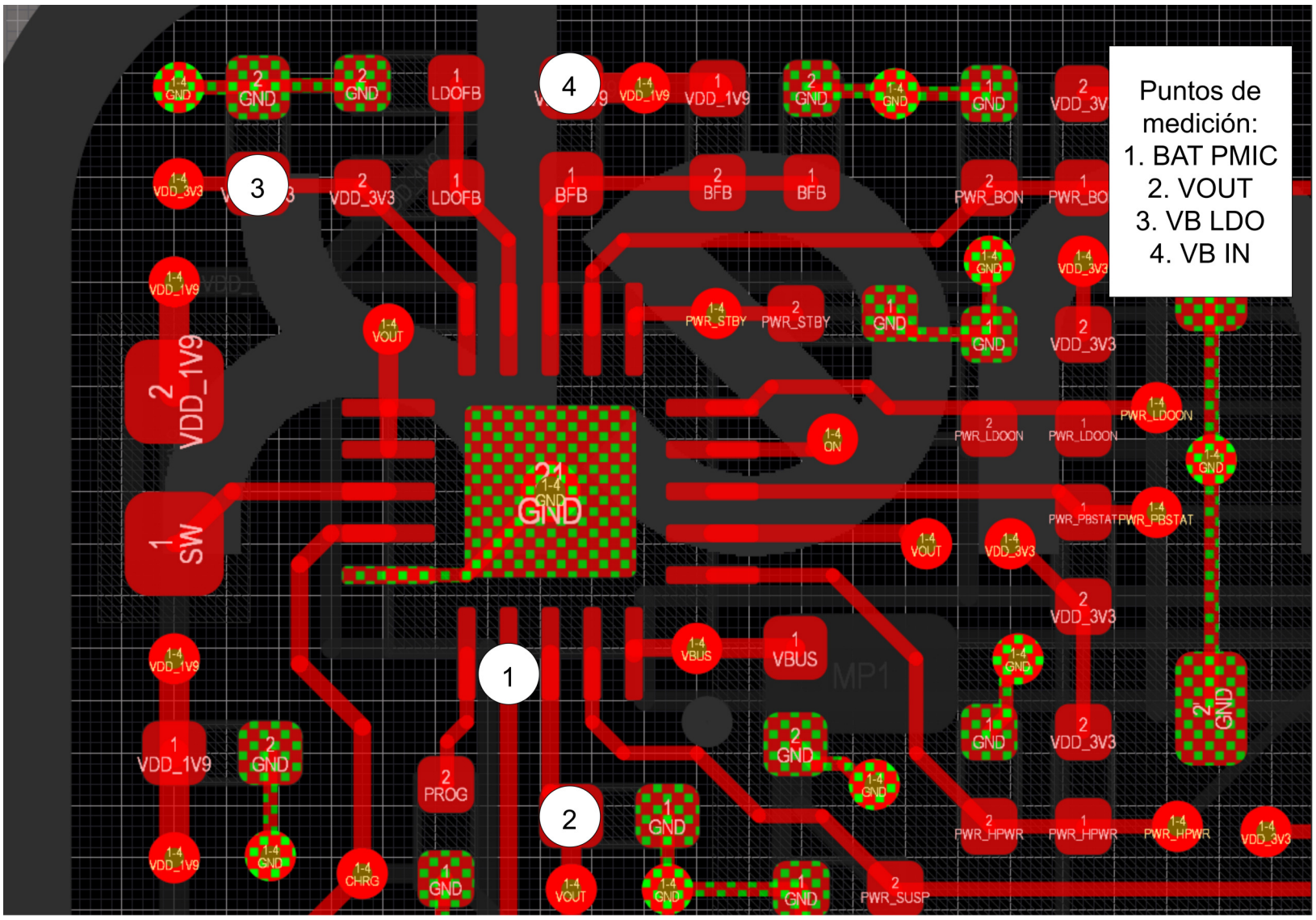


Figura 7.43: Puntos de medición de los voltajes de funcionamiento en el módulo de poder.

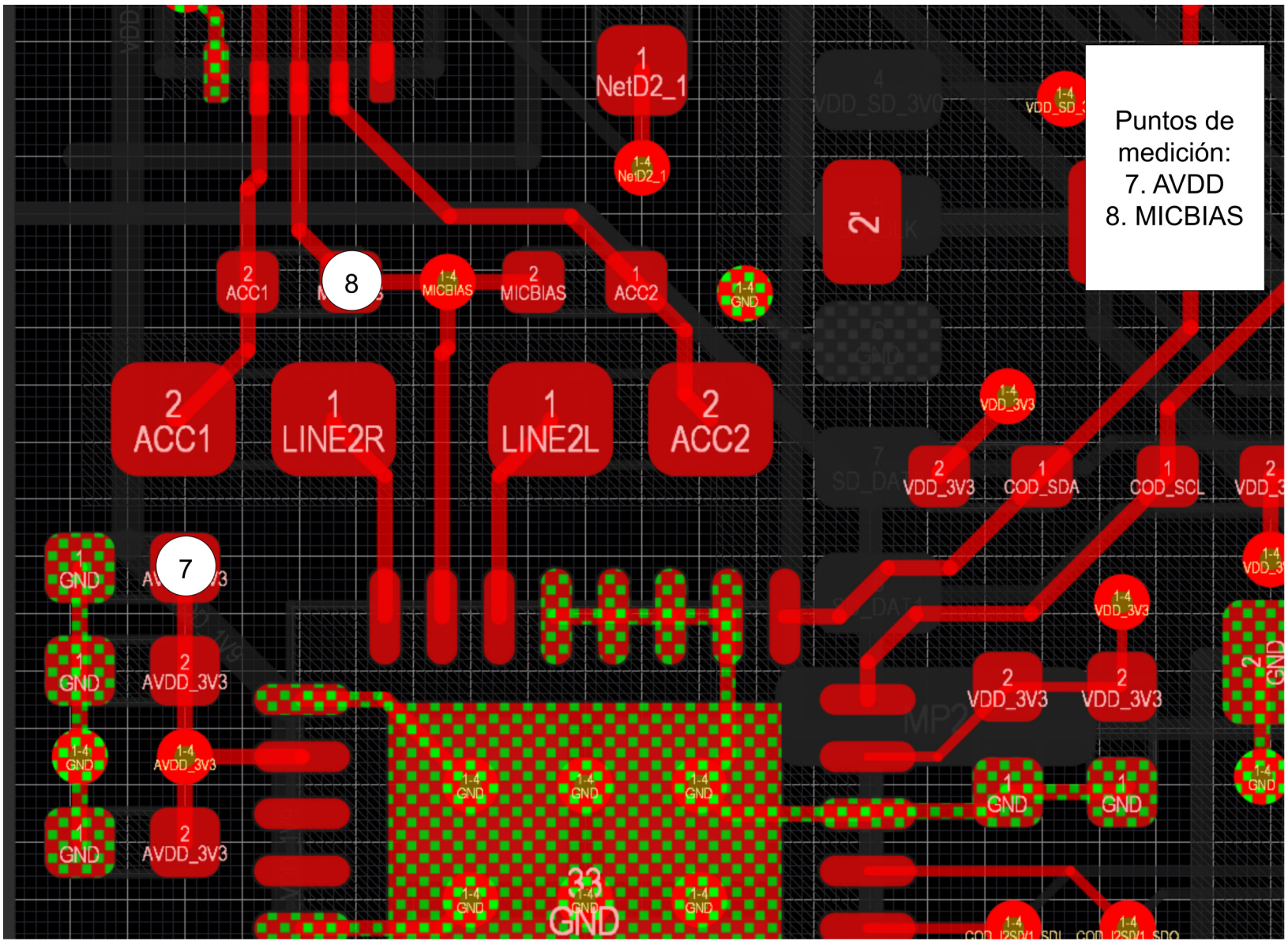


Figura 7.44: Puntos de medición de los voltajes de funcionamiento en el códec.

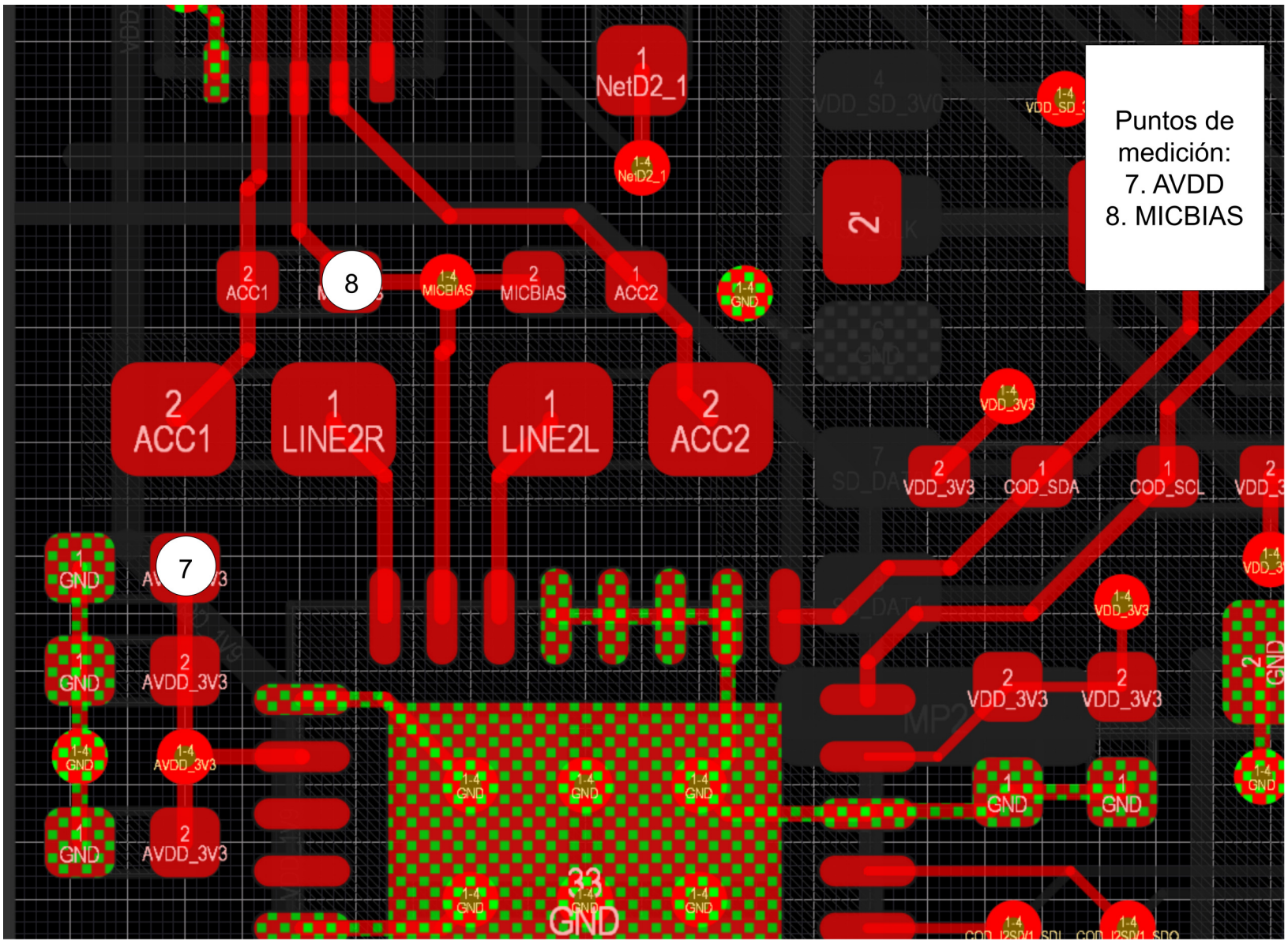


Figura 7.45: Puntos de medición de los voltajes de funcionamiento en el *MCU*.

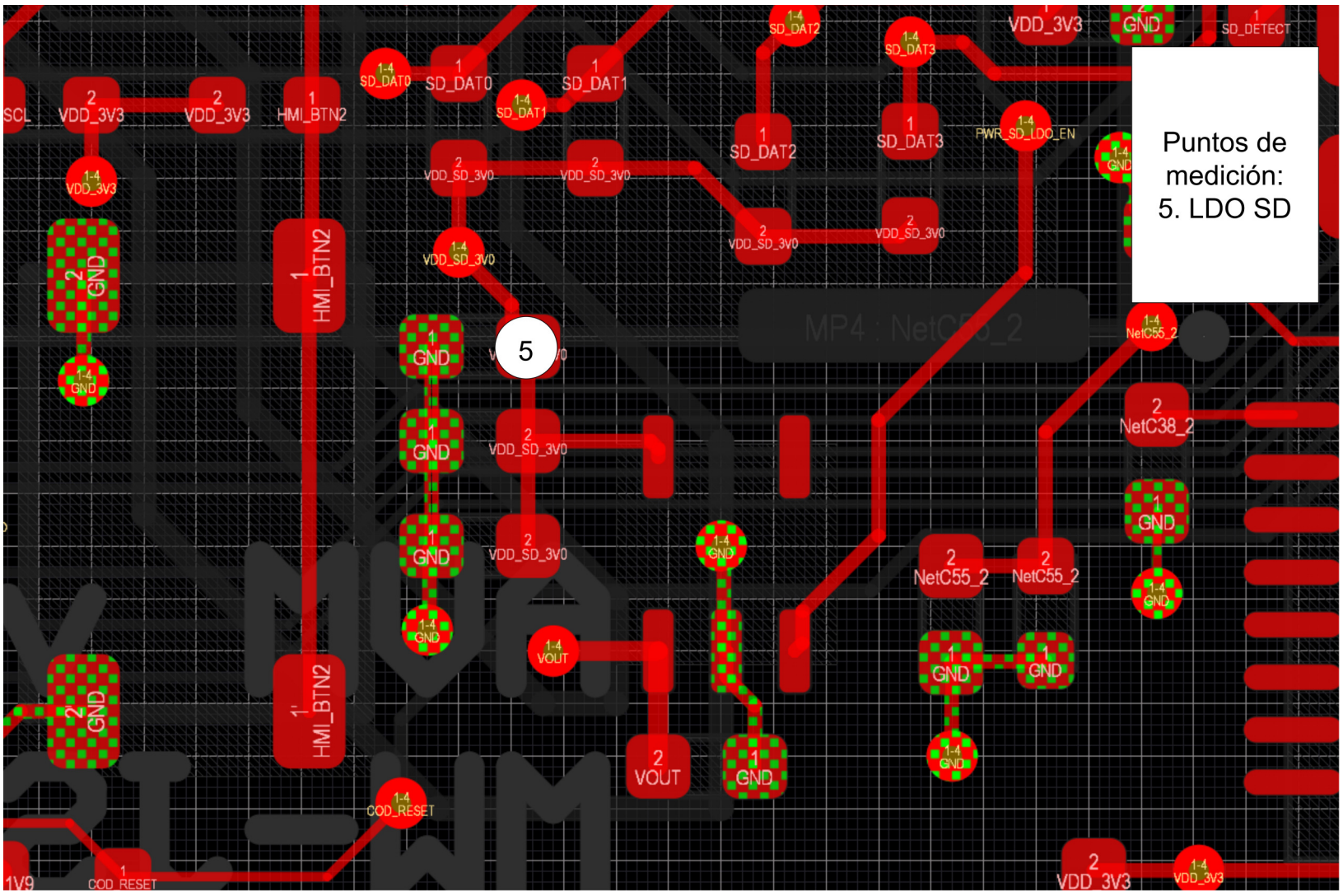
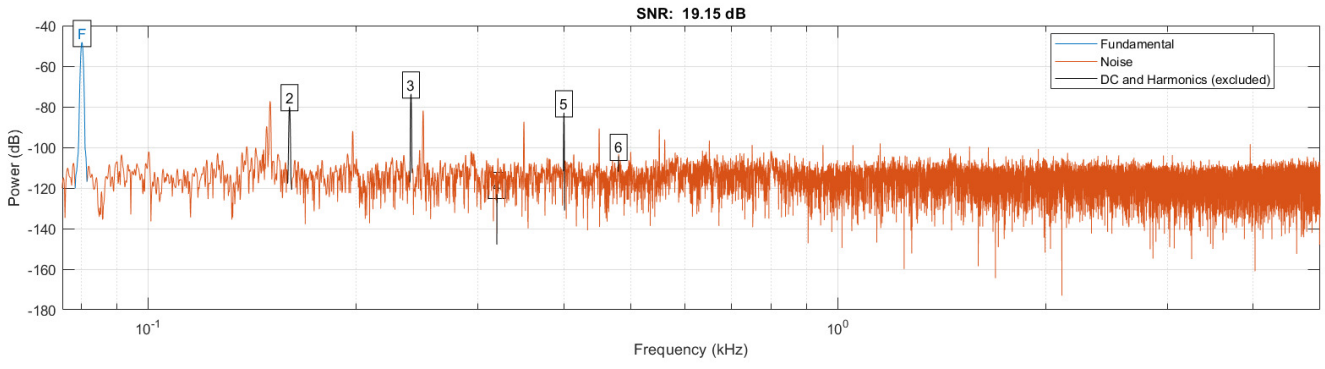
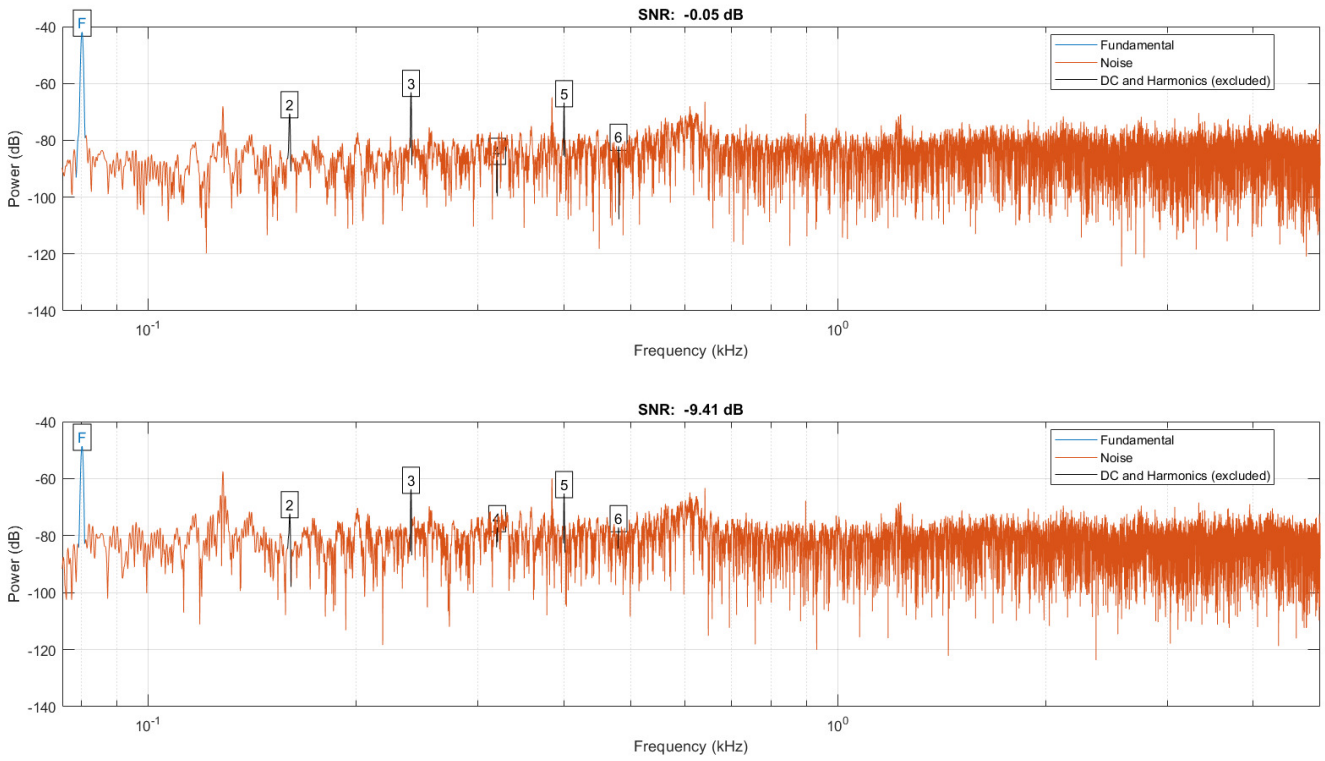


Figura 7.46: Puntos de medición de los voltajes de funcionamiento en el lector microSD.

7.1.3. Resultados de pruebas de calidad de señales

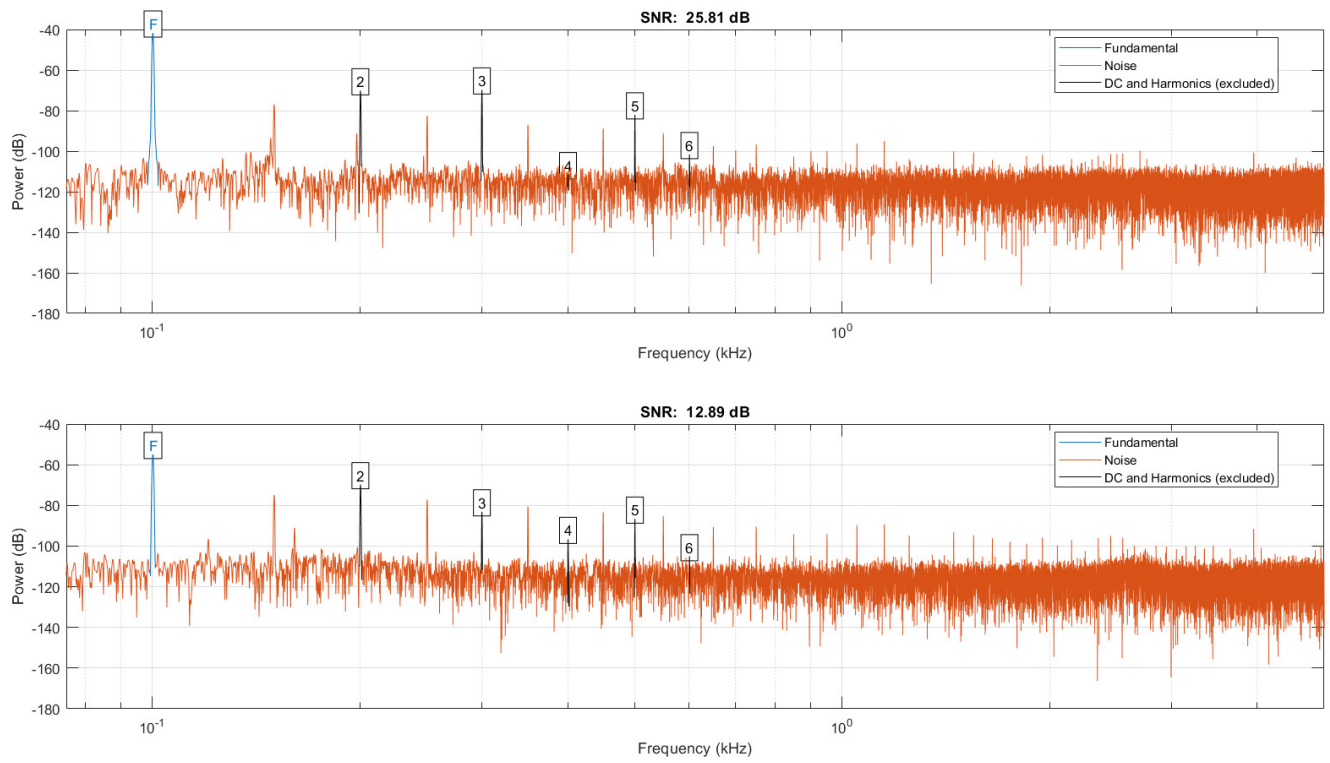


(a) Resultados en versión anterior.

