

Trabajo Fin de Máster

Estudio de la viabilidad de incorporar una ayuda técnica controlada por voz en una cocina de inducción.

Study of the viability of adding a voice control technical assistance on an induction cooker.

Autor

Raúl Gracia Escorihuela

Director/es

José Ramón Beltrán Blázquez

Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

Noviembre 2020

Resumen

En este trabajo se analiza la posibilidad de integración de un sistema de captura de sonido en el interior de una cocina de inducción, con el objetivo de proporcionar un sistema de control por voz totalmente integrado en el electrodoméstico. Surge de un proyecto que plantea la compañía de electrodomésticos B/S/H, donde se quiere comprobar la efectividad de utilizar un asistente por voz durante el cocinado.

Para realizar la captura del sonido se va a utilizar una agrupación de micrófonos que se colocará en el interior de la encimera. La característica principal de este trabajo es obtener una distribución óptima de micrófonos en el interior de la cocina que permita hacer una buena caracterización del sistema. Además, se realizarán los ensayos correspondientes con el desarrollo realizado para poder sacar las conclusiones oportunas. Para ello, hay que seleccionar el tipo de hardware que se utiliza, tanto el dispositivo utilizado para recoger y transmitir las señales de audio como los micrófonos utilizados. Se han analizado distintas distribuciones que pueden permitir una mayor eficiencia a la hora de la localización de la fuente sonora, pero en este caso, la configuración establecida está marcada por el espacio disponible dentro de la placa de inducción.

El proyecto está inmerso en un grupo multidisciplinar, donde también tiene gran importancia el trabajo realizado con las señales recogidas durante los ensayos. El filtrado de las señales para poder eliminar el ruido principal que aparece en la cocina (procedente del extractor situado en el centro de la cocina) ha sido, junto con la localización de la fuente de voz, las tareas principales realizadas en el procesado de la señal. Respecto a la parte electrónica, la función principal ha sido realizar una distribución de los micrófonos atendiendo a todos los posibles problemas que podían surgir, como son posibles acoplamientos de la señal, problemas de diseño, etc.

Índice

1.	Objetivos y Motivación.....	1
2.	Estado del arte.....	3
2.1.	Ambientes inteligentes.....	3
2.2.	Reconocimiento del habla.....	3
2.3.	Placa MCH-Streamer.....	4
2.4.	Micrófonos MEMS y Arrays.....	6
2.4.1.	Comparativa de diferentes tipos de micrófonos.....	7
2.4.2.	Características principales del micrófono utilizado.....	8
2.4.3.	Matrices de micrófonos.....	10
2.5.	Filtrado y localización de la señal.....	12
2.5.1.	Eliminación del ruido.....	12
2.5.2.	Localización de la fuente sonora.....	13
2.6.	Alexa.....	14
2.7.	Crosstalk.....	14
2.7.1.	Transmisión en cables paralelos.....	15
3.	Diseño electrónico de la solución.....	17
3.1.	Presentación de la encimera.....	17
3.2.	Primeros diseños.....	20
3.3.	Problemas detectados.....	21
3.3.1.	Pérdidas en la señal.....	21
3.3.2.	Problemas de masa.....	26
3.4.	Aplicación de las soluciones propuestas.....	26
4.	Simulación y diseño final.....	29
4.1.	Diseño de las placas.....	30
4.1.1.	Placa para los micrófonos.....	30
4.1.2.	Placa intermedia.....	31
4.1.3.	Placa principal.....	32
4.2.	Resultado de las placas diseñadas.....	33
4.3.	Placas finales.....	35
5.	Implementación real.....	37
5.1.	Primeras pruebas con 8 micrófonos.....	38
5.2.	Mediciones con 12 micrófonos.....	43
5.3.	Mediciones con 16 micrófonos.....	45
6.	Resultados, conclusiones y trabajo futuro.....	52
	Bibliografía.....	54

Anexo 1	57
Anexo 2	58
Anexo 3	61
Anexo 4	65
Anexo 5	68
Anexo 6	71

1. Objetivos y Motivación.

Este Trabajo de Fin de Máster está basado en un proyecto de investigación colaborativo con el Grupo B/S/H Electrodomésticos. En concreto, con la sede que tienen en la planta de Montañana (Zaragoza, España).

Se inició como una búsqueda de elementos que se pueden añadir en una cocina para mejorar la experiencia de uso de cara al usuario. Tras descartar algunas opciones, la que más peso tuvo fue poder realizar una comunicación con la cocina para controlar por voz una placa vitrocerámica. Se pensó que poder cocinar con la voz le daría un gran valor añadido a la compañía de electrodomésticos. Para ello, se decidió trabajar con el asistente de voz Alexa de Amazon. Se han planteado dos posibles soluciones, siendo una, la posibilidad de trabajar con alguno de los dispositivos propios, creados por Amazon¹ fuera de la encimera, y la otra es colocar una distribución de micrófonos dentro de la cocina de inducción para que sea capaz de reconocer las órdenes que indica el usuario.