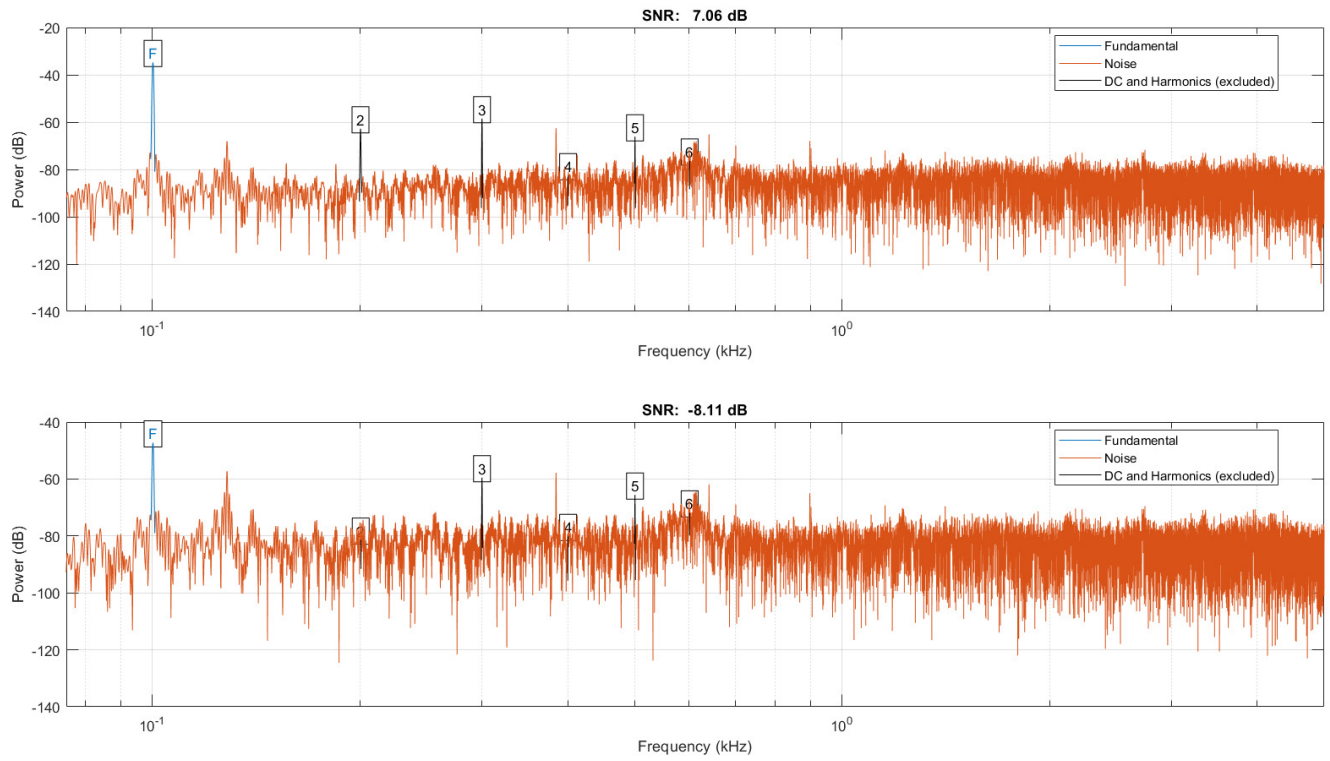


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.47: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 80 Hz en ambos dispositivos.

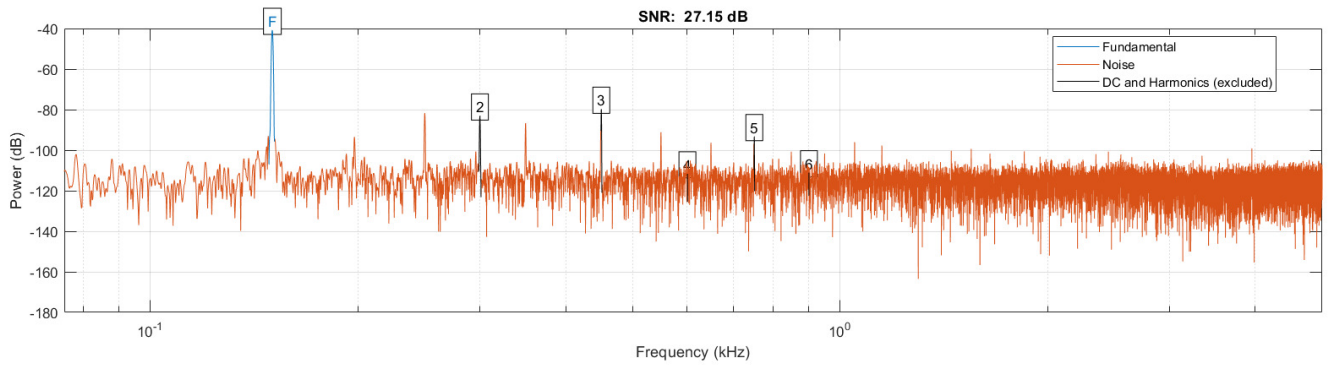


(a) Resultados en versión anterior.

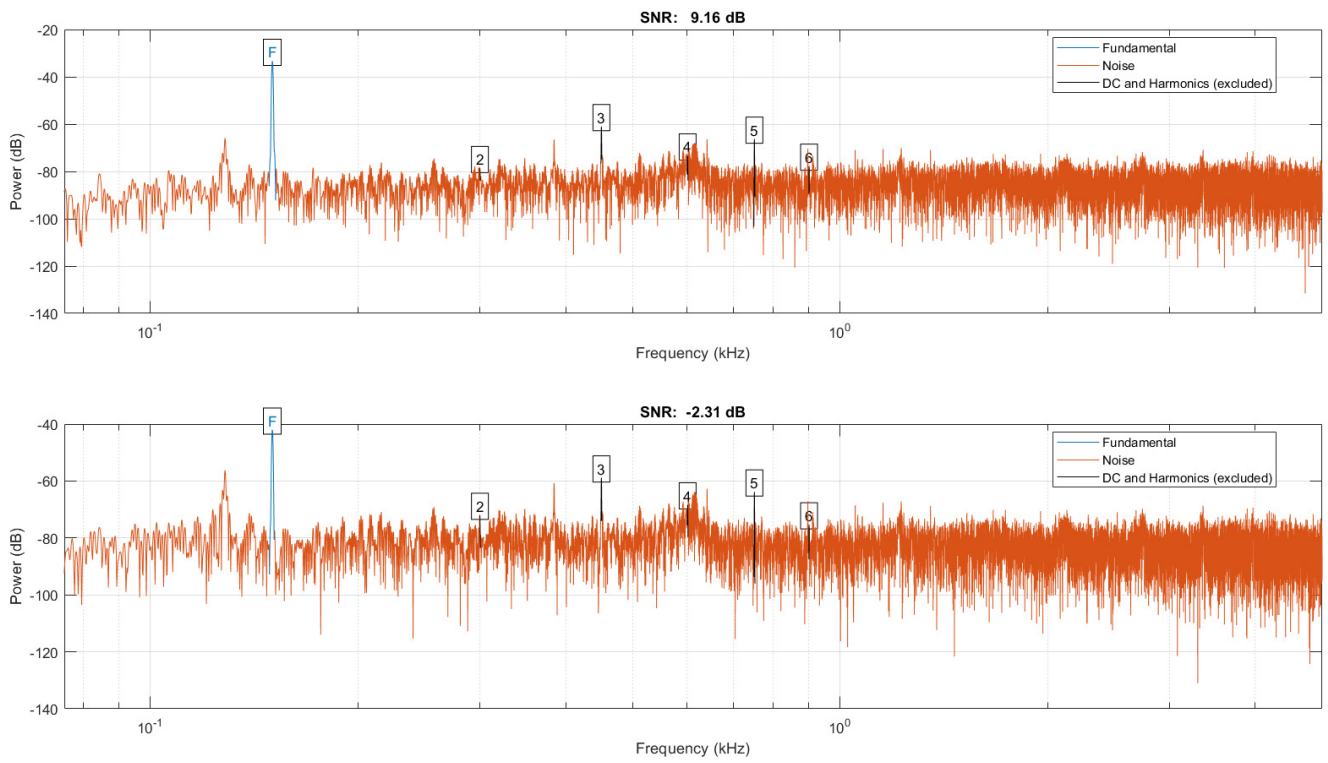


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.48: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 100 Hz en ambos dispositivos.

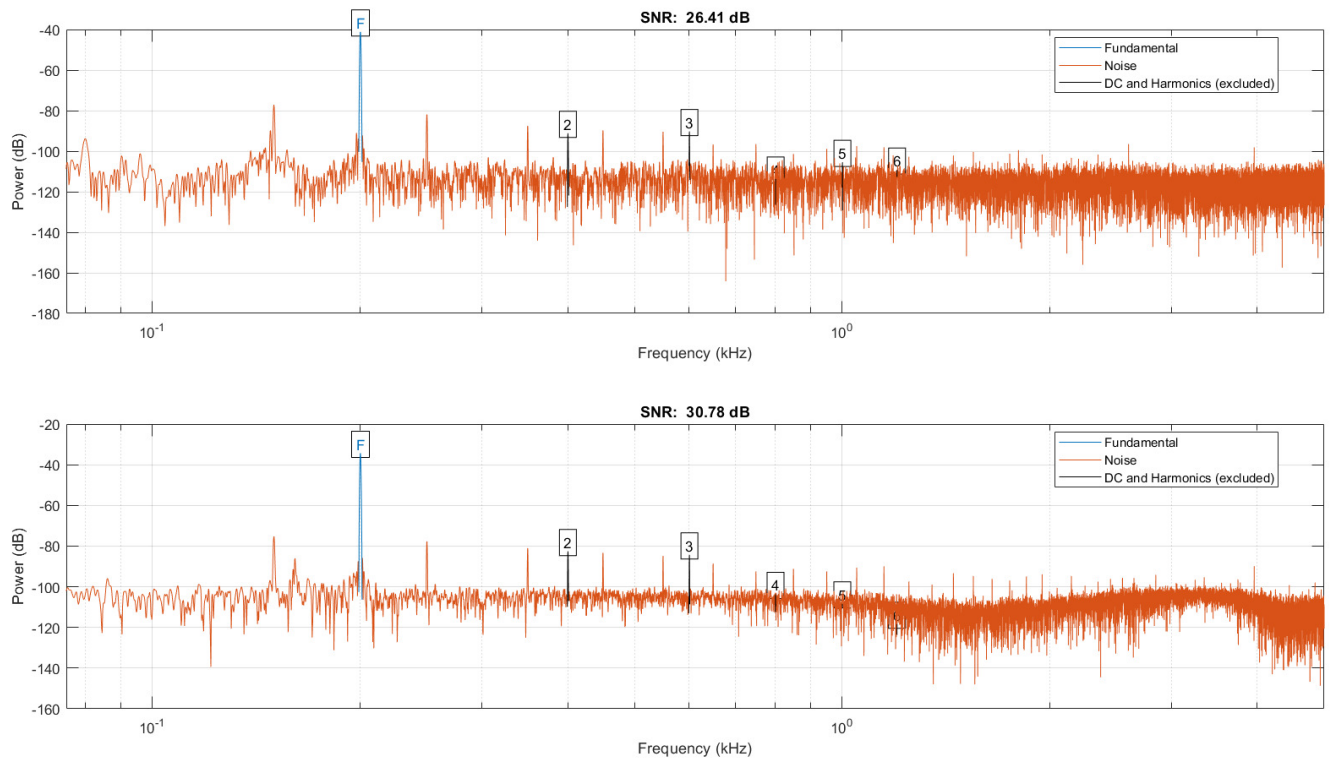


(a) Resultados en versión anterior.

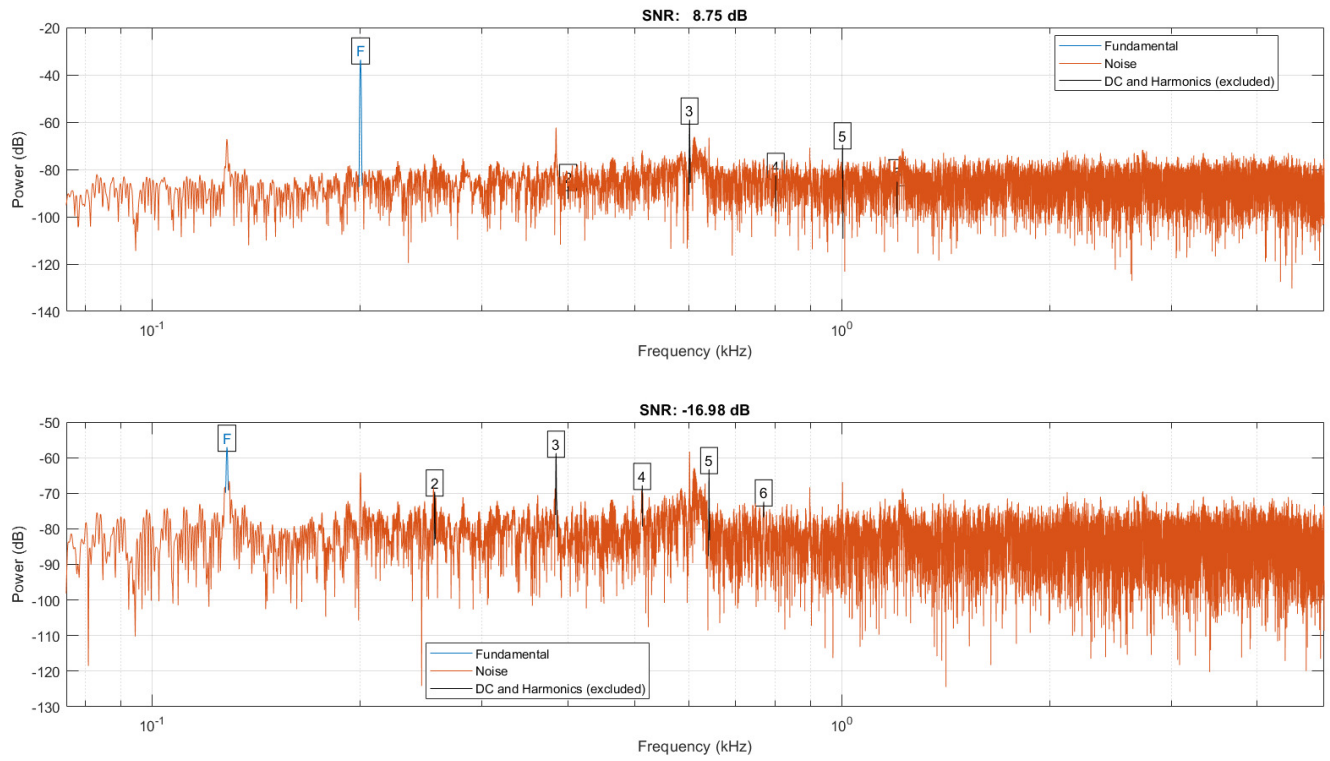


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.49: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 150 Hz en ambos dispositivos.

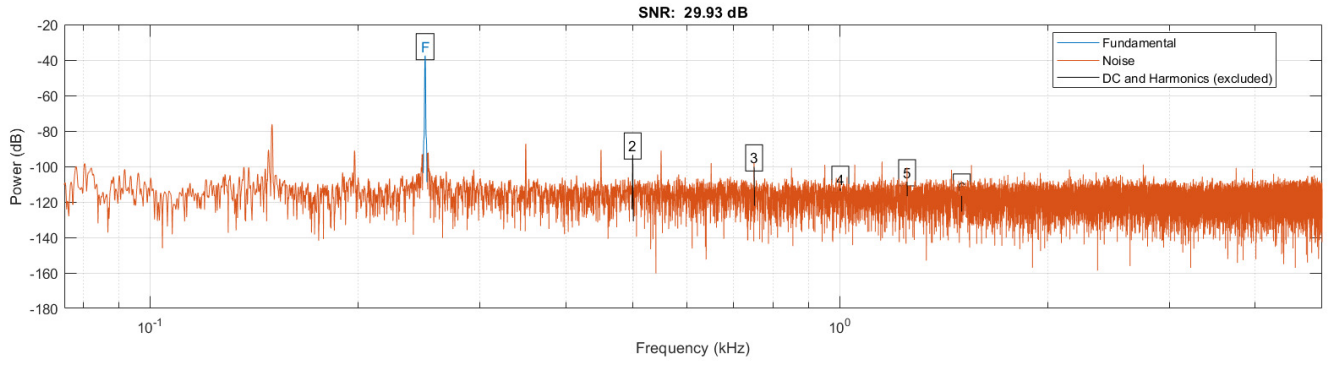


(a) Resultados en versión anterior.

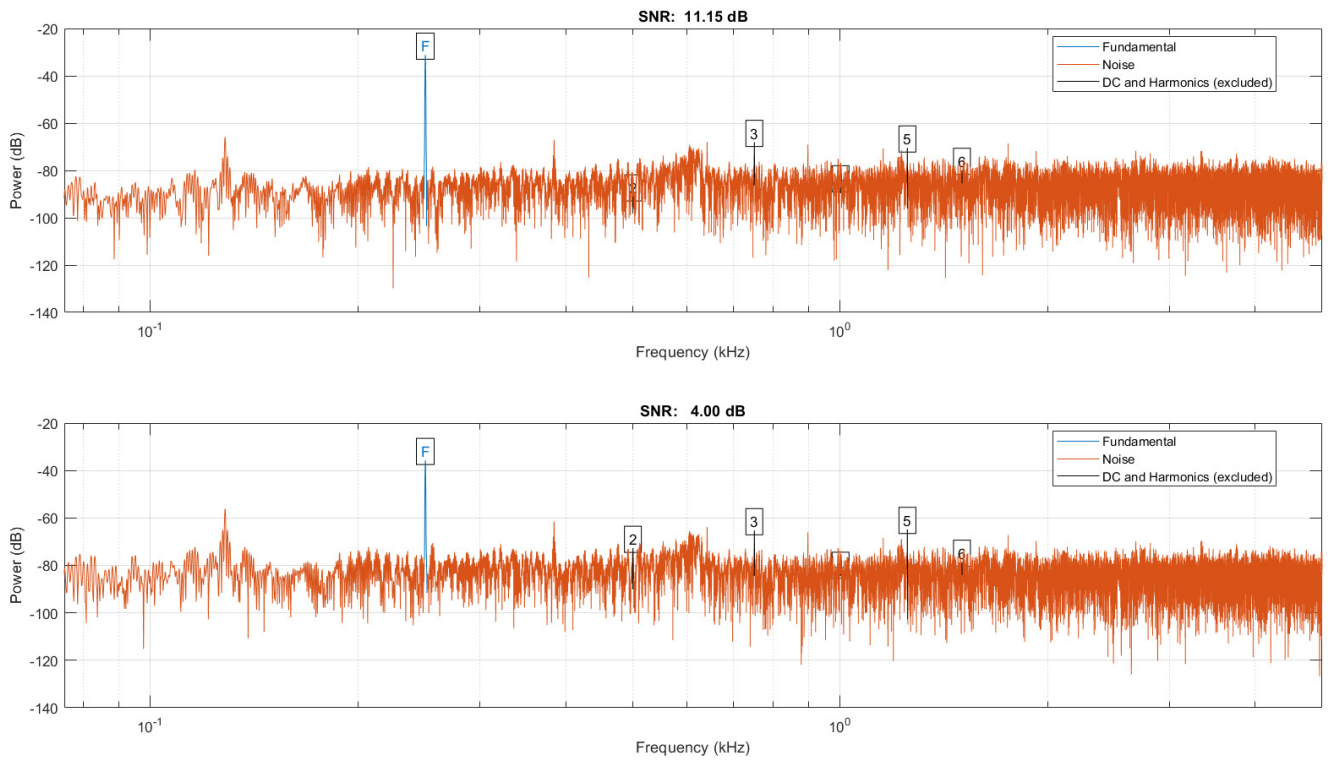


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.50: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 200 Hz en ambos dispositivos.

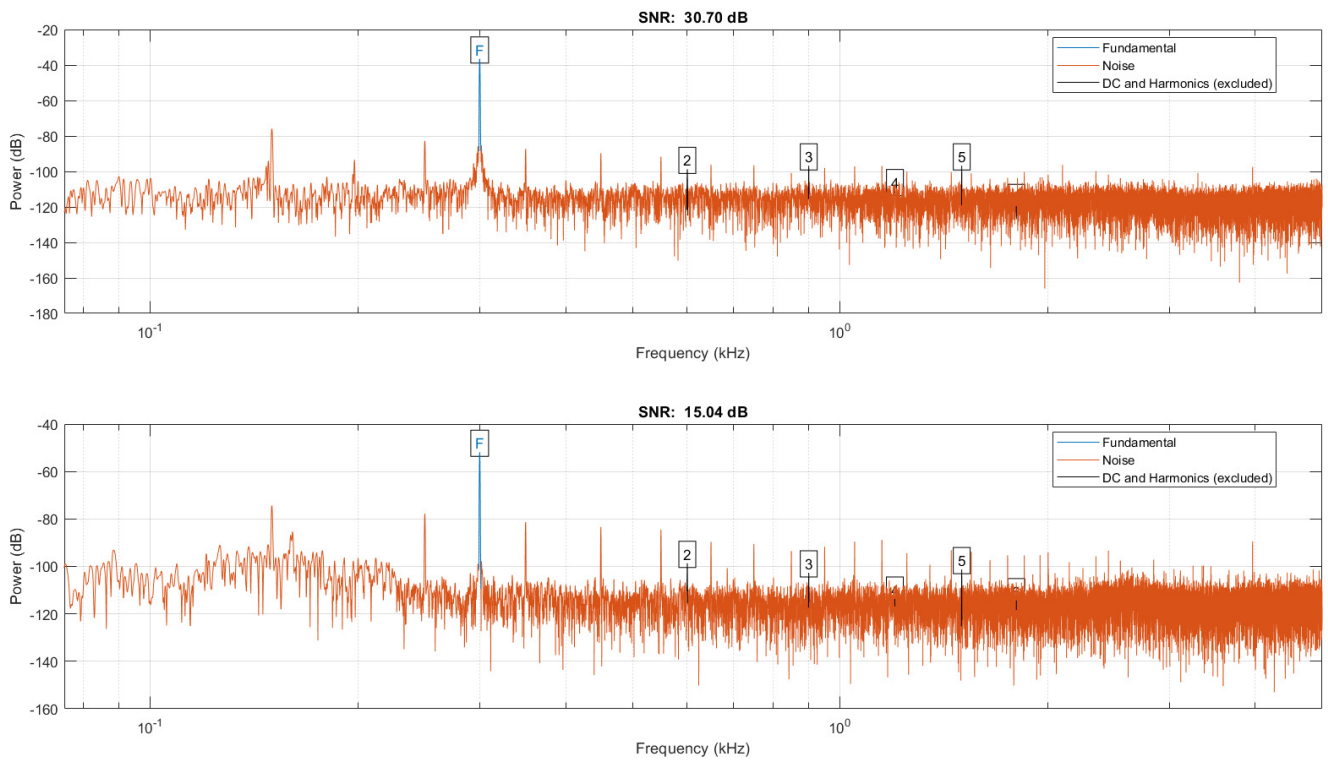


(a) Resultados en versión anterior.

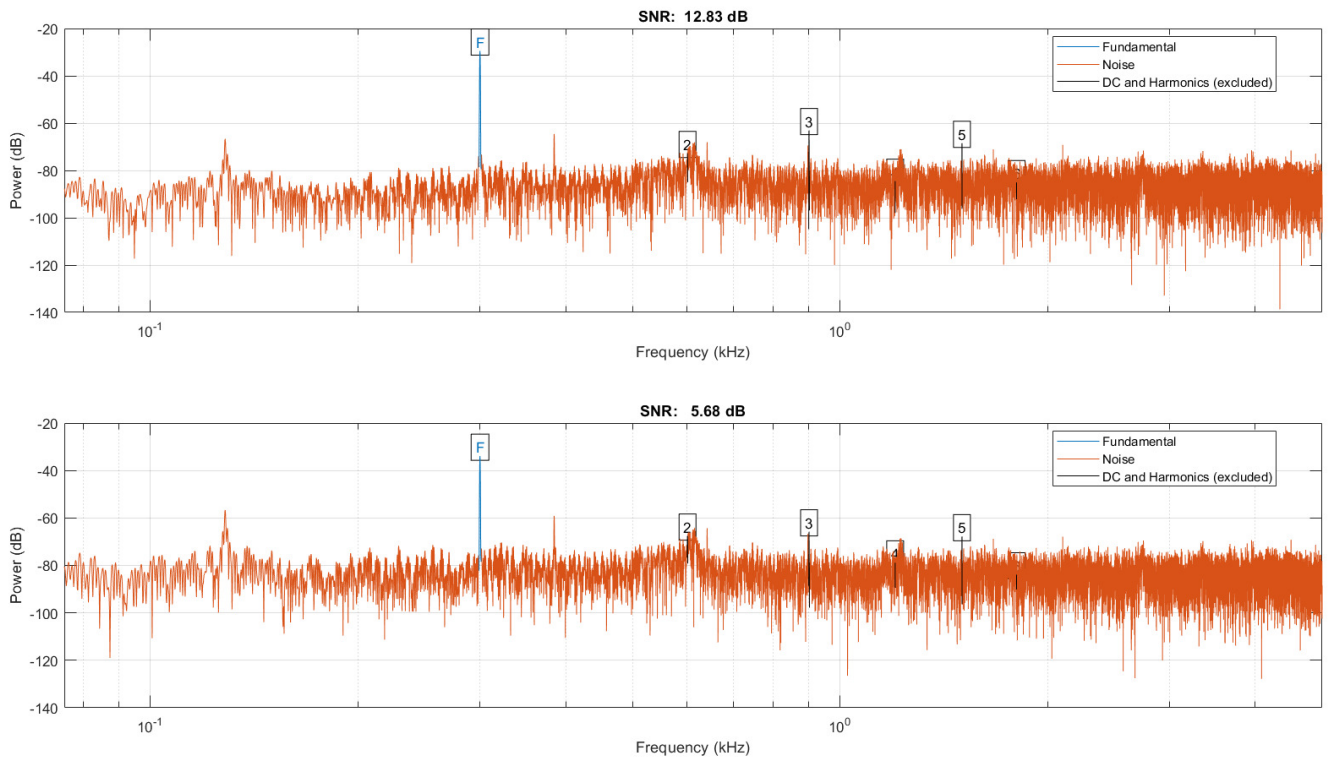


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.51: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 250 Hz en ambos dispositivos.