El objetivo principal que se ha planteado es estudiar la viabilidad del proyecto. Es decir, estudiar y comprobar si resulta factible introducir un sistema de detección y reconocimiento de la palabra clave² dentro de la cocina. Para ello, es necesario realizar una búsqueda de componentes que permitan llevar la idea a cabo y montar la estructura electrónica y las conexiones necesarias para su correcto funcionamiento. La parte electrónica tendrá que ser robusta para evitar que haya acoplamientos de señales exteriores y evitar que interfiera con el funcionamiento del producto y viceversa. Finalmente se obtendrán unas conclusiones que determinarán si resulta viable realizar esta configuración de micrófonos o se propone otra alternativa o incluso otro enfoque al proyecto que pueda satisfacer también la experiencia de usuario.

Dentro de este objetivo principal, coexisten distintos subobjetivos que permiten el desarrollo del proyecto. Entre ellos cabe destacar la integración del conjunto de micrófonos dentro de la cocina para poder alcanzar la solución que se plantea inicialmente. Esta integración hace que surja otro, el cual es plantear una buena distribución de los micrófonos para conseguir la captación de las señales de la mejor forma posible. Para realizar la distribución de los micrófonos es necesario un medio de transmisión de las señales, por lo que es necesario marcar como objetivo la selección del cableado necesario para desarrollar el proyecto. Con ello, nace otro subobjetivo, la caracterización de las interferencias que aparecen a la hora de la transmisión de las señales.

La motivación que lleva a la realización de este proyecto es poder abordar el desarrollo de un proyecto con una empresa importante como es B/S/H, trabajar en un grupo multidisciplinar compuesto por un ingeniero electrónico y dos de telecomunicaciones, y ver el alcance que podría tener una cocina controlada por voz. También tiene peso el poder introducir una parte electrónica, realizada por el grupo de investigación, en el interior de un producto desarrollado y preparado para su venta. Otra motivación que conlleva es el trabajo futuro que podría desarrollarse ya que los electrodomésticos inteligentes y, en particular, las cocinas inteligentes tienen un campo muy amplio de desarrollo.

¹ <https://www.amazon.es/echo-dot-3-generacion-altavoz-inteligente-con-alexa-tela-de-color-antracita/dp/B07PHPXHQS>

² La palabra clave o palabra de activación es un vocablo predefinido que despierta al dispositivo para realizar la solicitud de una acción. En el caso de los dispositivos de Amazon dicha palabra clave es: "Alexa".

La estructura de la memoria está planteada de tal forma que, en el primer capítulo se ha hecho un estudio del estado del arte donde se investigarán las partes de software y hardware que se pueden implementar en el proyecto. En el segundo capítulo, llamado Diseño electrónico de la solución, se muestran las diferentes soluciones que se han aportado. En el tercer capítulo se muestran las simulaciones y el diseño final implementado tras realizar un estudio sobre el sistema que se dispone. La implementación definitiva se muestra en el capítulo cuatro. Finalmente se incorporan los resultados obtenidos, las conclusiones que se derivan de los resultados y las posibles líneas de continuación de este trabajo.

2. Estado del arte.

2.1. Ambientes inteligentes.

Los ambientes inteligentes están cada vez más extendidos en la vida cotidiana del ser humano. Una casa domótica está formada por diversos componentes inteligentes que permiten un uso más cómodo del propio hogar. El hecho de tener una casa con estas condiciones puede resultar incómodo para un usuario que no está familiarizado con esta tecnología y en muchas ocasiones el precio de estas viviendas puede ser inaccesible debido a su alto coste [1]. La presencia de wifi en la gran mayoría de los hogares está favoreciendo la implantación de estos sistemas que ya no necesitan de un cableado y un sistema de comunicaciones propio. Ya es posible, por ejemplo, encender la calefacción desde un dispositivo móvil o a través de un sistema inteligente de voz, elegir la cadena de música que se desea escuchar. Por otro lado, la utilización de estos dispositivos va de la mano con una mentalidad ahorradora también, ya que permiten obtener un ahorro de energía debido a su óptimo control que llevan integrados.

Estos sistemas son muy utilizados en países desarrollados, mientras que no lo son en países en desarrollo. La causa principal es el precio de estos dispositivos, ya que en países desarrollados se destina más dinero en mejorar la tecnología e incorporarla en nuestro día a día como una herramienta [2]. También tiene influencia el tipo de sociedad, ya que una con una mentalidad abierta se entiende más fácilmente que la inclusión de la tecnología es una mejora en la propia comunidad.