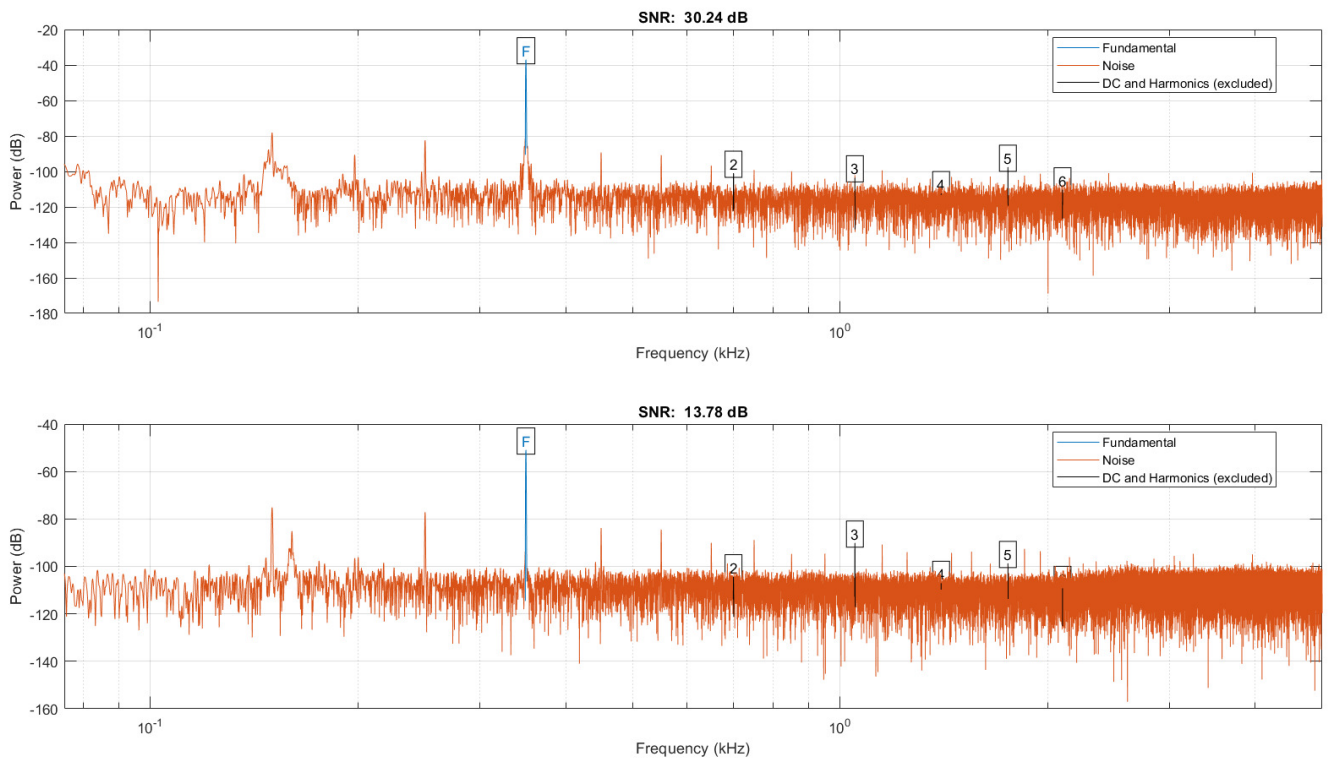


(a) Resultados en versión anterior.

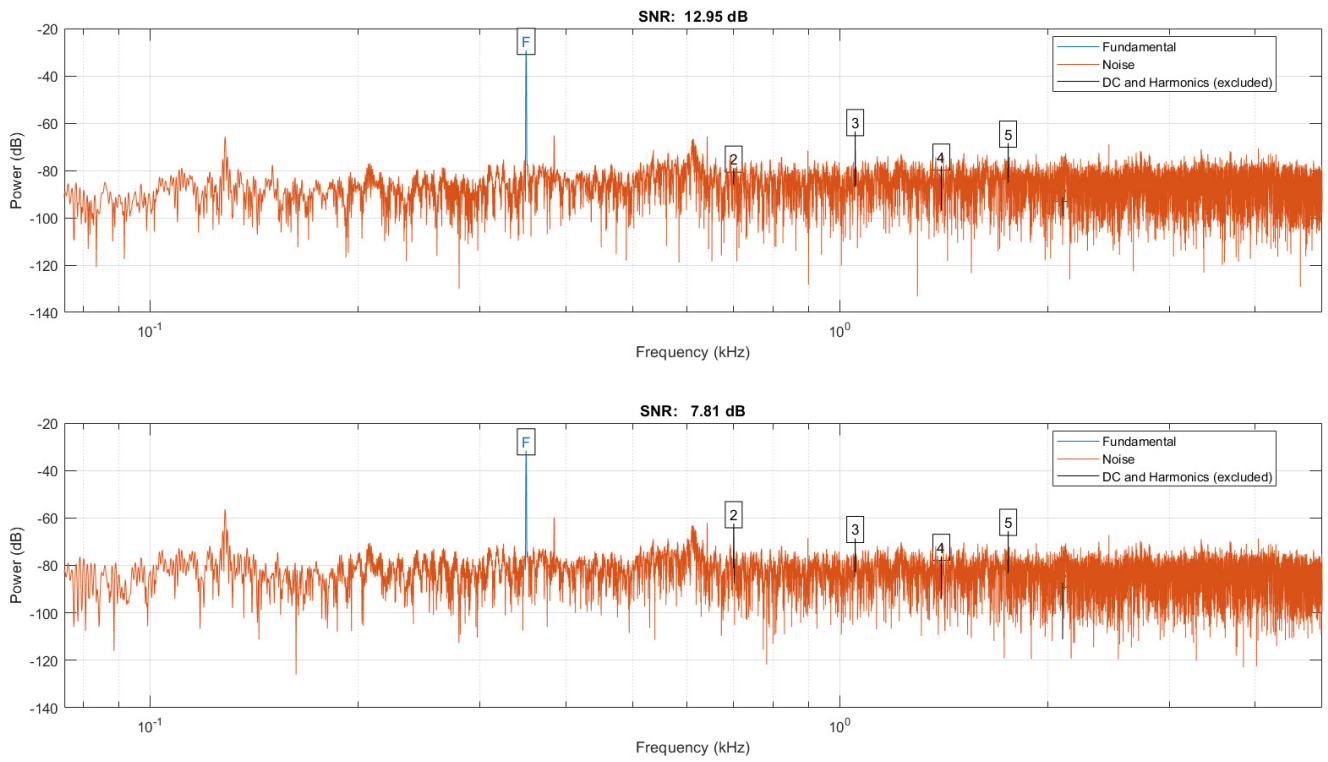


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.52: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 300 Hz en ambos dispositivos.

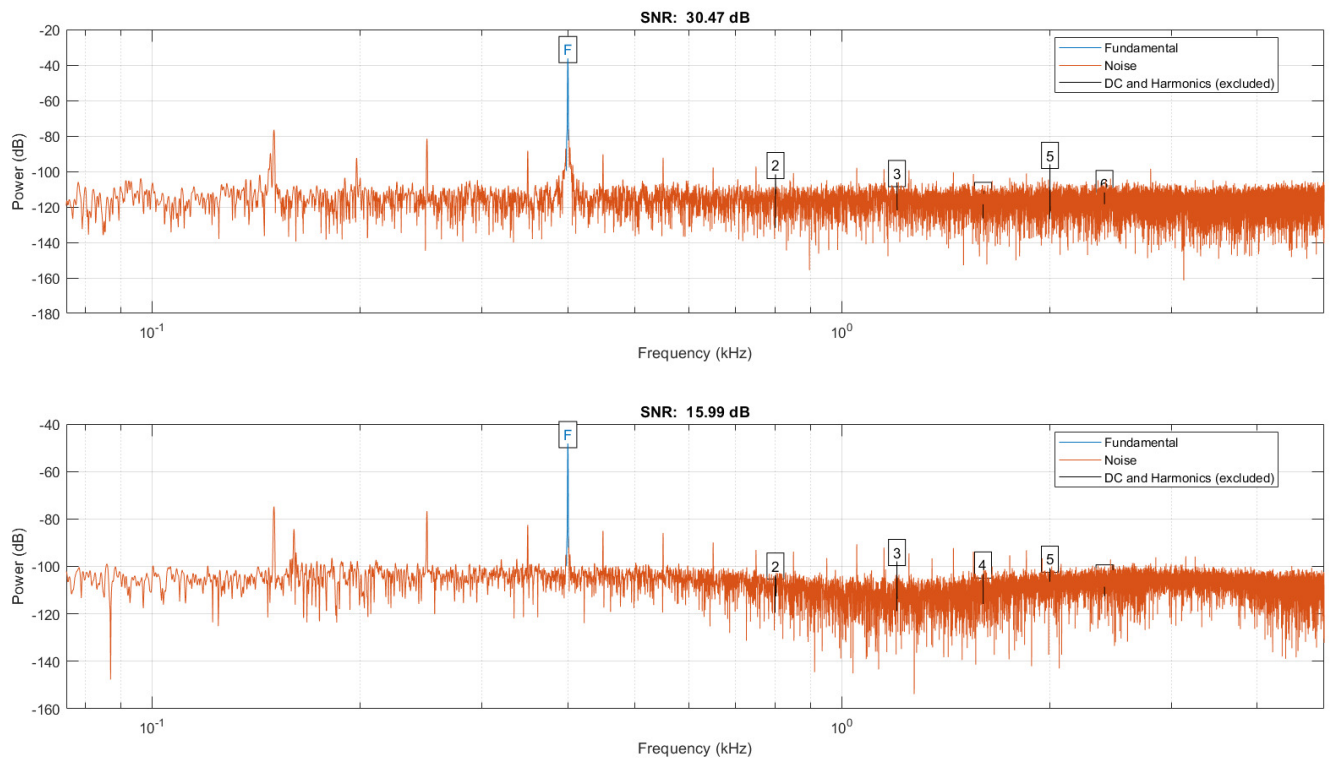


(a) Resultados en versión anterior.

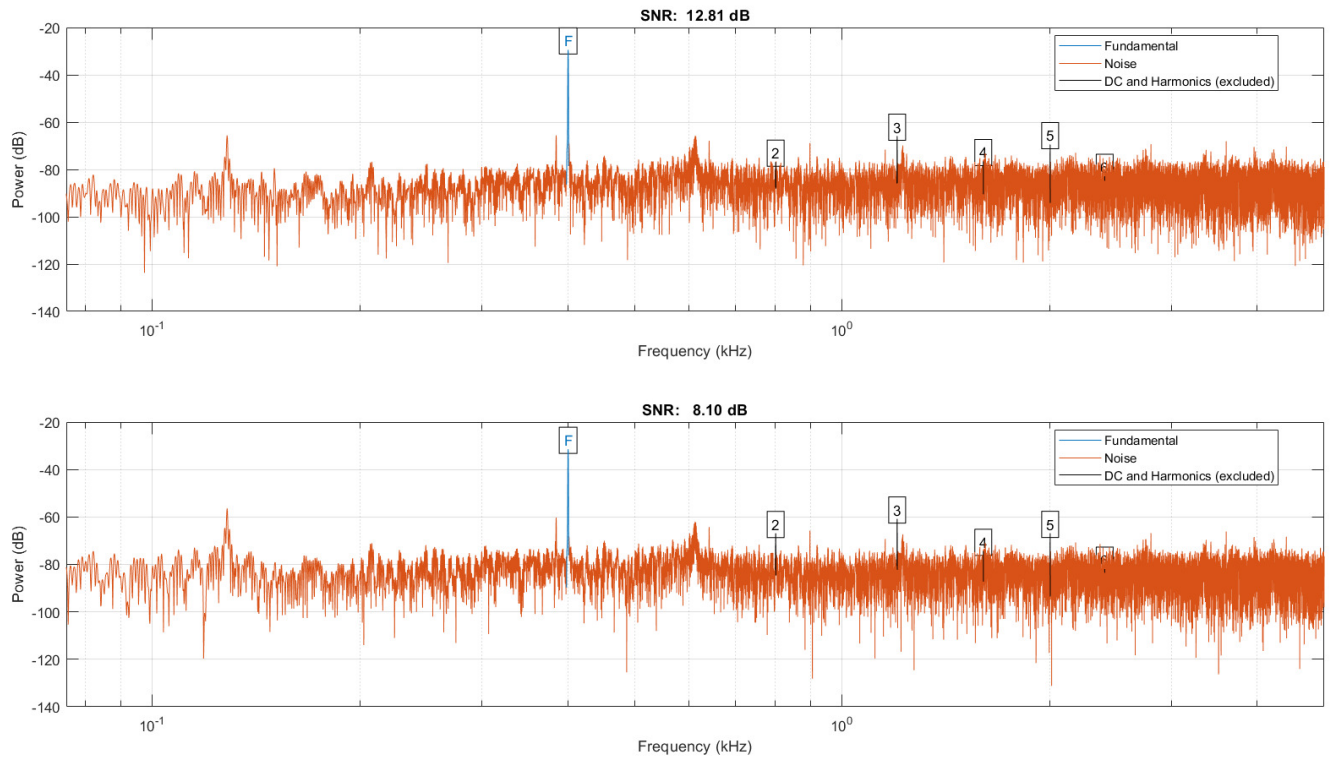


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.53: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 350 Hz en ambos dispositivos.

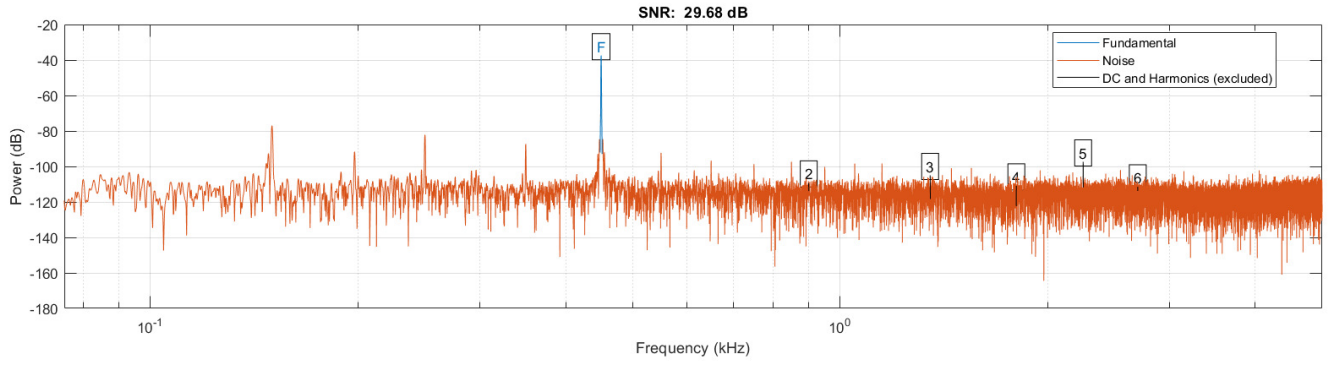


(a) Resultados en versión anterior.

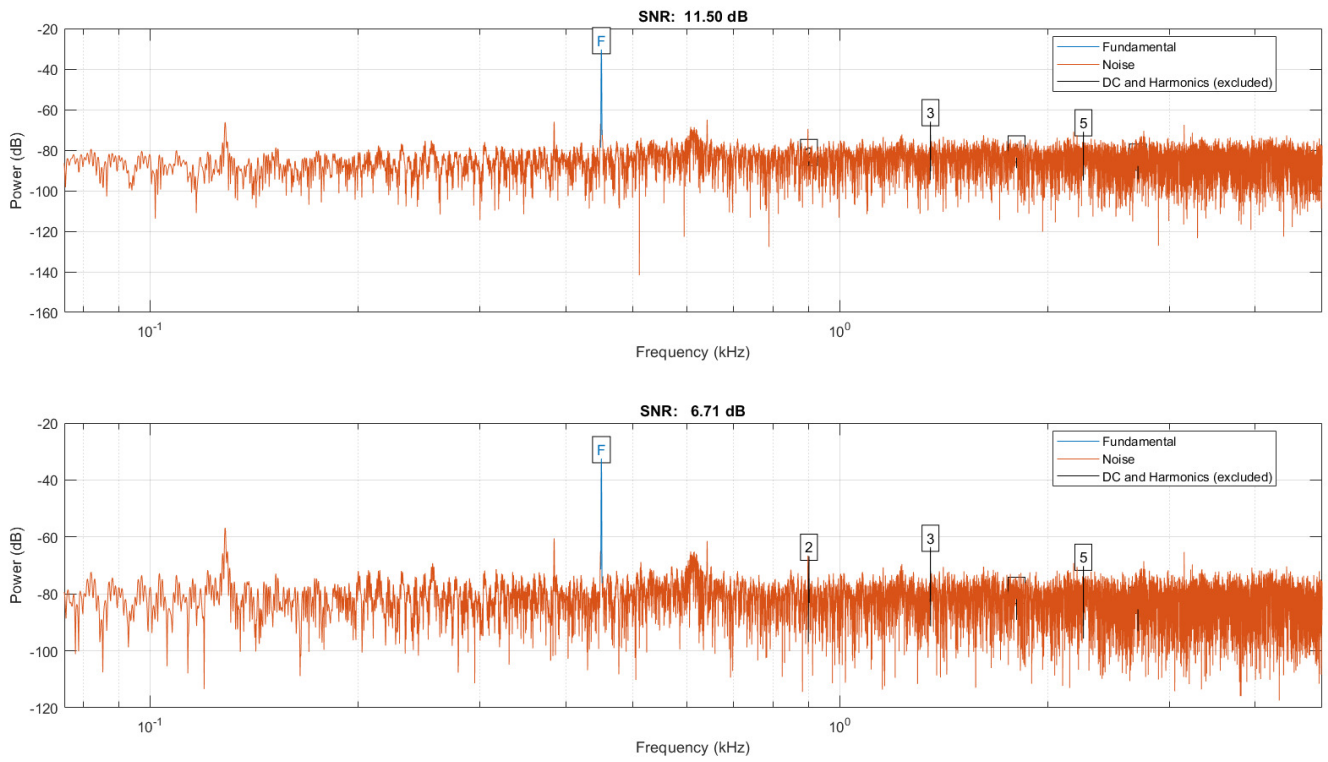


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.54: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 400 Hz en ambos dispositivos.

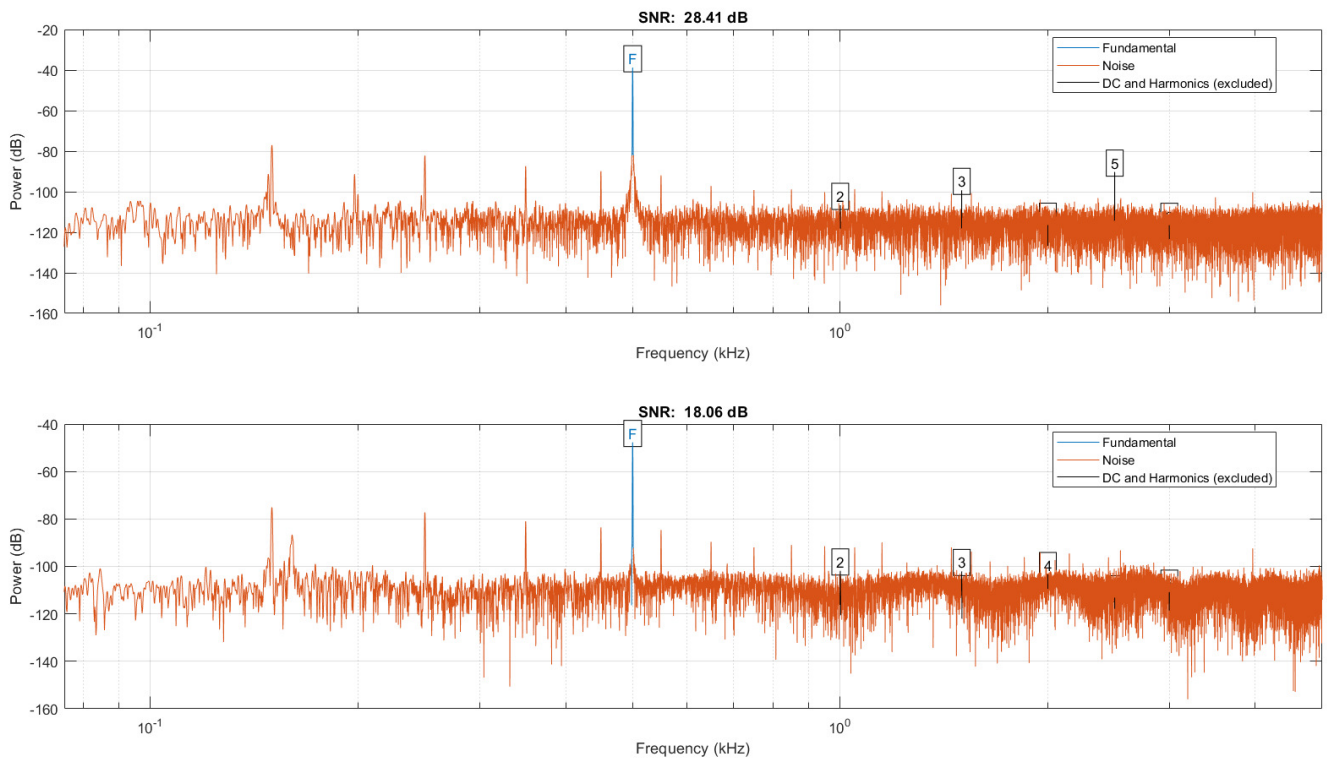


(a) Resultados en versión anterior.

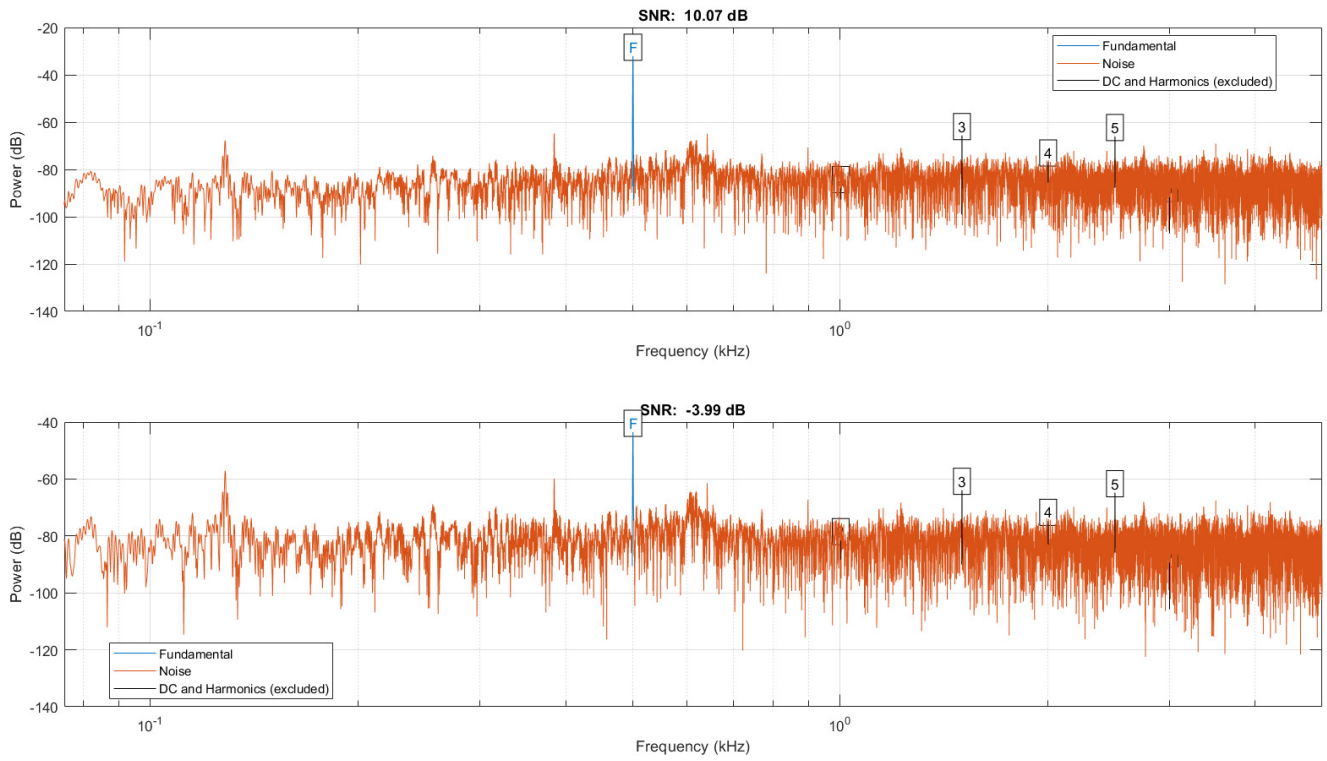


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.55: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 450 Hz en ambos dispositivos.

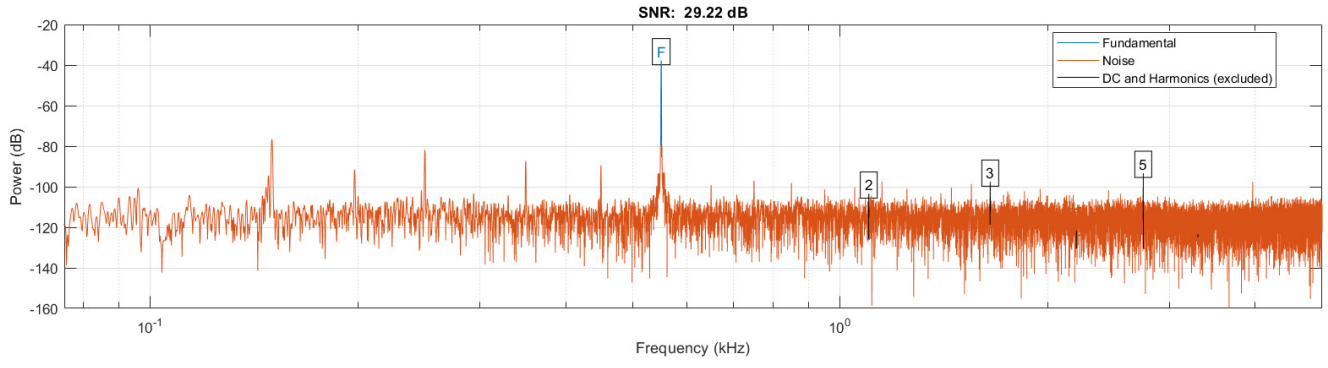


(a) Resultados en versión anterior.

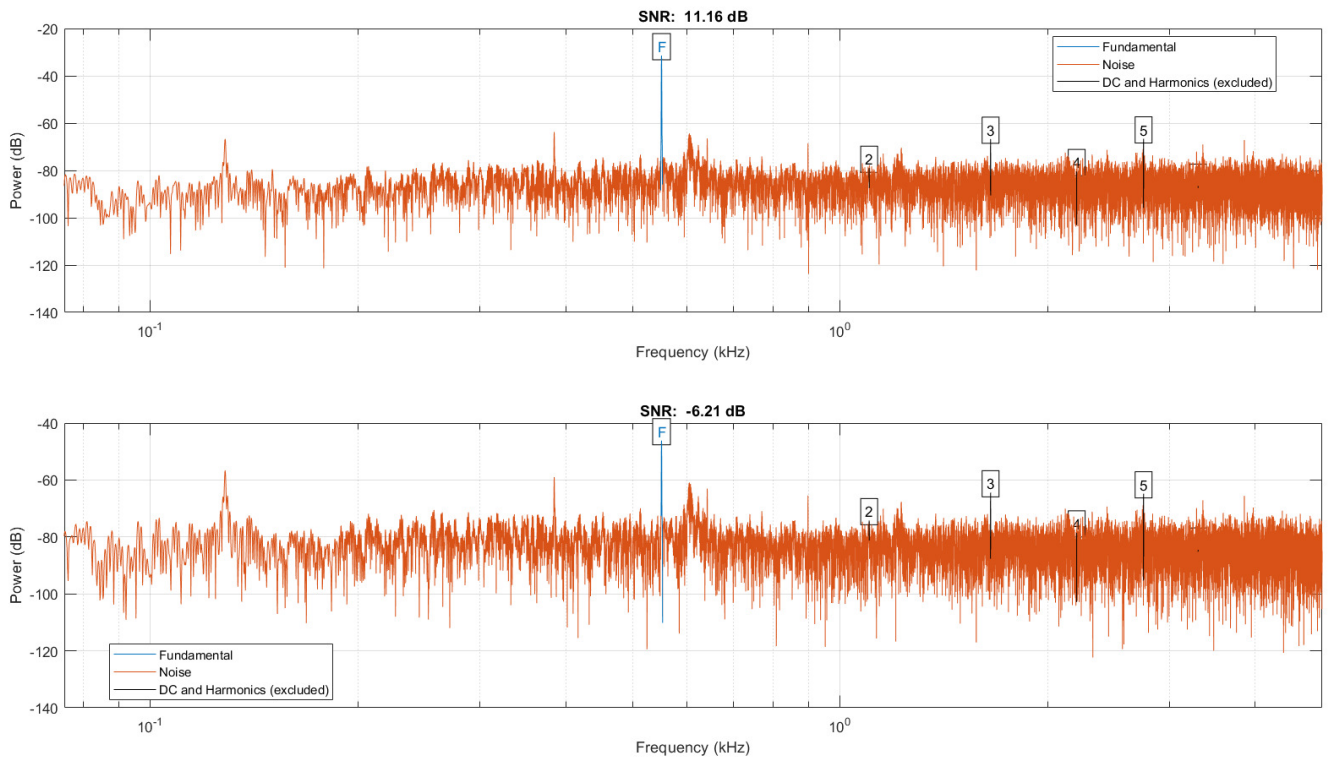


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.56: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 500 Hz en ambos dispositivos.

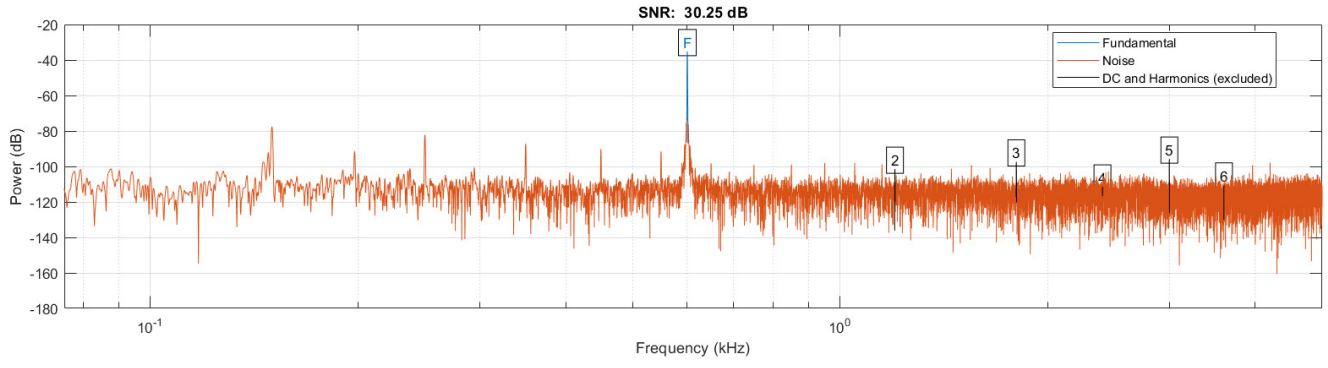


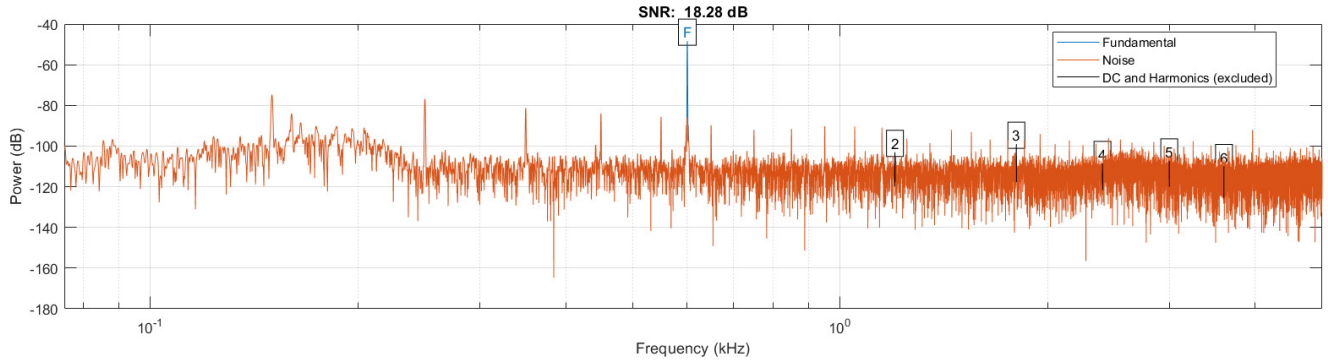
(a) Resultados en versión anterior.



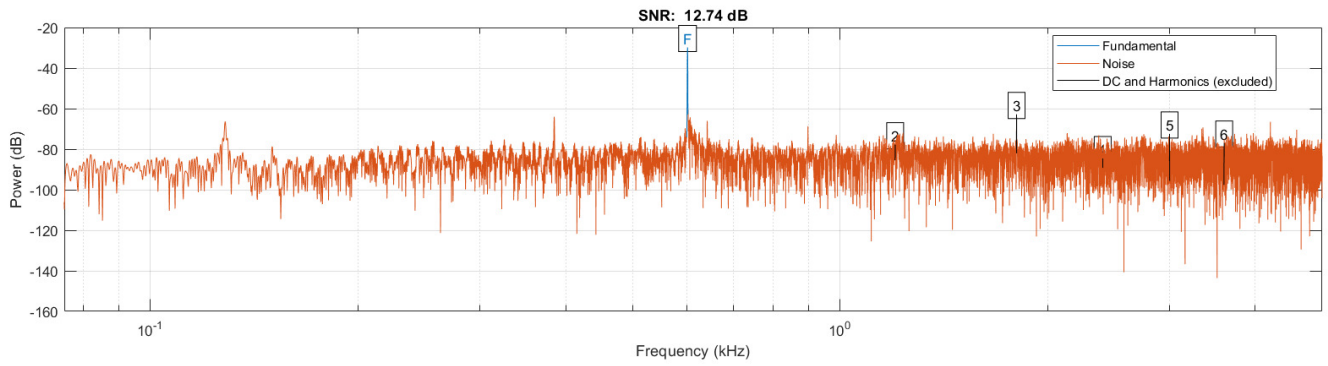
(b) Resultados en versión nueva.

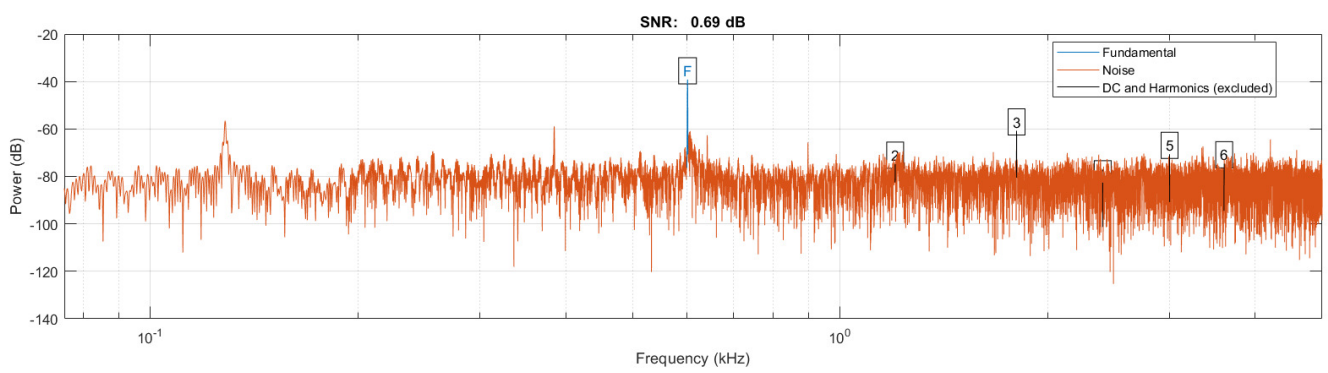
Figura 7.57: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 550 Hz en ambos dispositivos.





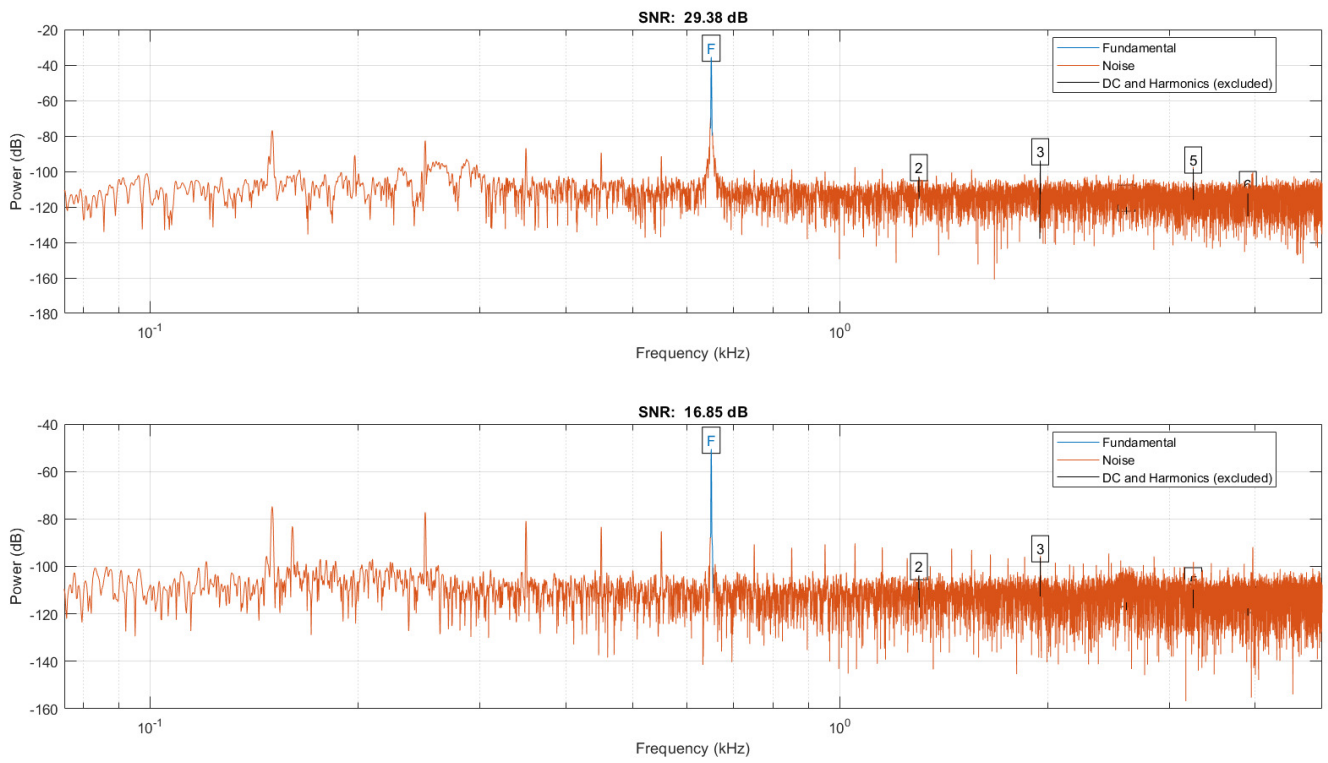
(a) Resultados en versión anterior.



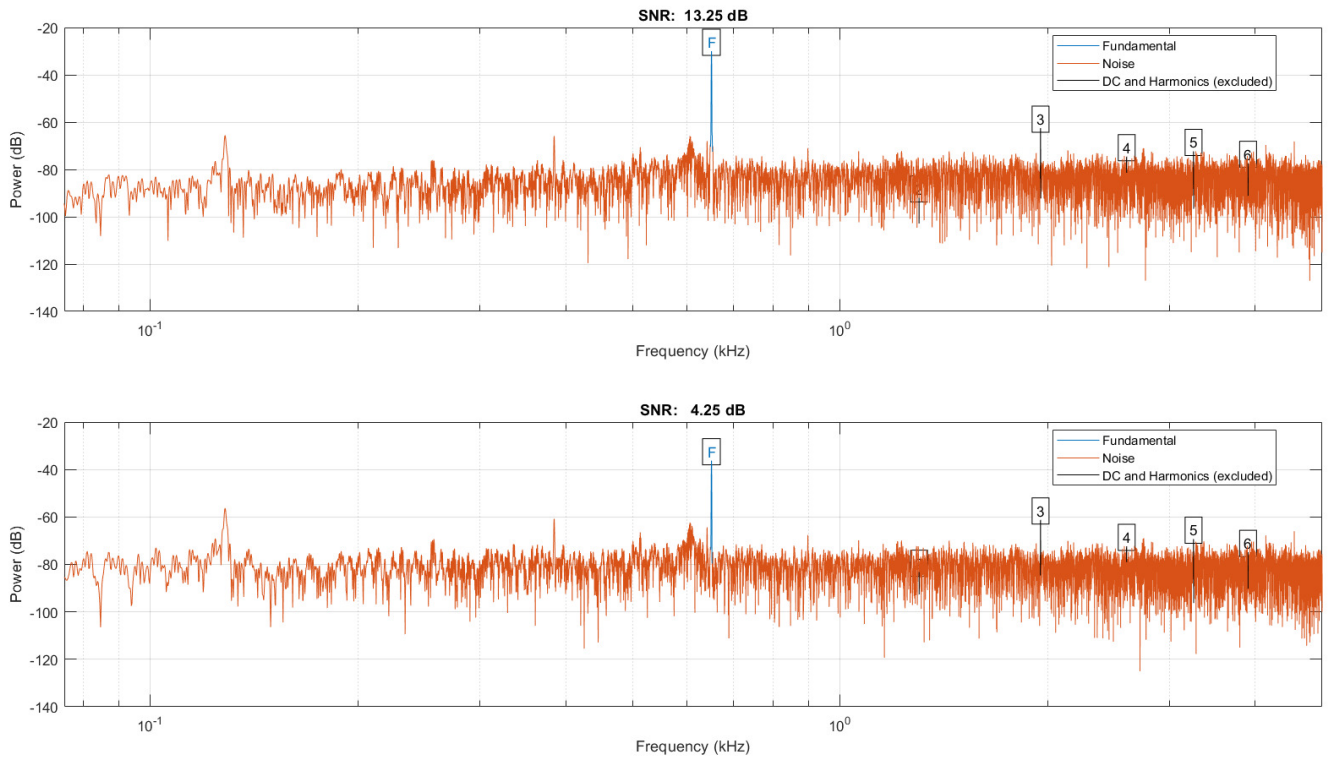


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.58: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 600 Hz en ambos dispositivos.

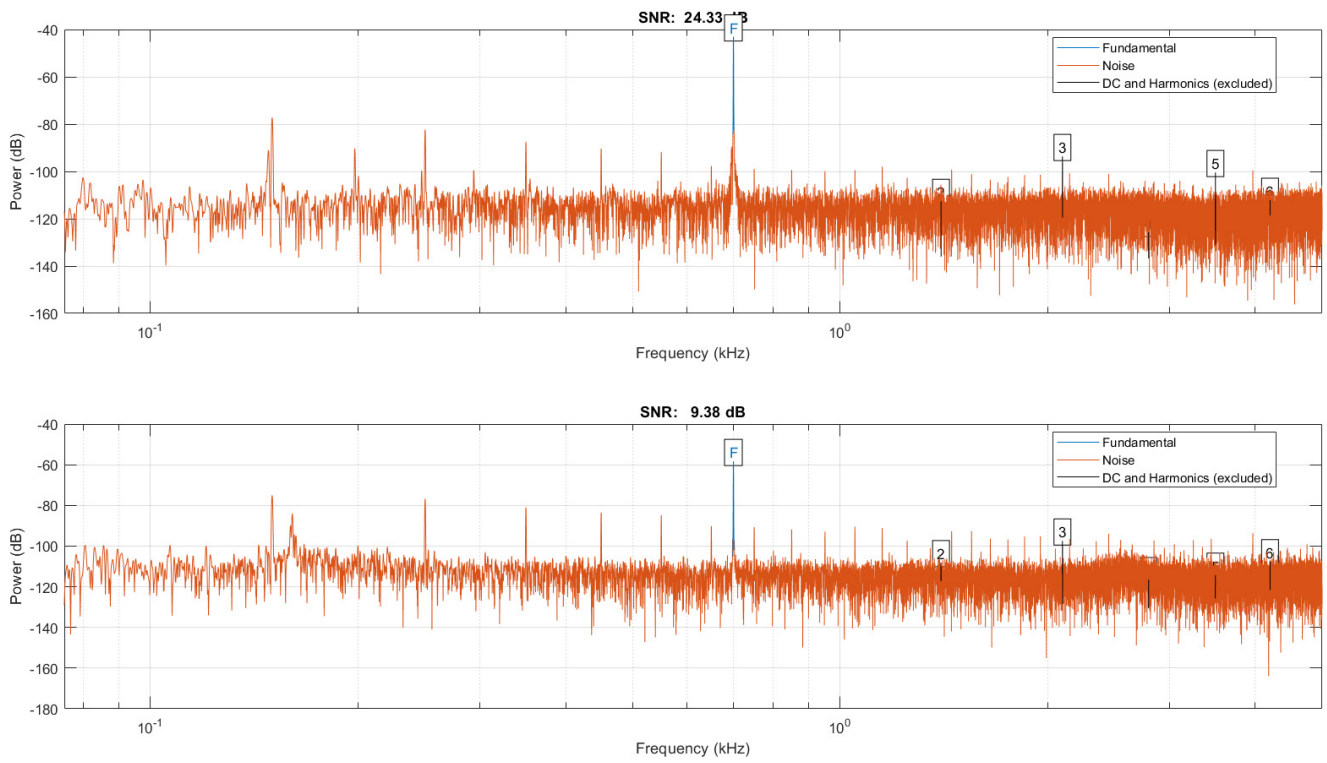


(a) Resultados en versión anterior.