Un reto importante de una *Smart Home* es la seguridad. Hoy en día, los problemas informáticos que existen y lo fácil que es acceder a un sistema a distancia hacen que se exija una mayor protección de los datos con los que se trabajan y con ello evitar que alguien de fuera se introduzca en el sistema que controla un hogar [3].

Sin embargo, lo que realmente buscan las personas, cuando adquieren un sistema inteligente, es buscar un ahorro energético, reducir el trabajo del ser humano, debido a que se reducen las tareas a realizar, el esfuerzo que se emplea en determinadas tareas y los posibles errores que pueda cometer la misma persona [4]. El día a día está mostrando que la manera más interesante de interactuar con las viviendas inteligentes es mediante el control con el uso de la voz.

2.2. Reconocimiento del habla.

El *speech recognition* (o reconocimiento del habla, en su traducción literal) se basa en realizar reconocimientos de sonidos básicos que se utilizan en el día a día para aplicaciones específicas. Es un tema ampliamente tratado en los últimos años, pero lleva desarrollándose durante varias décadas. Algunas de las aplicaciones más destacadas son los sistemas de mejora del habla para personas discapacitadas, donde mediante el reconocimiento por voz se pueden realizar ciertas acciones en un ordenador. Por ejemplo, dando las órdenes a través de palabras clave [5] o el estudio de la capacidad de reconocer palabras en un ámbito ruidoso [6].

Para la detección de la señal de sonido los sistemas actuales no utilizan un único micrófono sino un array, refiriéndose con ello a una matriz o conjunto de micrófonos [5], [7]–[10]. Cabe destacar

que es necesario utilizar un conjunto de micrófonos para realizar la mayoría de las aplicaciones que hay hoy en día en funcionamiento.

El principal problema de esta tecnología es el correcto reconocimiento de la palabra que se desea detectar, ya que se puede encontrar en un ambiente ruidoso y puede ser indetectable y es necesario determinar de dónde procede la fuente sonora. Para conseguir estos objetivos es necesario realizar un filtrado de la señal y localizar la posición del hablante para favorecer una mejor implementación.



Fig. 1: Esquema del funcionamiento de Alexa[11].

El funcionamiento básico del asistente de Amazon, Alexa, está basado en la Fig. 1. El usuario realiza una petición al asistente y este a través de su dispositivo físico es capaz de captar el sonido. Posteriormente, a través de una *skill*³ permite reconocer la orden o petición que le ha mandado el usuario. Para el reconocimiento del habla se utilizan técnicas de procesamiento de lenguaje natural (NLP, por sus siglas en inglés). Estas técnicas utilizan tecnologías como el *Speech Recognition* o *Machine Learning* entre otras. De este modo se transforma la petición del usuario en lenguaje natural en una orden que entienda el propio *hardware*. A continuación, se analiza la información disponible en los sensores o en la nube, en función de las necesidades del usuario. Finalmente, se devuelve la información en forma de audio, o imagen si dispone de una pantalla para mostrarla. En el caso de un sistema de control, el dispositivo receptor realiza la acción solicitada.

2.3.Placa MCH-Streamer.

Inicialmente se empezó a trabajar con una placa que incluía siete micrófonos en una circunferencia, seis de ellos alrededor de la placa (en los extremos) y uno en el centro. Esta placa, de la compañía miniDSP, es una placa de desarrollo micArray, la cual se puede ver en la Fig. 2. A través de una conexión USB, se pueden capturar, transmitir y guardar las señales que registran los micrófonos. Las ventajas de utilizar esta tarjeta son: que es compacta y que permite obtener una buena calidad de la señal. Como inconveniente, hay que destacar que no se pueden colocar los micrófonos en una configuración deseada o en la posición requerida en función del proyecto, debido a que está limitado por el hardware.

³ Una *skill* es una pequeña aplicación en la que se le añade a la funcionalidad deseada al dispositivo.

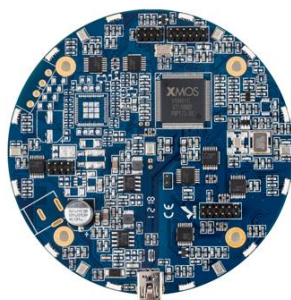


Fig. 2: Placa miniDSP micArray.

El mercado de las tarjetas de expansión que trabajan con audio está bastante despoblado y las opciones disponibles son muy pocas. La empresa miniDSP tiene algunas placas desarrolladas que permiten trabajar con señales de audio. El problema aparece cuando se desea una placa con diversas características y que pueda abarcar un amplio rango de posibilidades. Algunas de las destacadas son MCH-Streamer, miniSHARC DSP o NanoDIGI, las cuales tienen distintas características entre ellas, pero las dos últimas se centran en características más definidas como puede ser el tipo de comunicación o el tipo de micrófonos que se pueden utilizar. Mientras que la primera que se ha mencionado permite un rango amplio entre tipos de micrófonos, por ejemplo.