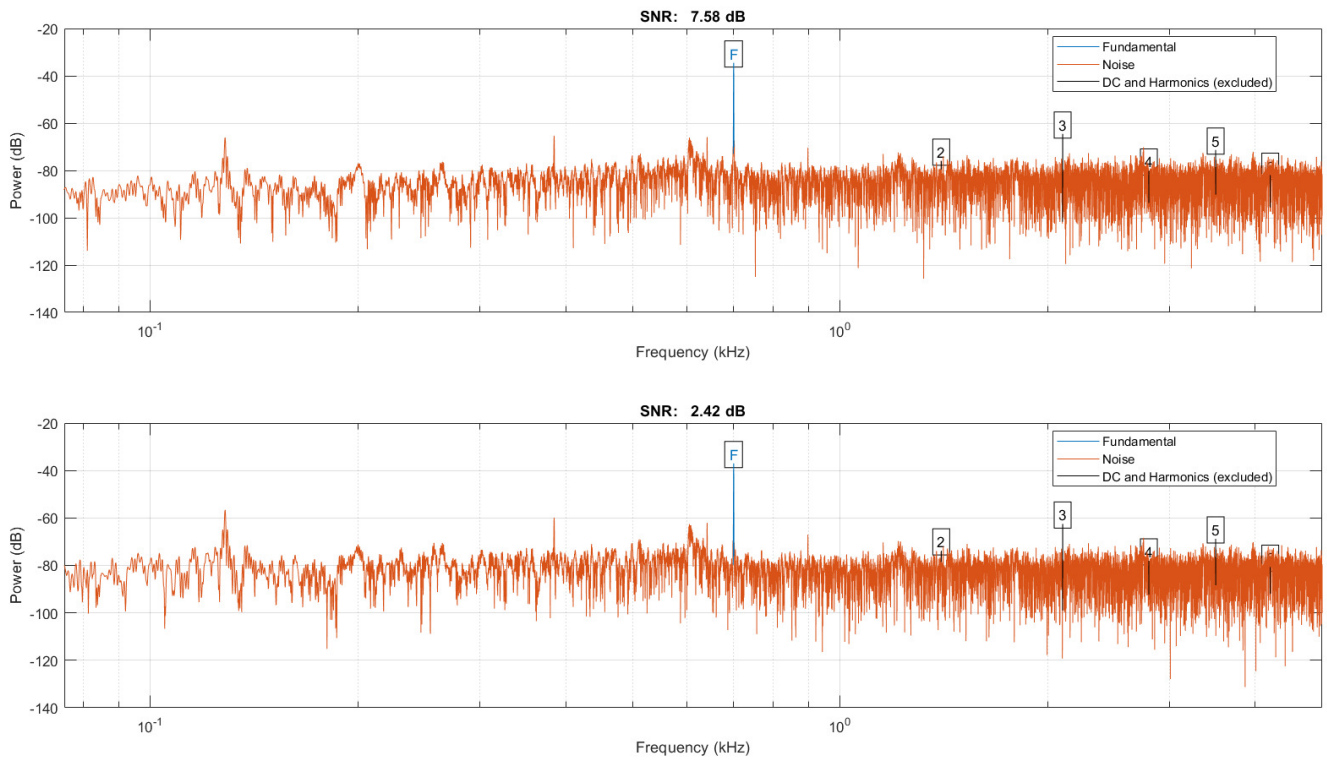


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.59: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 650 Hz en ambos dispositivos.

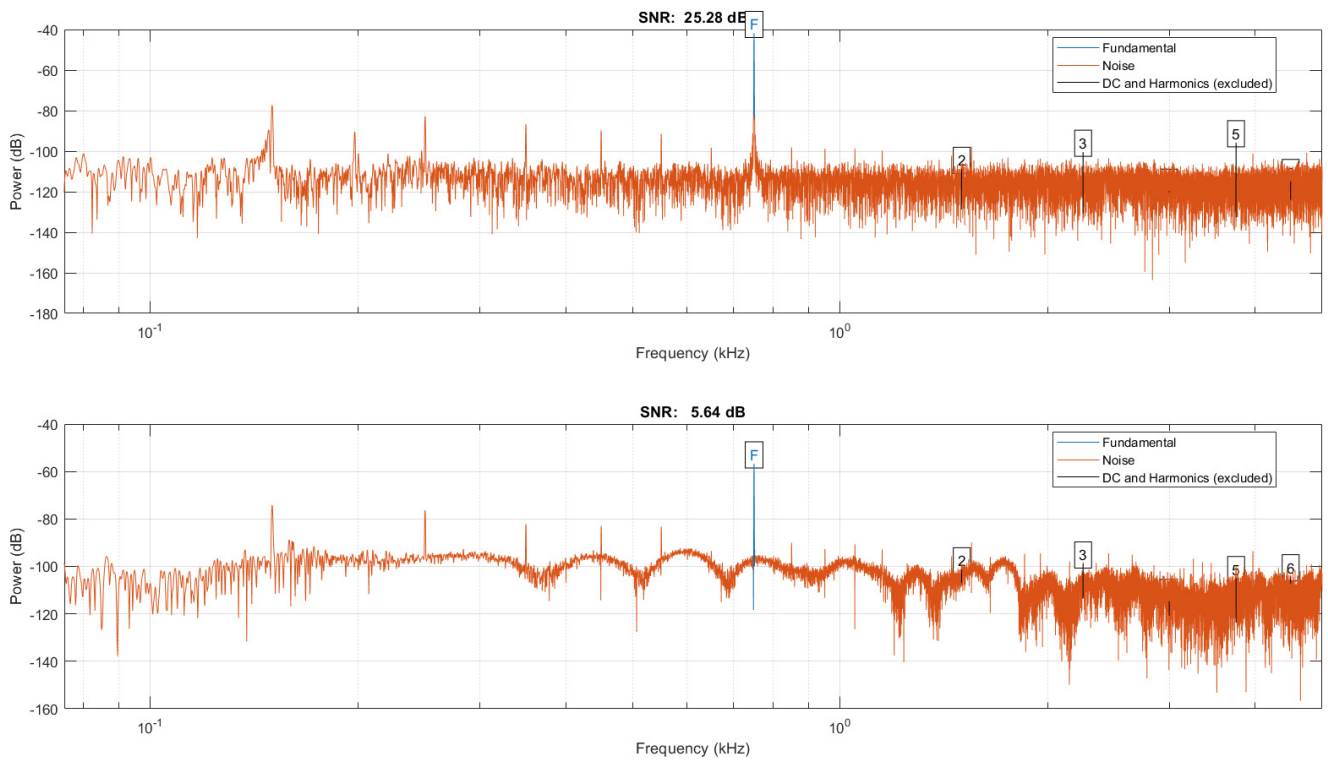


(a) Resultados en versión anterior.

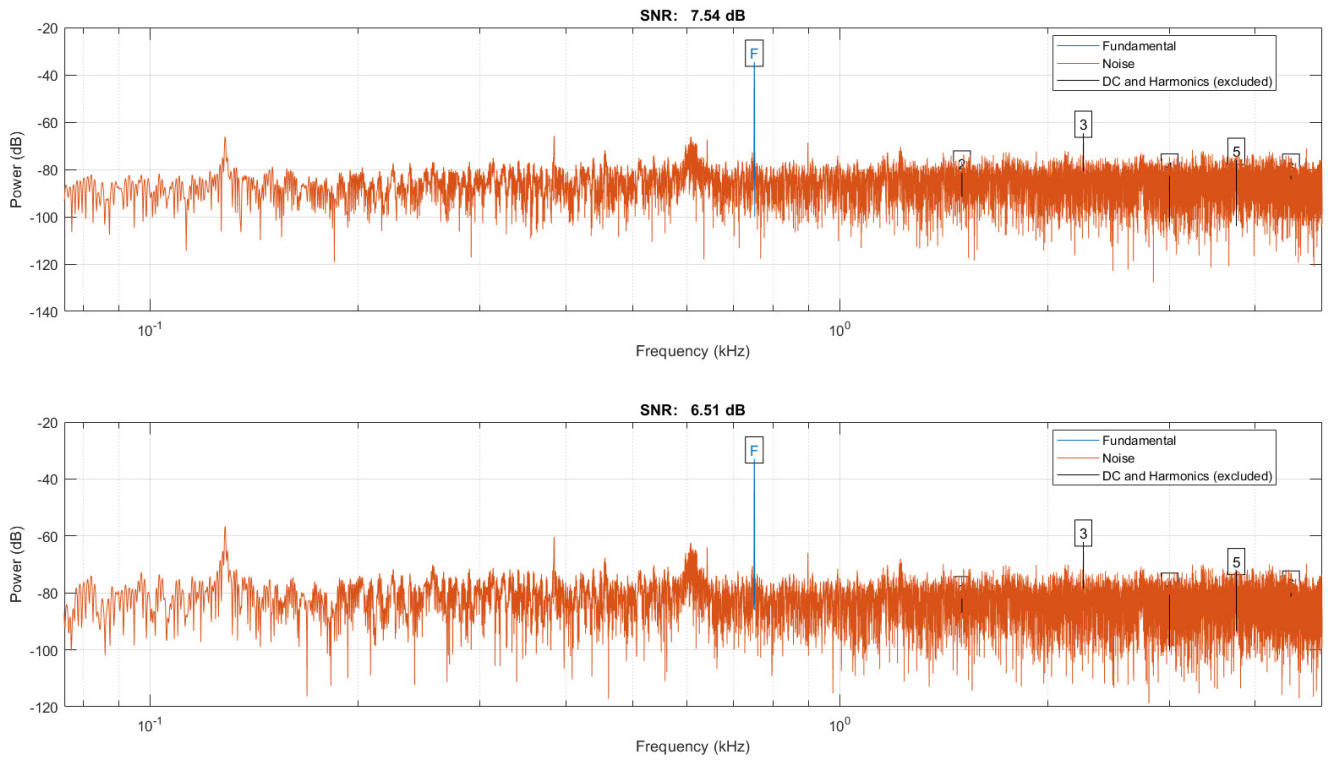


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.60: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 700 Hz en ambos dispositivos.

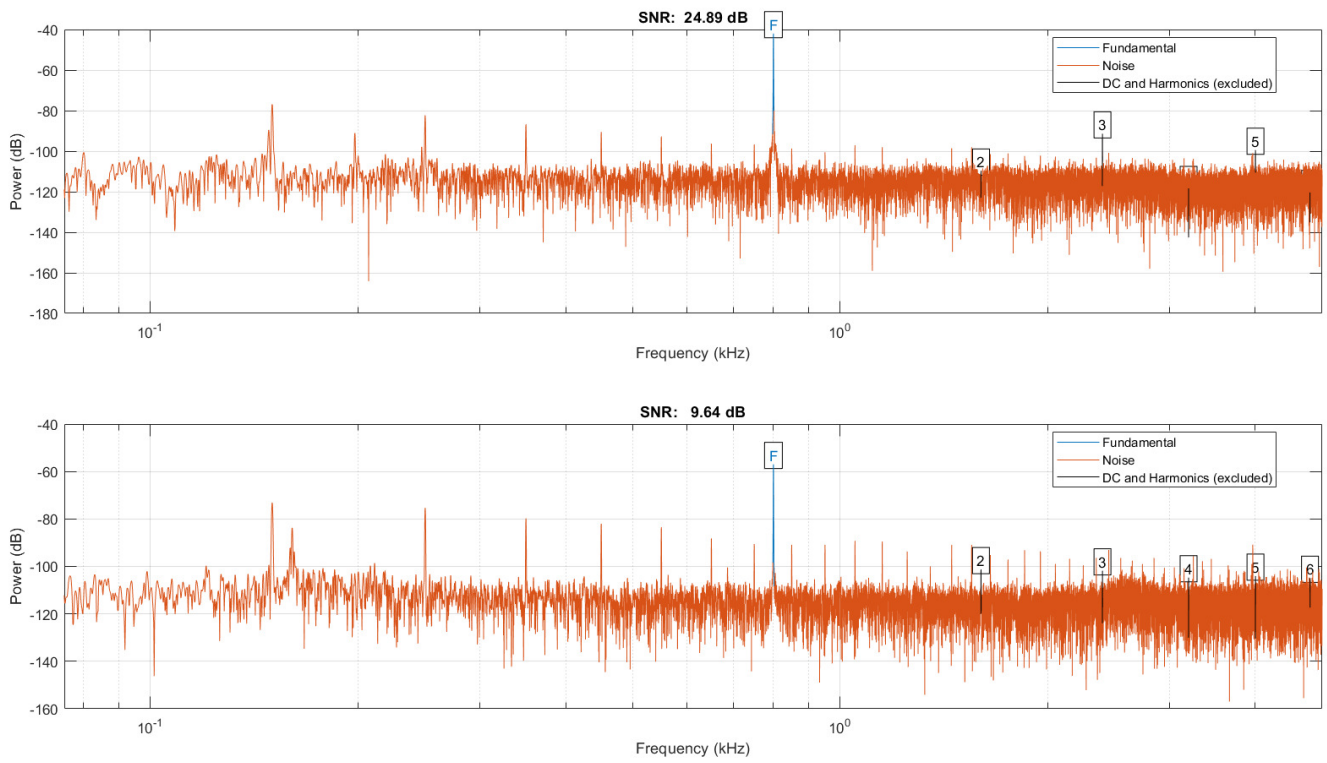


(a) Resultados en versión anterior.

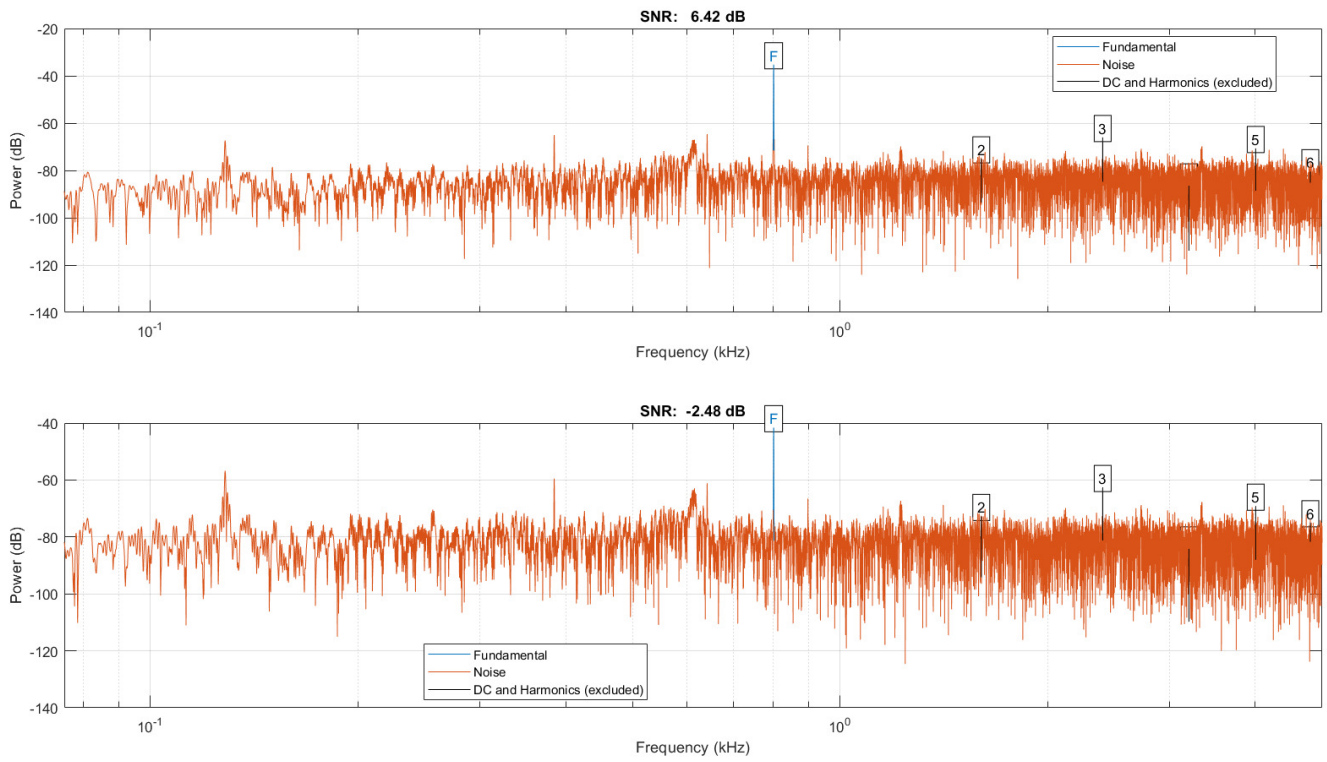


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.61: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 750 Hz en ambos dispositivos.

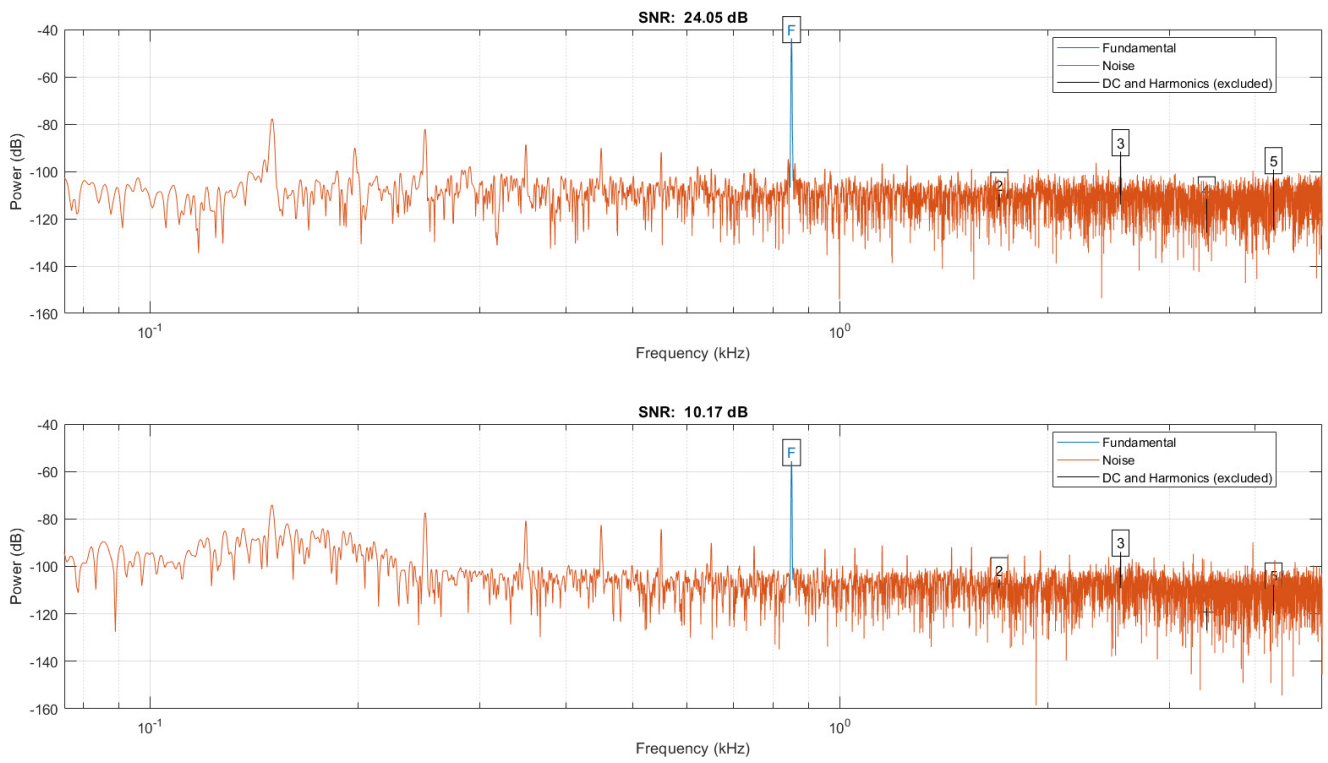


(a) Resultados en versión anterior.

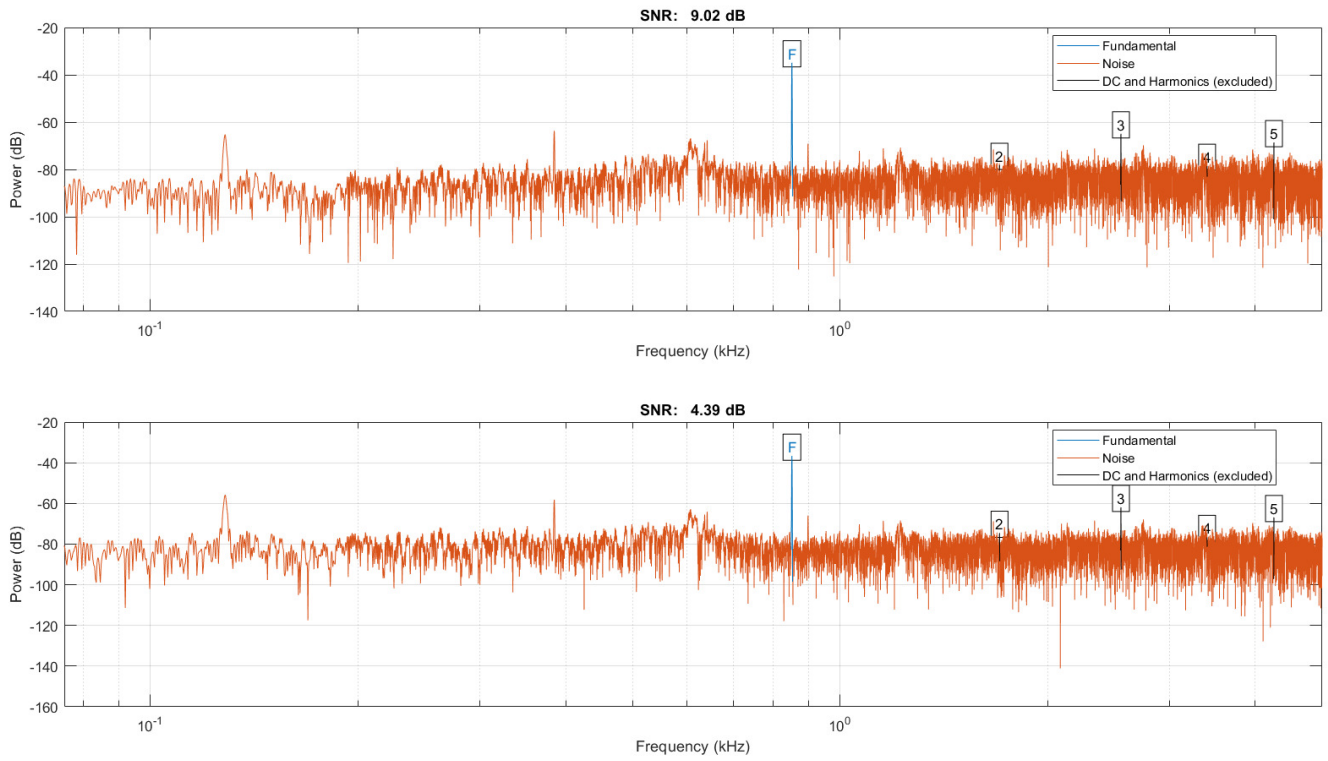


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.62: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 800 Hz en ambos dispositivos.

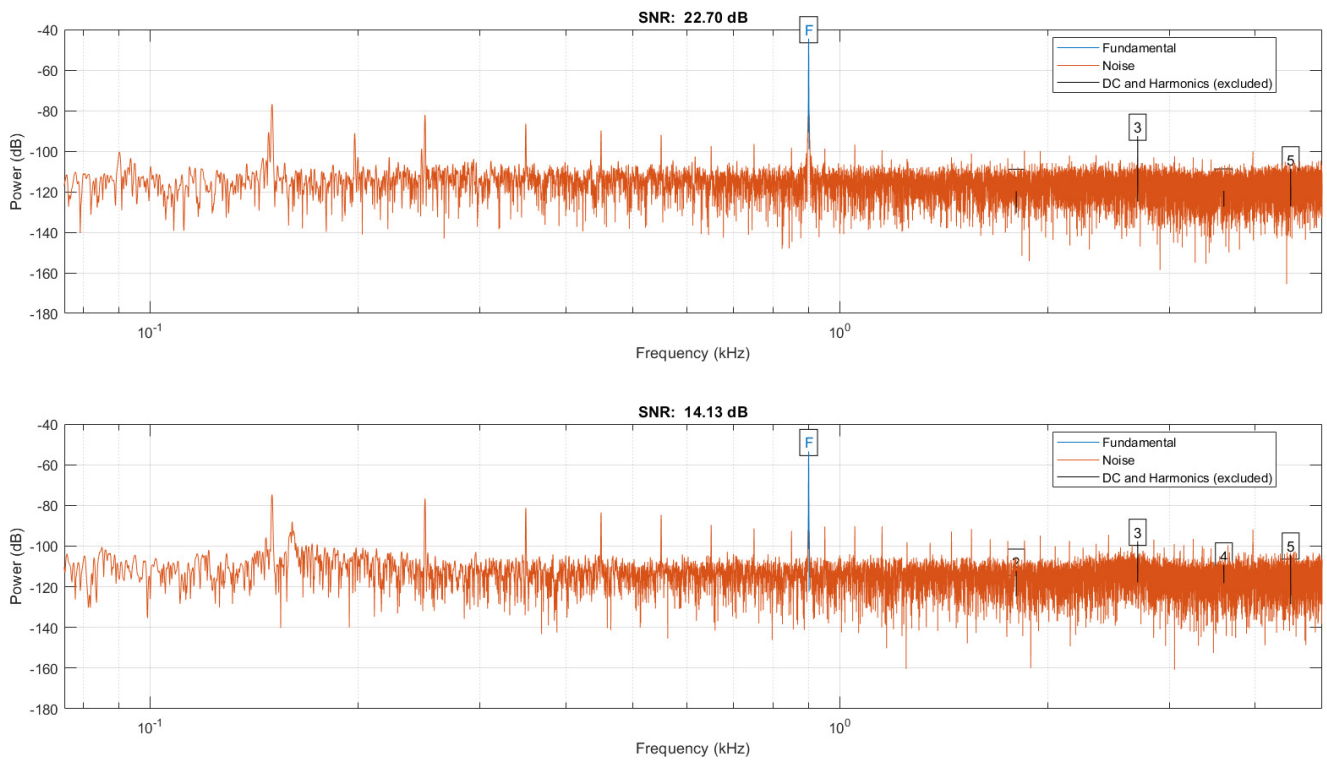


(a) Resultados en versión anterior.

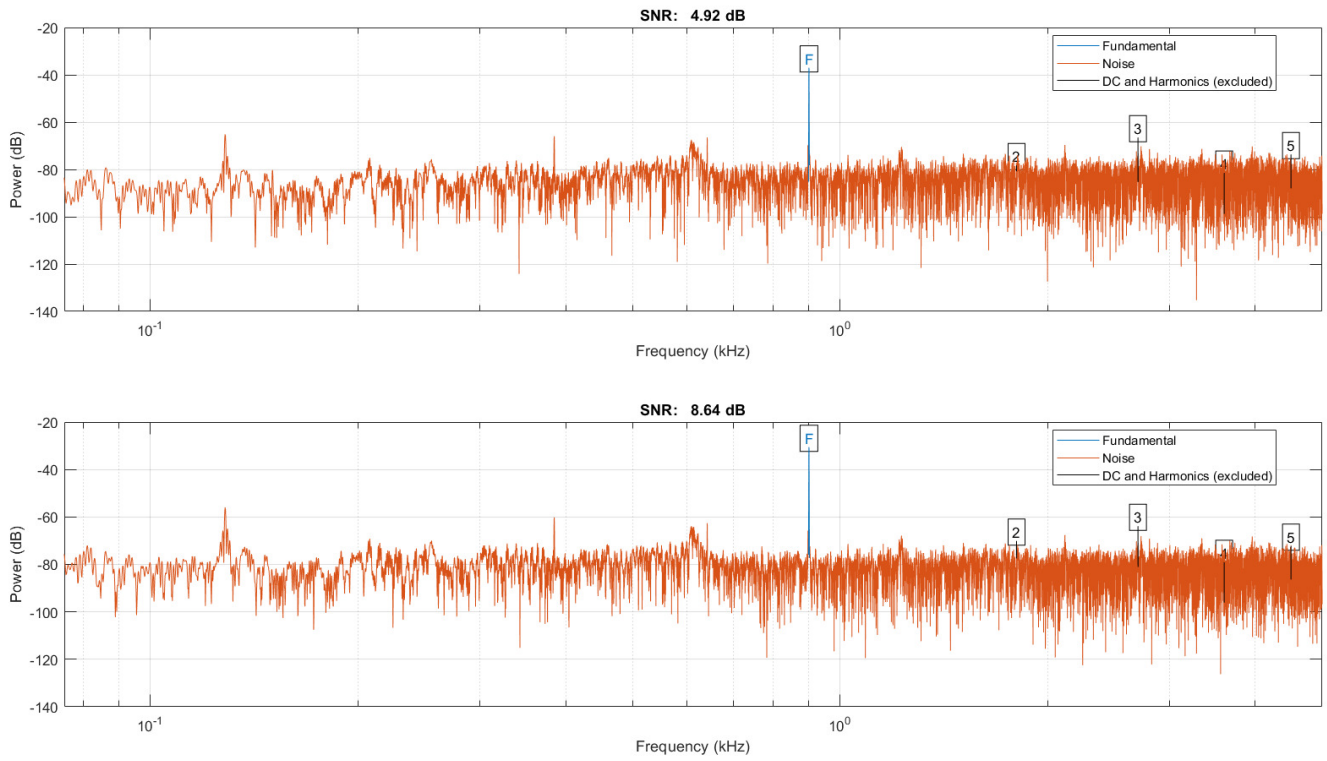


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.63: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 850 Hz en ambos dispositivos.

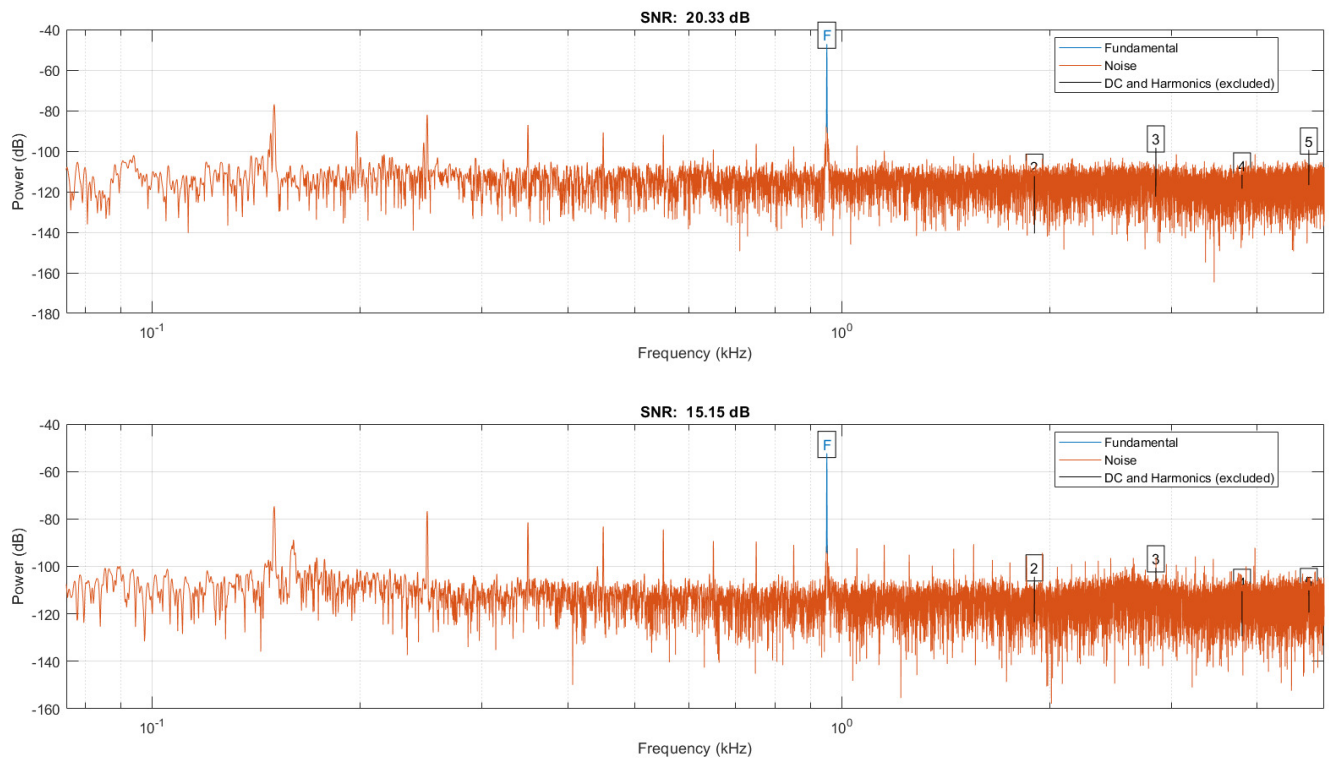


(a) Resultados en versión anterior.

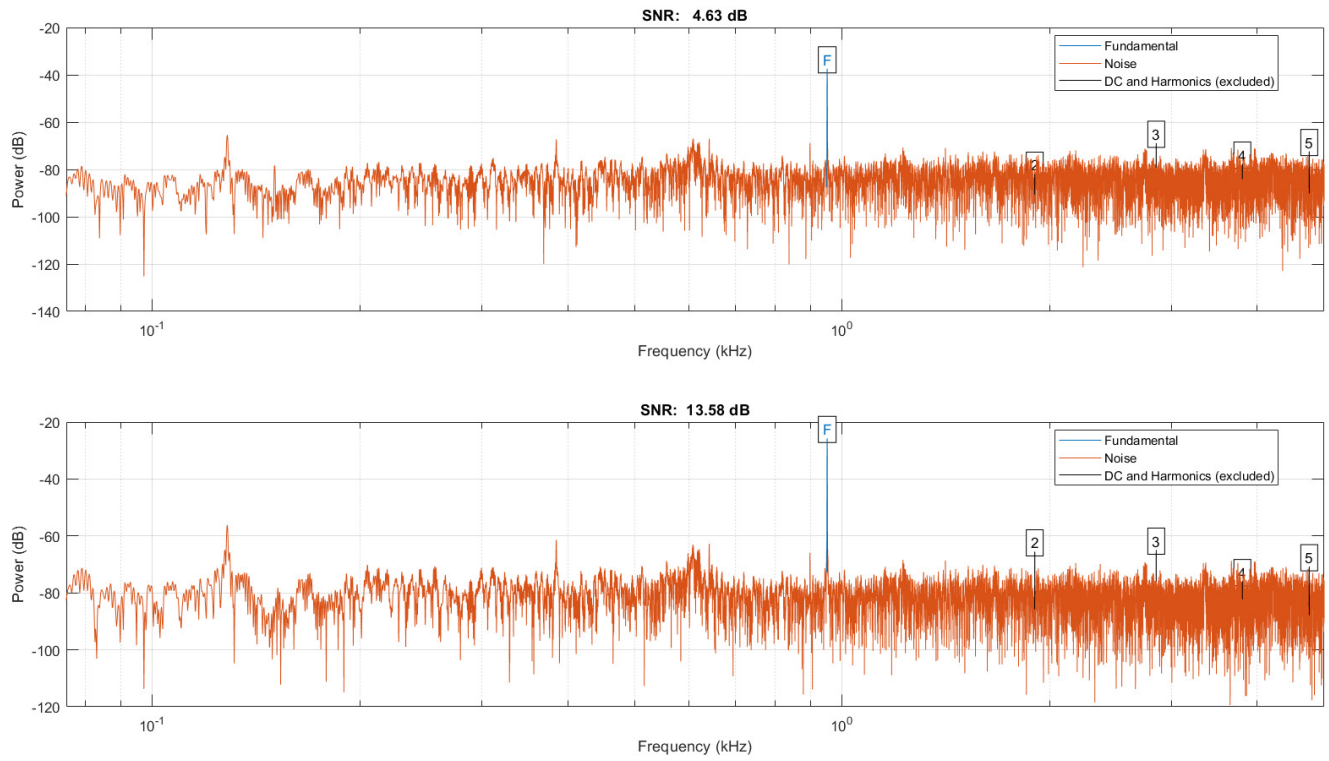


(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.64: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 900 Hz en ambos dispositivos.



(a) Resultados en versión anterior.



(b) Resultados en versión nueva.

Figura 7.65: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 950 Hz en ambos dispositivos.

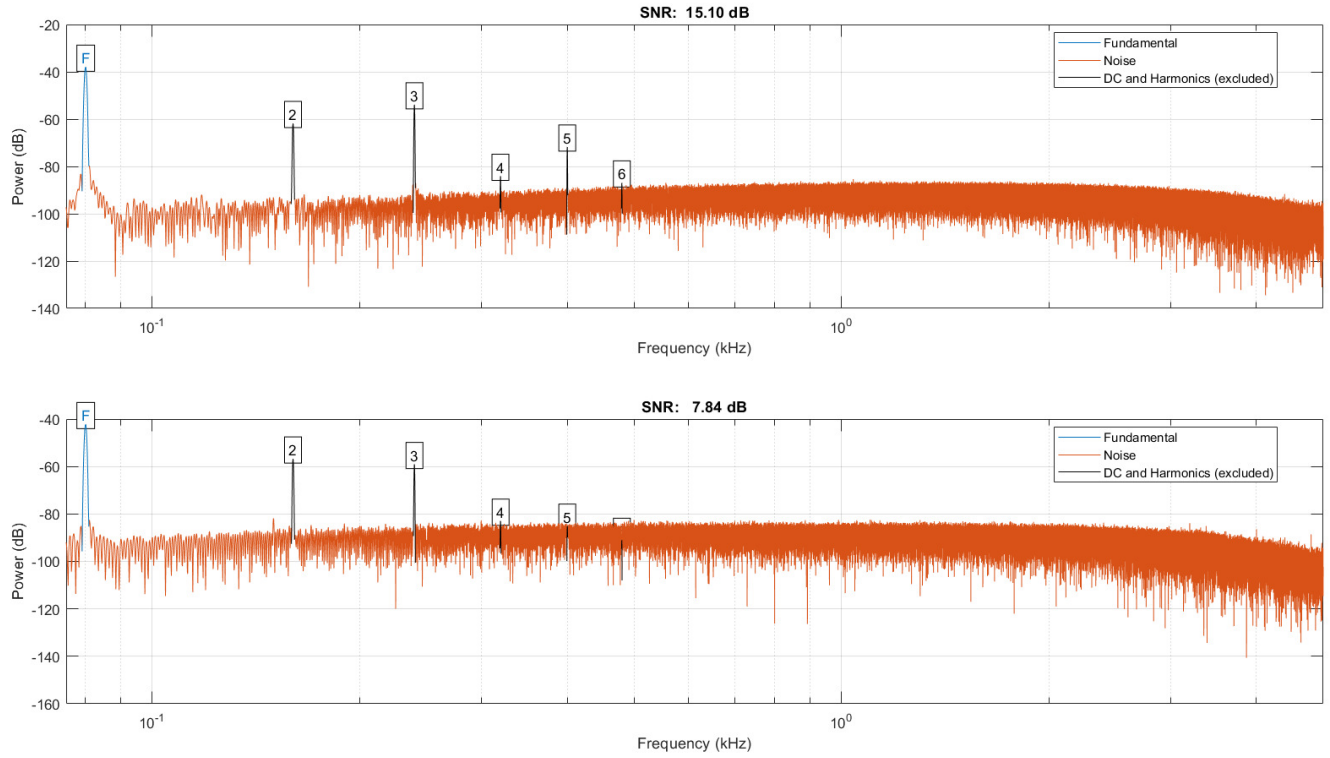


Figura 7.66: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 80 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

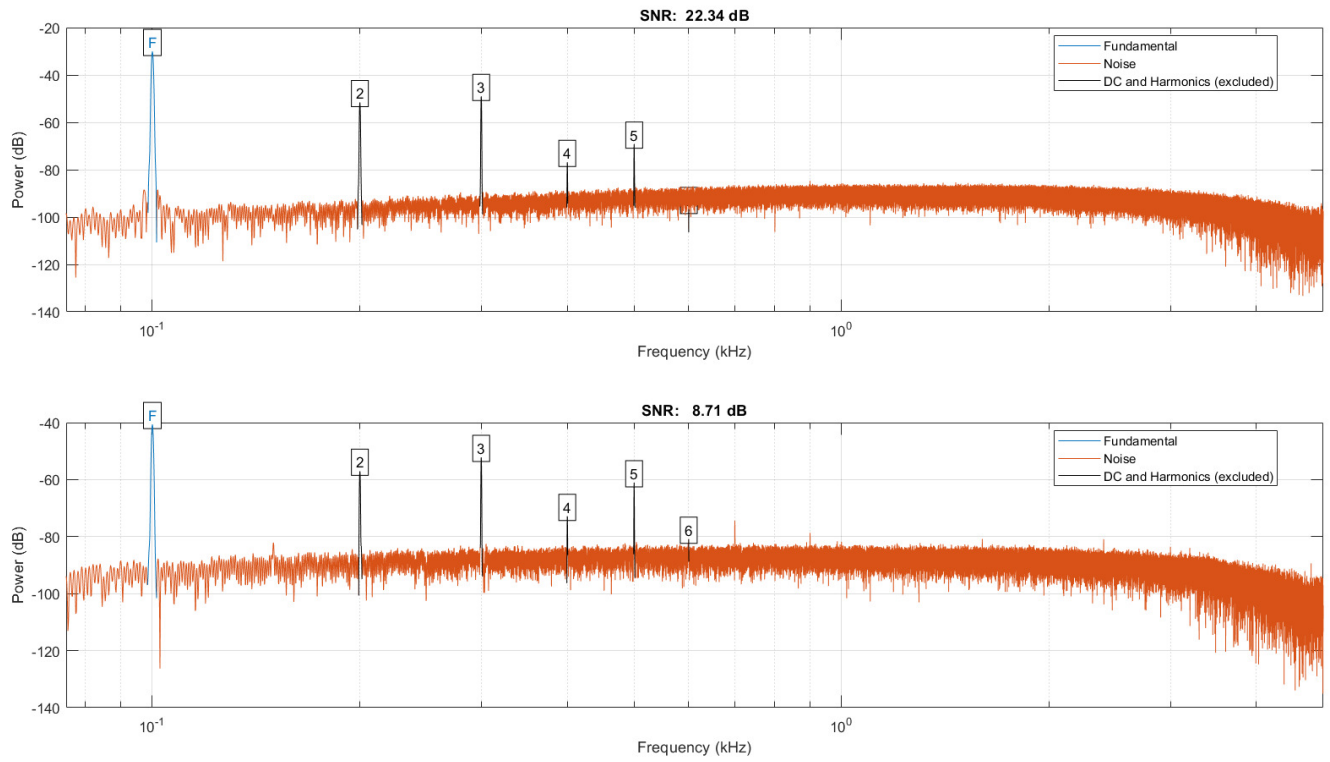


Figura 7.67: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 100 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

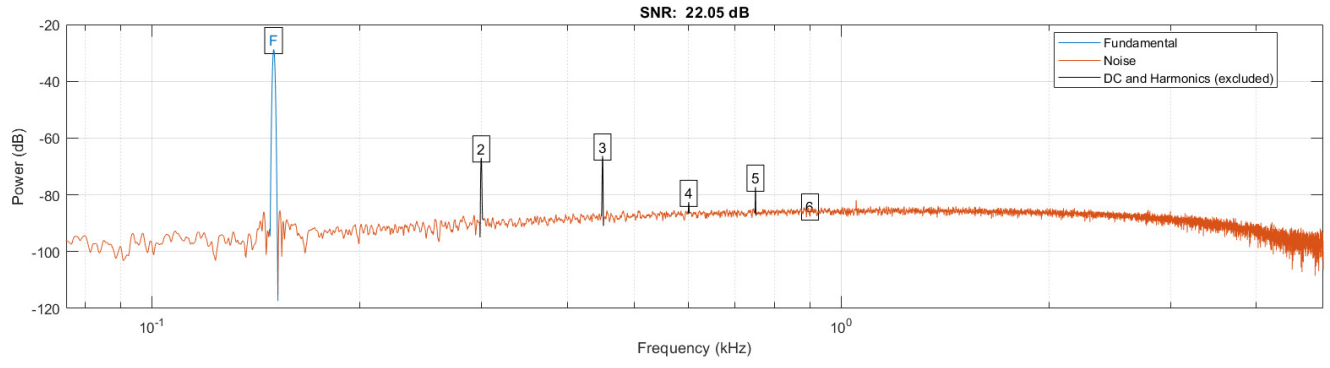


Figura 7.68: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 150 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

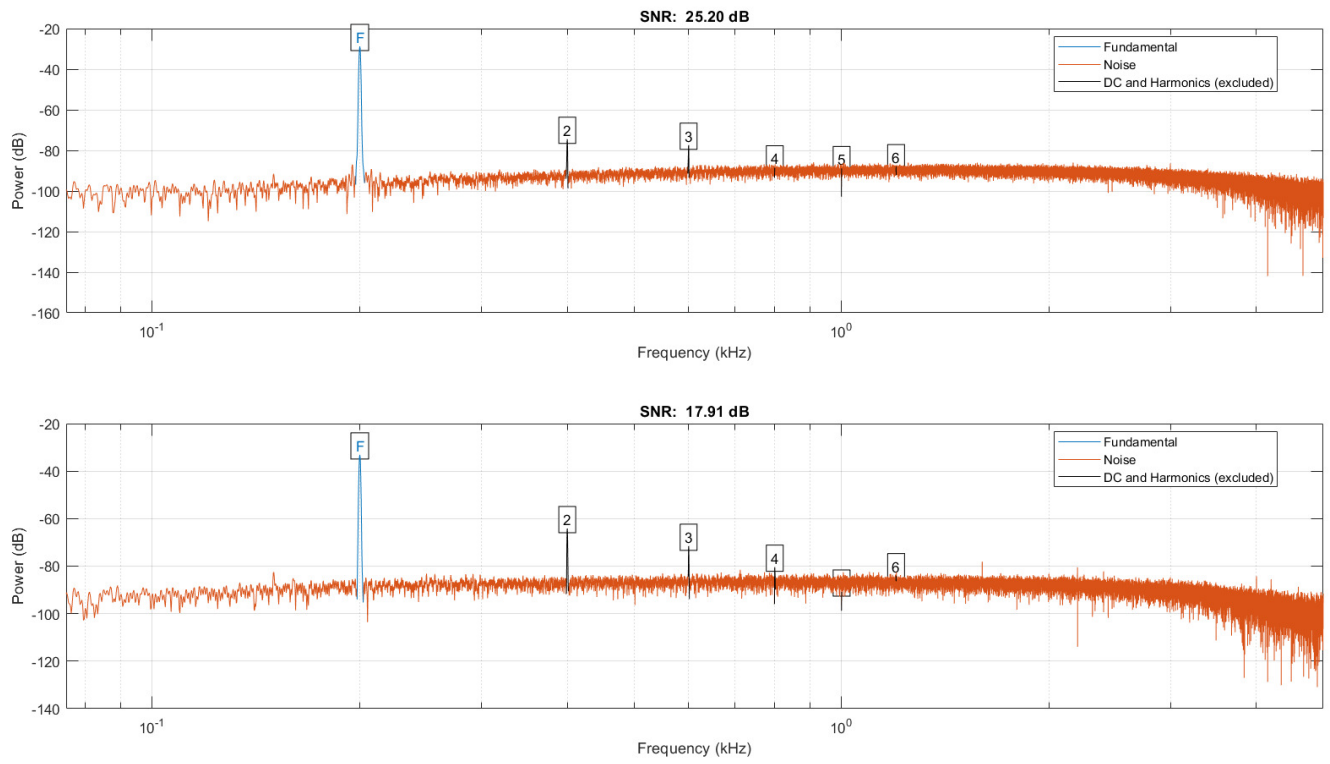
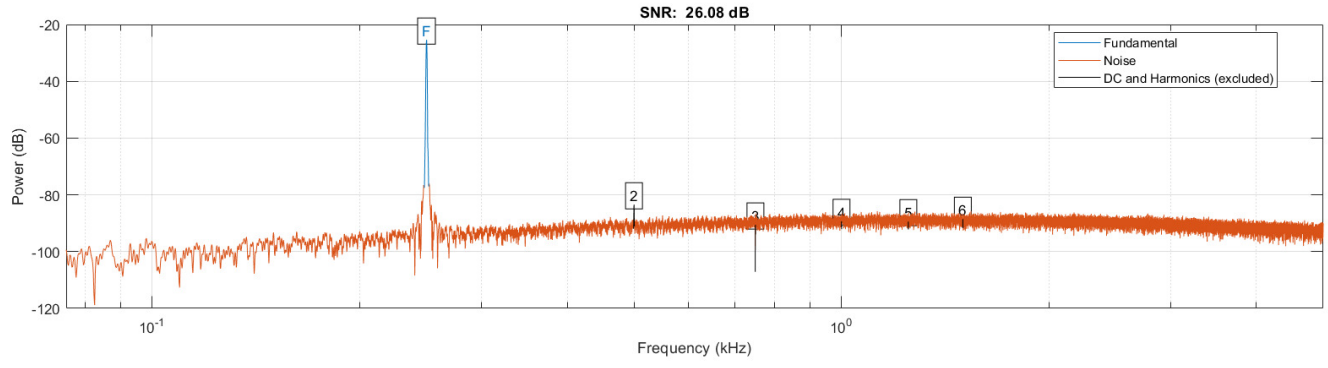


Figura 7.69: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 200 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.



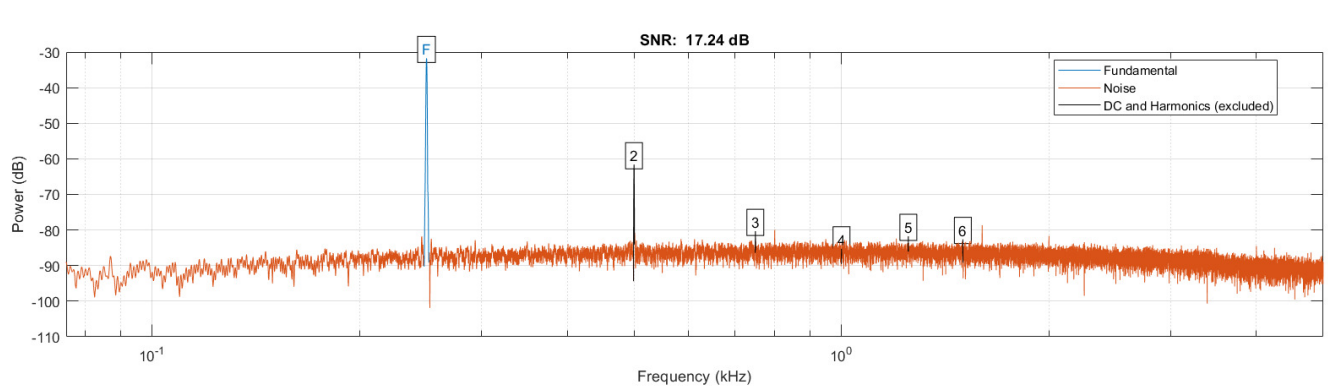
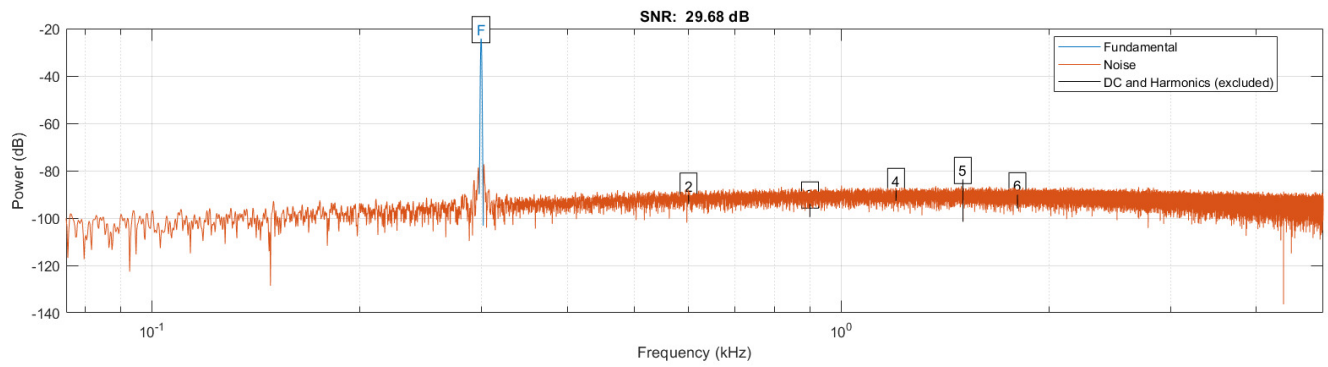


Figura 7.70: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 250 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.



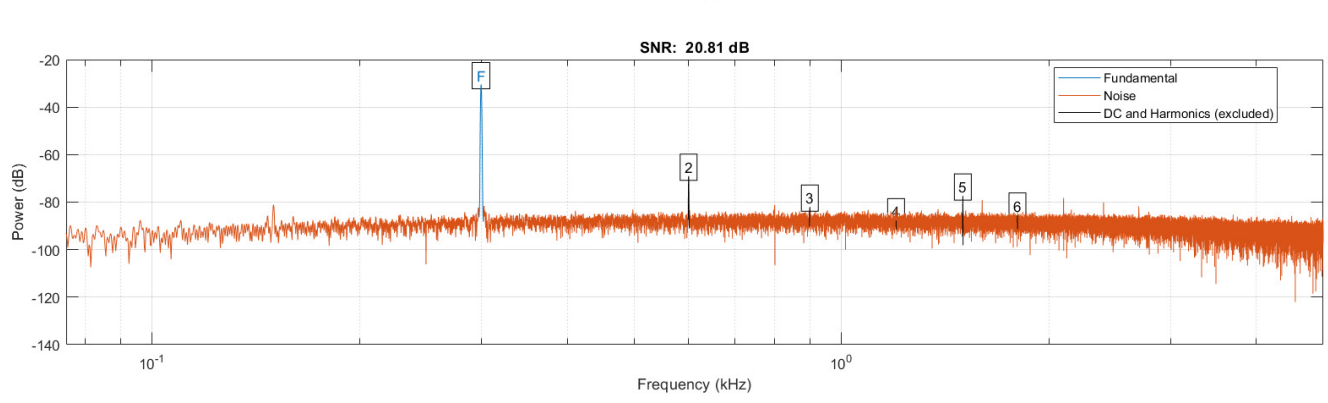


Figura 7.71: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 300 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

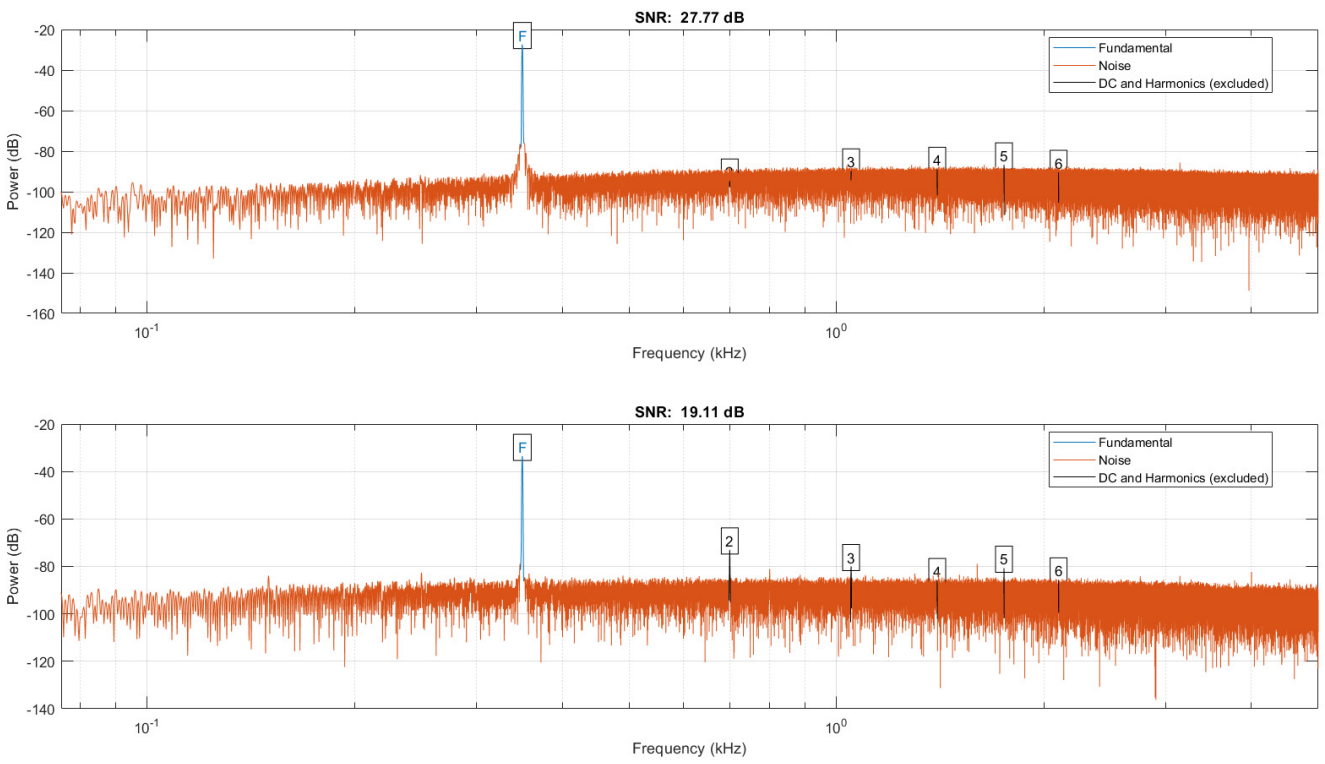


Figura 7.72: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 350 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

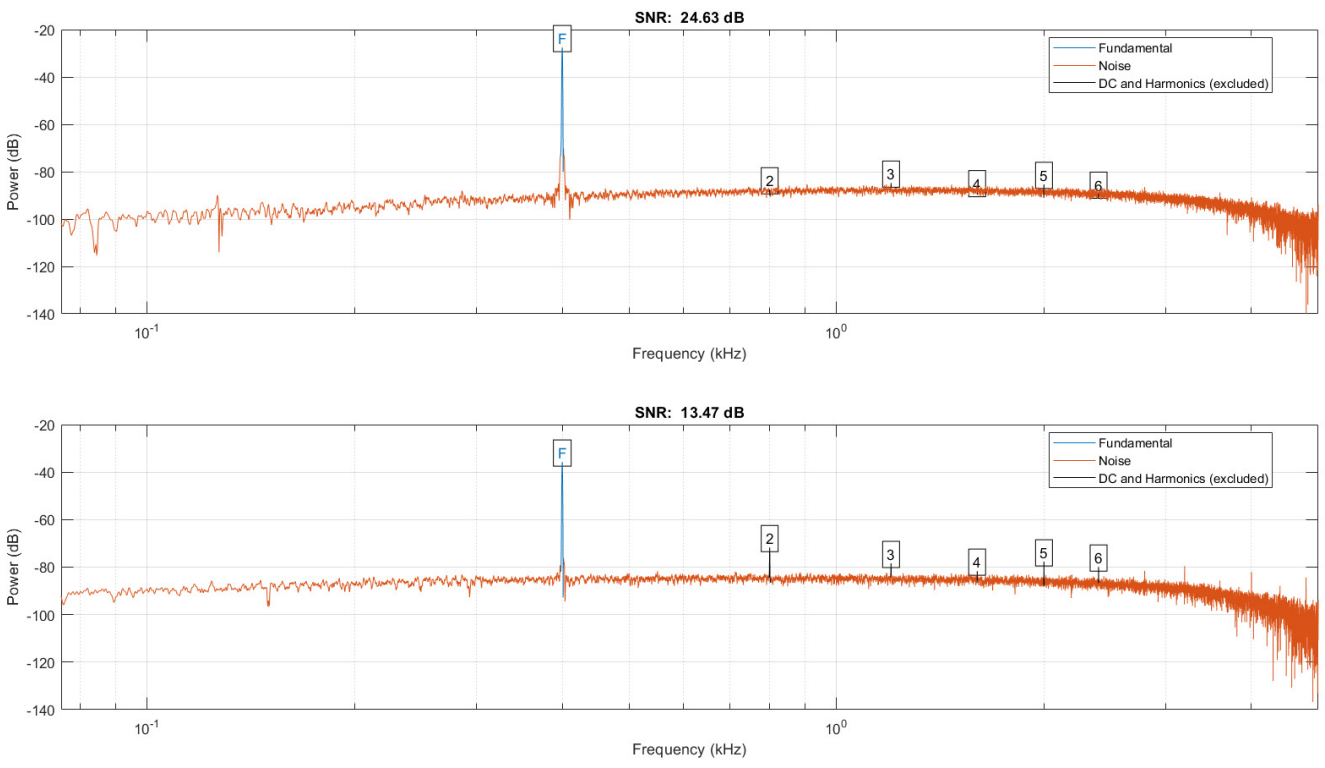


Figura 7.73: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 400 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

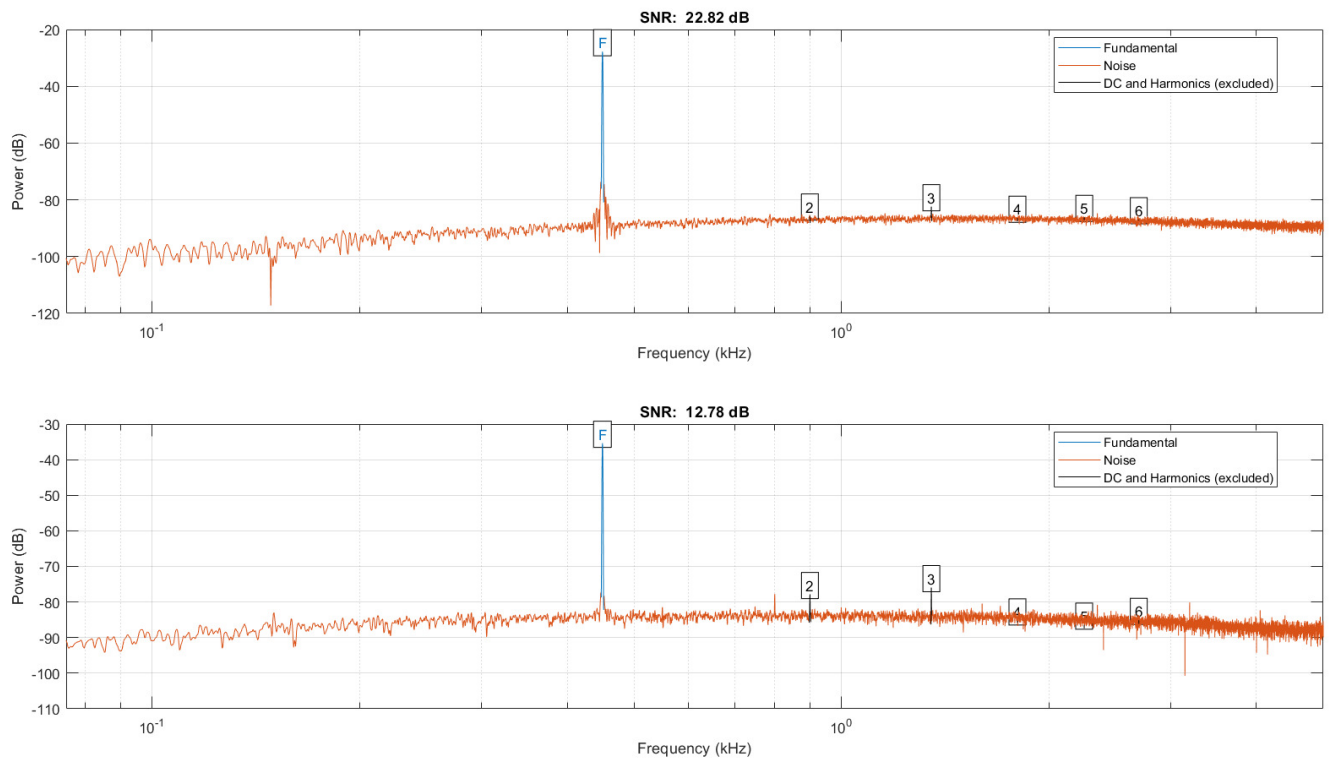


Figura 7.74: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 450 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

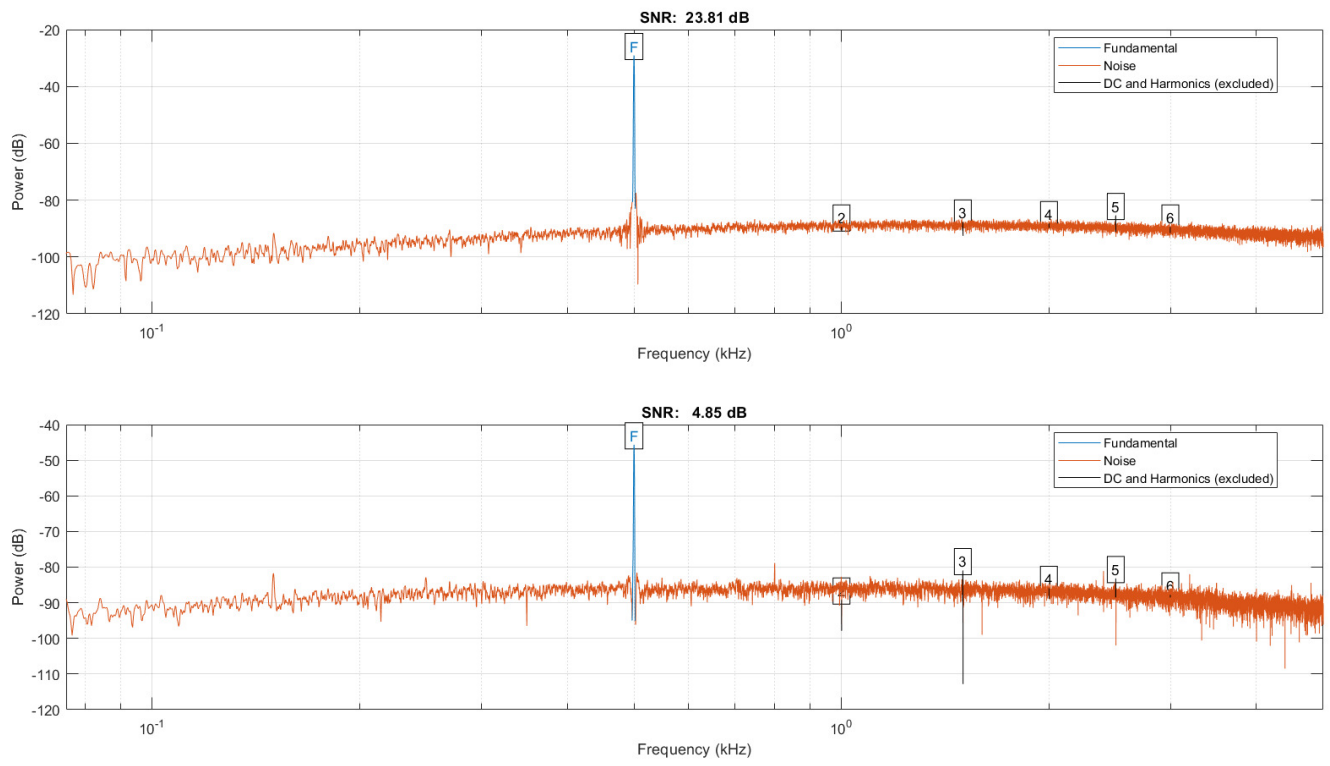


Figura 7.75: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 500 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

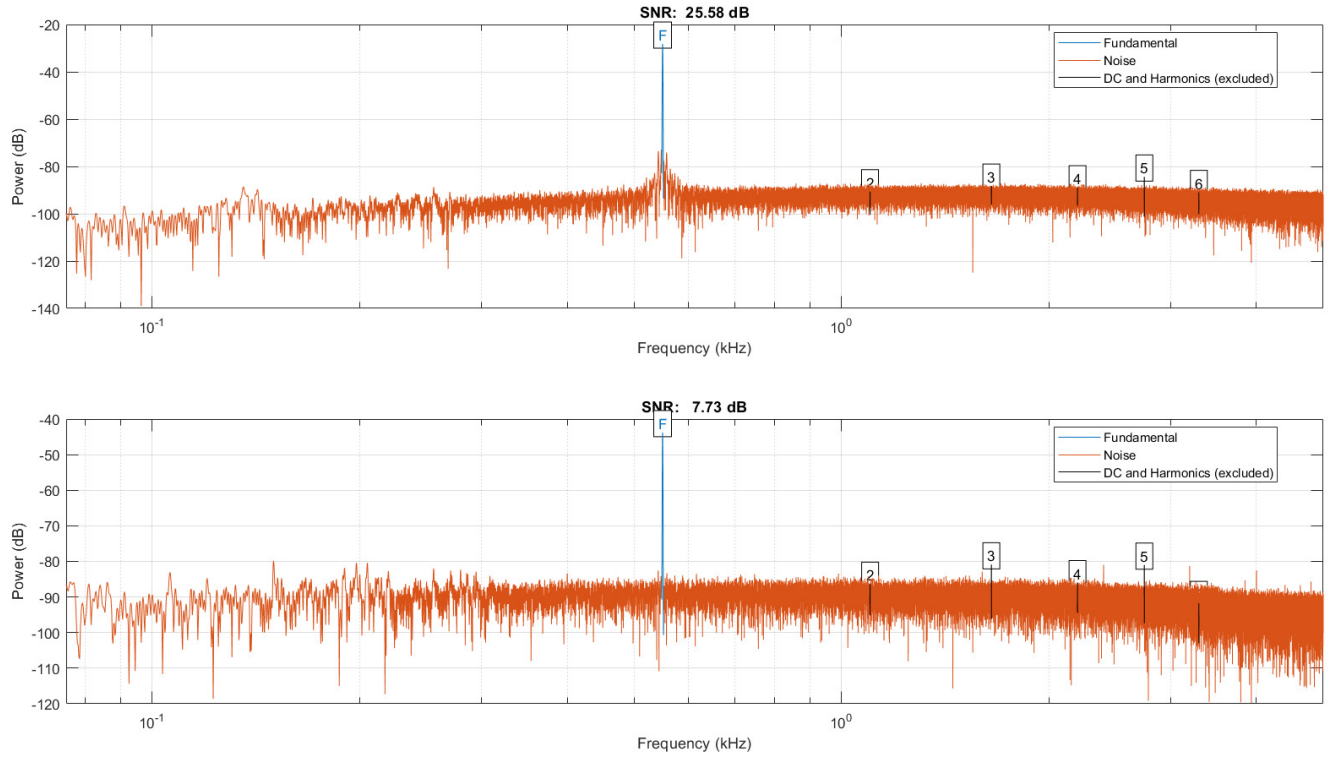


Figura 7.76: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 550 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

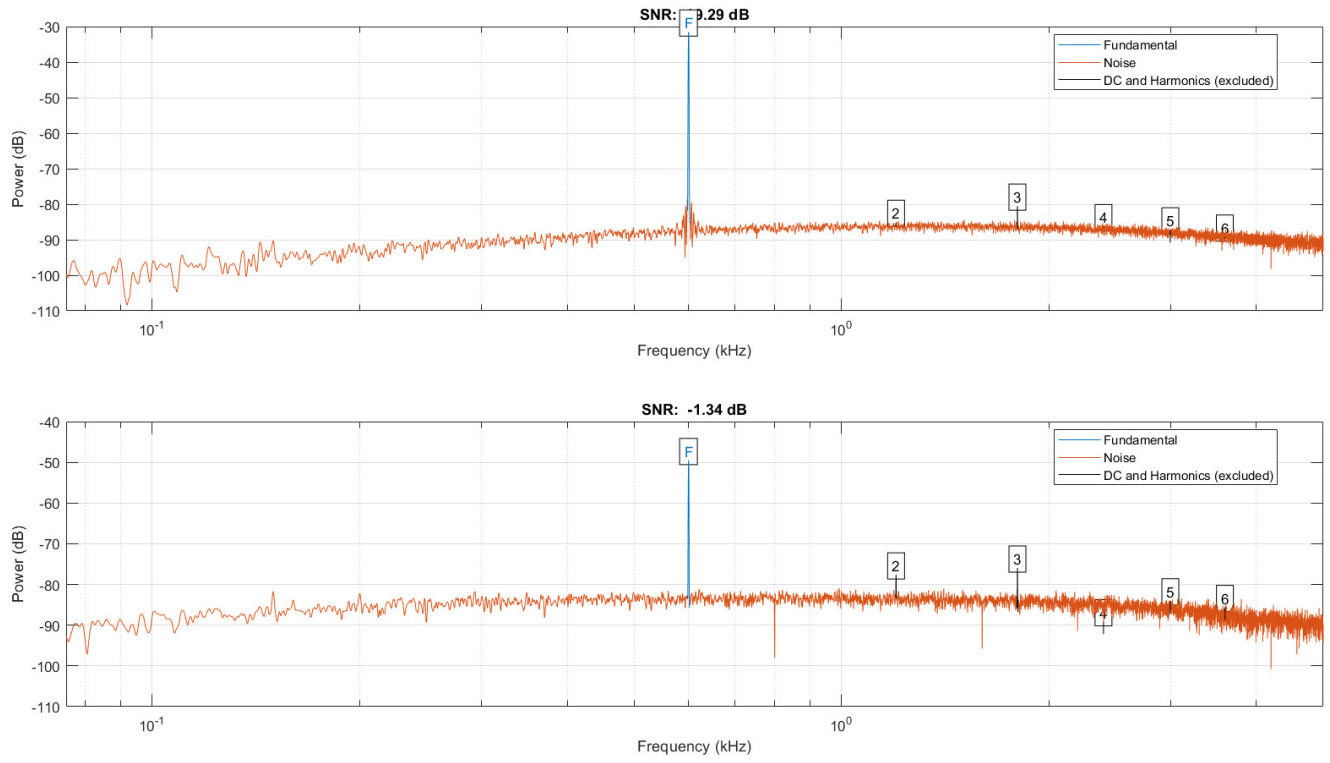
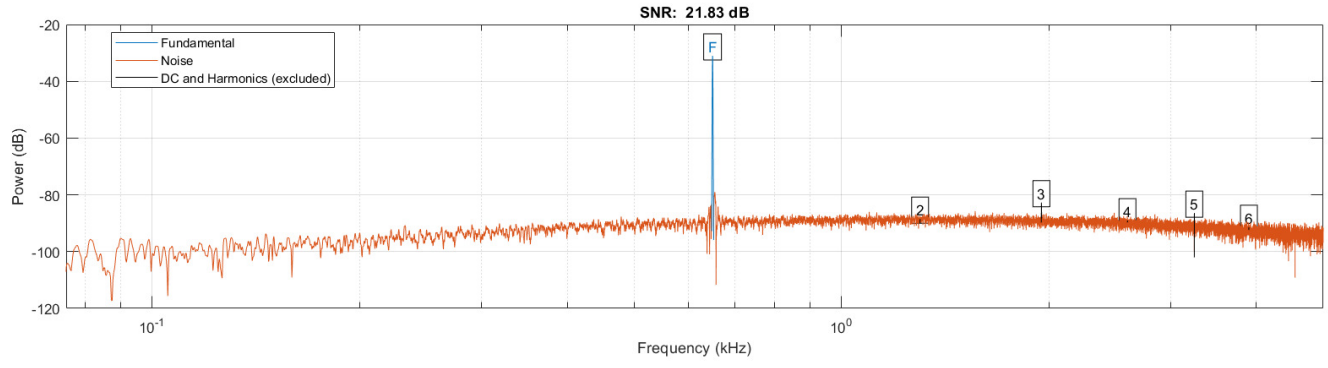


Figura 7.77: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 600 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.



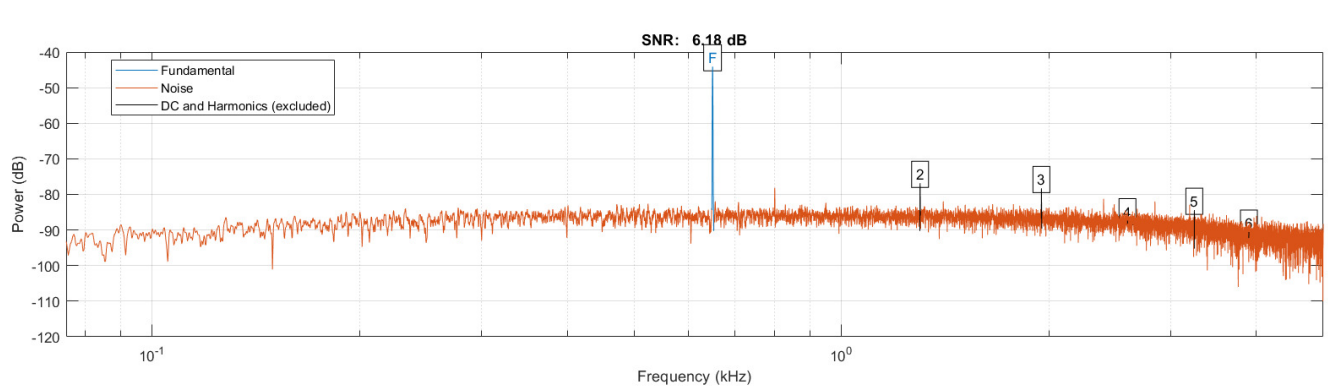
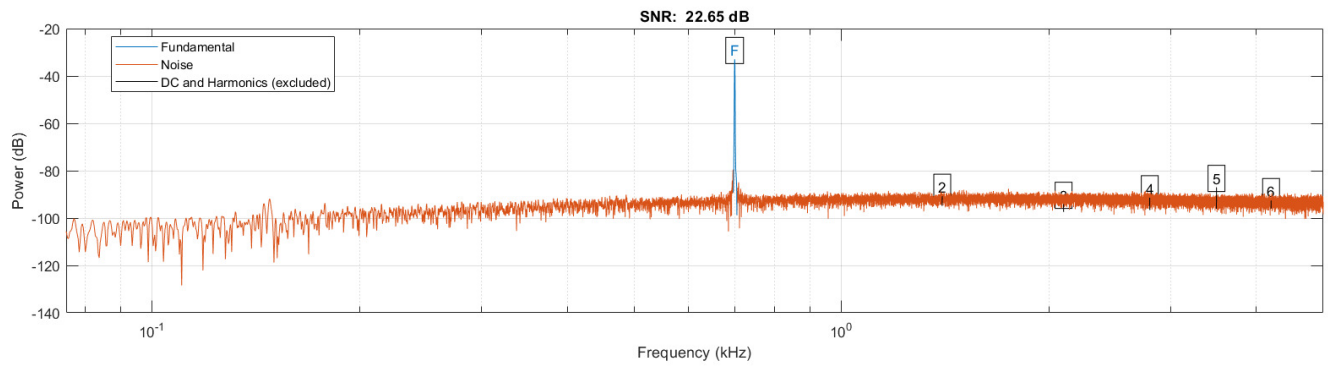


Figura 7.78: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 650 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.



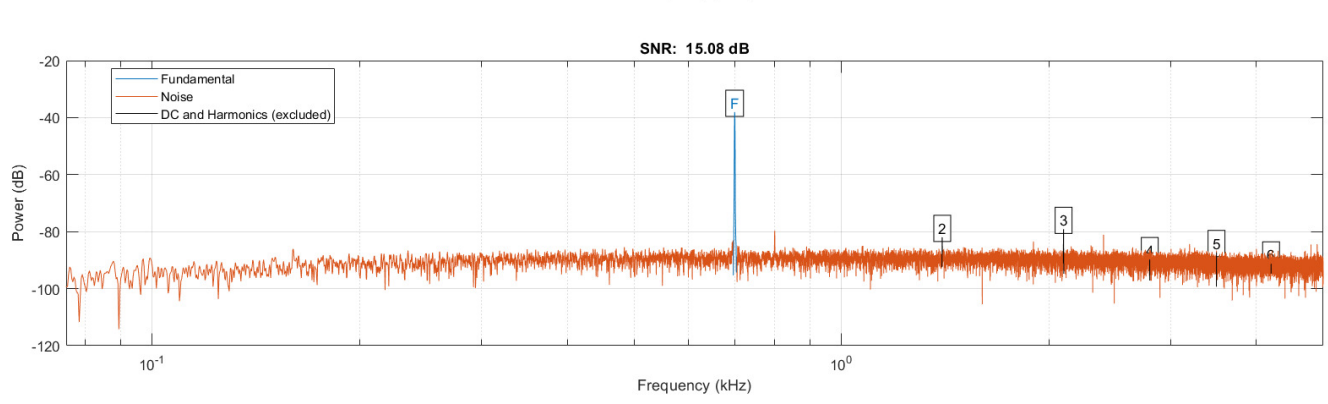


Figura 7.79: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 700 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

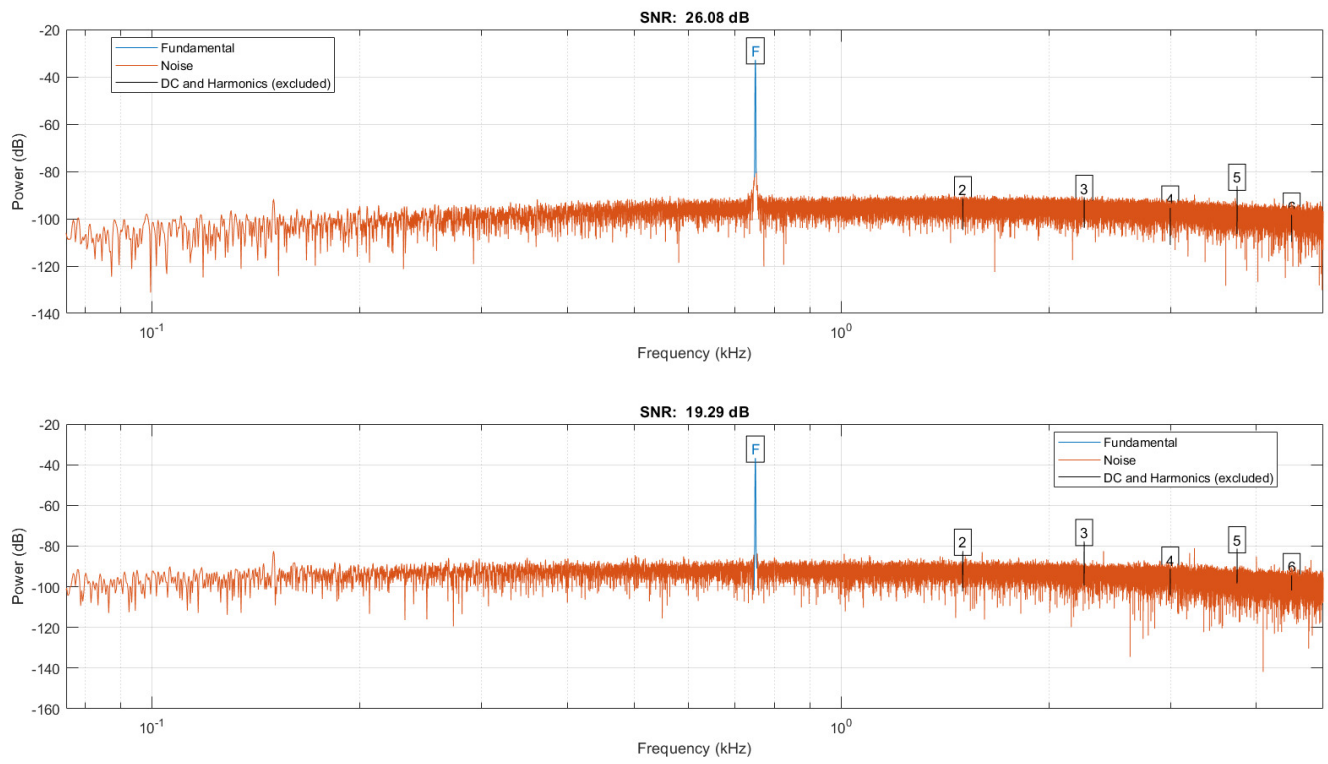


Figura 7.80: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 750 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

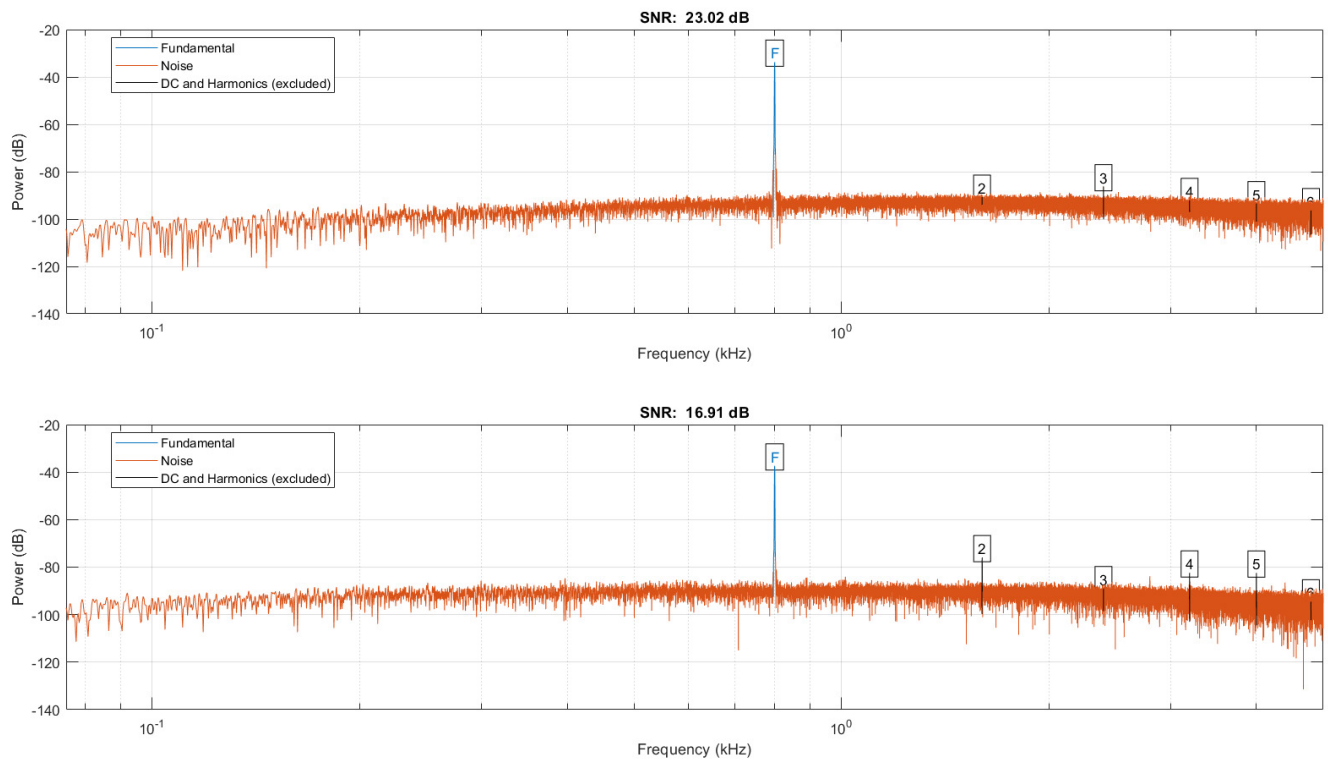
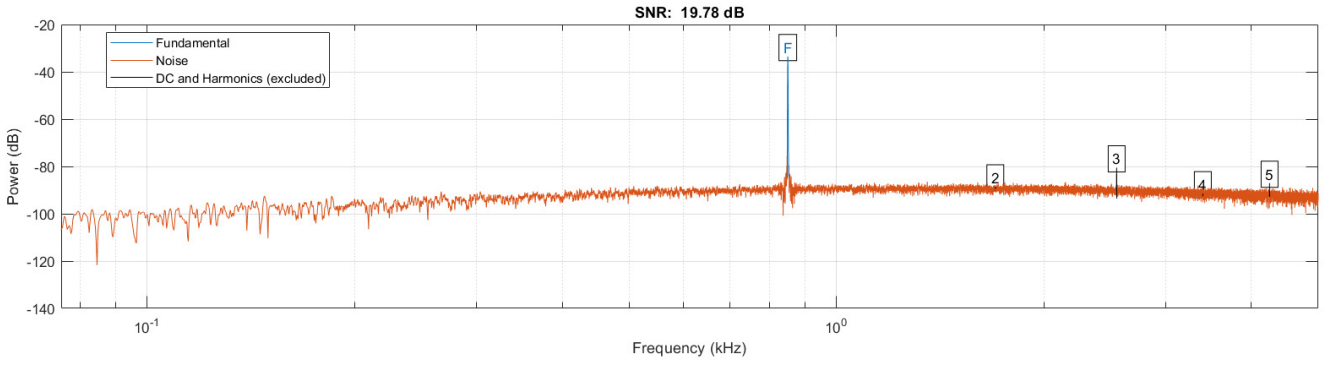


Figura 7.81: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 800 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.



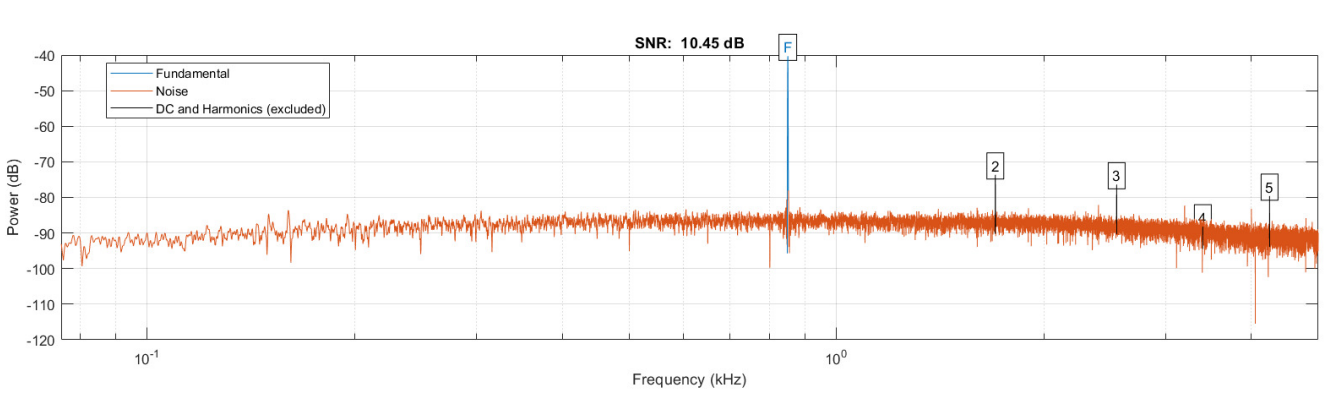
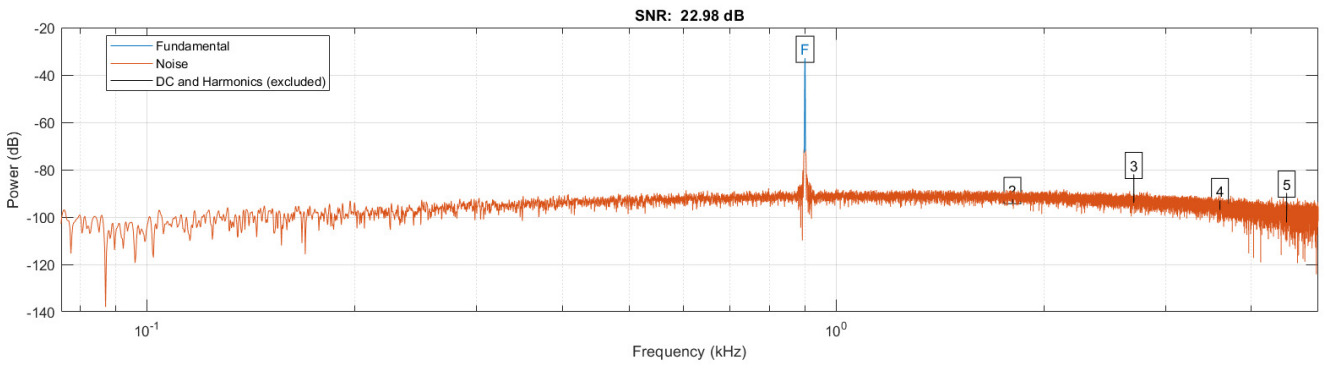


Figura 7.82: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 850 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.



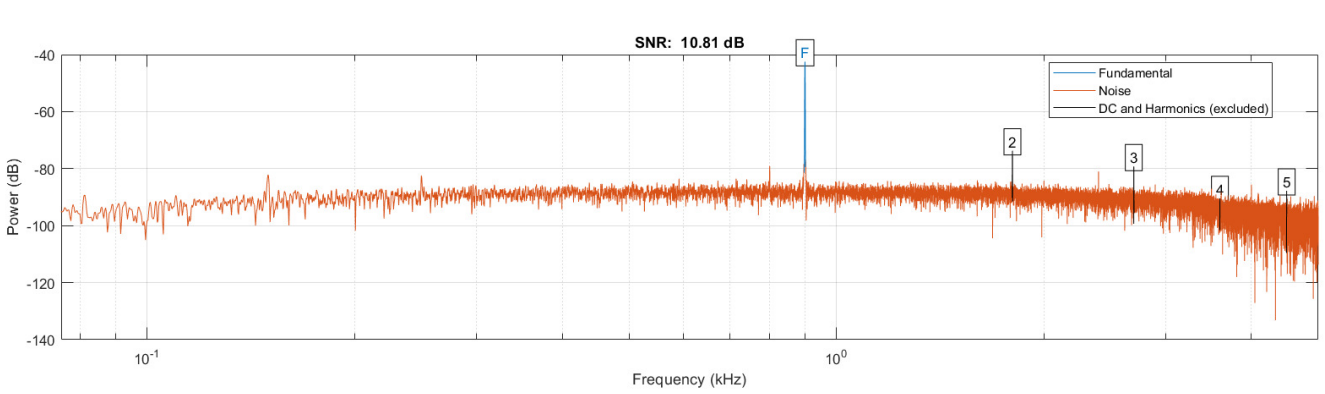


Figura 7.83: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 900 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

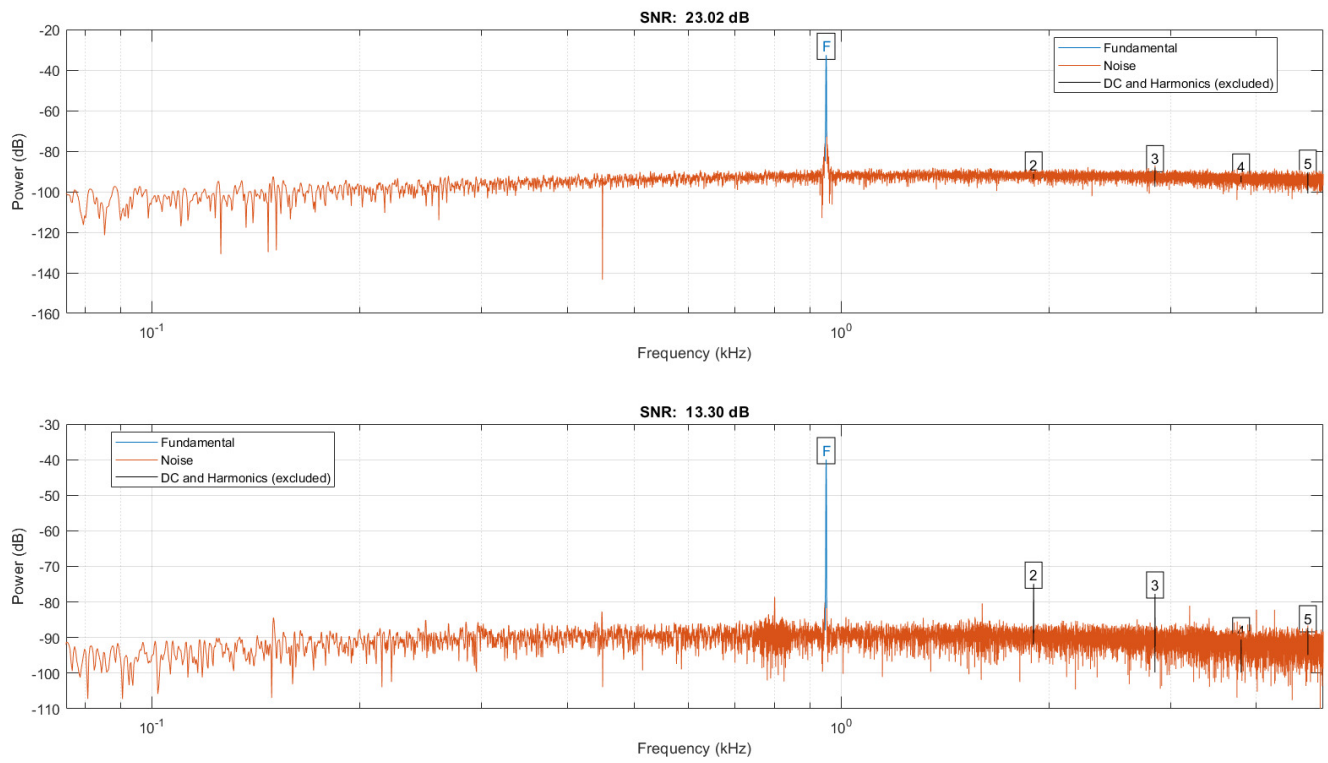


Figura 7.84: Resultados de la medición de *SNR* para frecuencia fundamental de 950 Hz en *AVM* V2 conectado a alimentación USB.

7.2. Códigos

Para el cálculo y el gráfico del *SNR* de las señales se usa el siguiente código en *MATLAB*:

Código 7.1 : Cálculo y gráfico de SNR

```
% Import audio file
[audio,fs] = audioread("avm_file.wav");
mic = audio(:,1);
acc = audio(:,2);

% Plot mic SNR
subplot(2,1,1);
snr(mic,fs);
xlim([0.075 5])
ylim auto
set(gca, 'XScale', 'log')

% Plot acc SNR
subplot(2,1,2);
snr(acc,fs);
xlim([0.075 5])
ylim auto
set(gca, 'XScale', 'log')
```