Ante la poca variedad de dispositivos, se decidió elegir la placa MCH-Streamer (a partir de ahora en este documento se denominará *Streamer*). Esta placa, lanzada en diciembre de 2019 se eligió por las múltiples opciones de comunicación que permite respecto a los distintos tipos de micrófonos que permite incorporar y es capaz de leer. En la Fig. 3 se puede ver el aspecto del hardware que se ha utilizado. Sus valores de consumo no son excesivamente elevados, siendo alimentado a través de un puerto USB con un valor de 5 V y un consumo de 300 mA. La comunicación que tiene con el ordenador es a través del propio puerto USB. Su precio está en torno a los 100 €. Es un precio razonable por una placa que permite recoger señales de audio de distintos tipos de micrófonos.

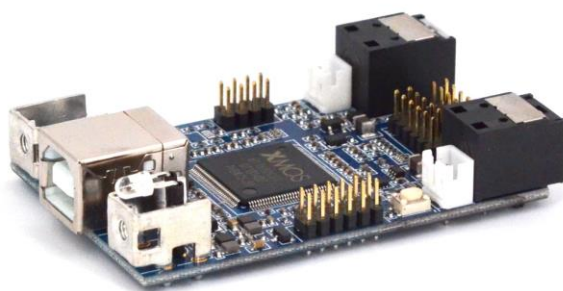


Fig. 3: Placa MCH-Streamer.

Volviendo al motivo por el que se eligió este dispositivo (el rango amplio de tipos de micrófonos que se podían utilizar debido a los distintos protocolos que admite la propia placa), se pueden utilizar los siguientes tipos de entradas y dispositivos: TOSLINK, S/PDIF, I2S, DSD, ADAT, TDM y PDM. Las diferencias que hay entre todos son pequeñas. Cambia el tipo de cableado, el número de canales o el número de líneas que dispone cada uno de ellos.

Para el caso del protocolo seleccionado, PDM, la característica principal es que dispone de 8 señales estéreo, por lo que pueden conectarse dos micrófonos en cada pin de señal, siendo un micrófono el canal izquierdo y otro el derecho, lo que proporciona un total de 16 micrófonos.

Para conocer mejor la distribución de los conectores que se pueden utilizar es conveniente observar la Fig. 4 donde aparece una distribución de los pines que dispone la placa. En el proyecto que se está realizando, sólo se utilizan los que están en el conector J3, los cuales se pueden conocer mirando la Tabla 1 [12].

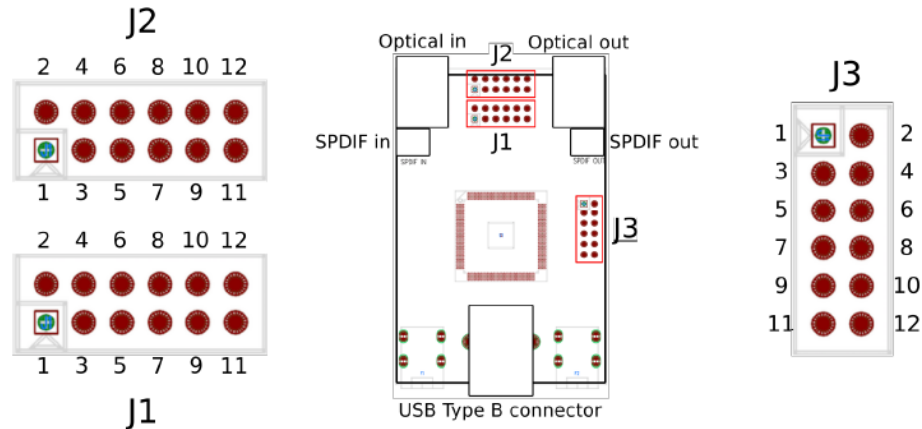


Fig. 4: Mapa de conexiones de la placa MCH-Streamer.

J1 (I2S mode only)		J2		J3	
Pin	Description	Pin	Description	Pin	Description
1	I2S data OUT Ch 1&2	1	Ground (GND)	1	GND
2	I2S data IN Ch 1&2	2	NC	2	3.3V
3	I2S data OUT Ch 3&4	3	Ground (GND)	3	PDM 1-2
4	I2S data IN Ch 3&4	4	NC	4	PDM 3-4
5	I2S data OUT Ch 5&6	5	NC	5	PDM 5-6
6	I2S data IN Ch 5&6	6	GPIO (future)	6	PDM 7-8
7	I2S data OUT Ch 7&8	7	GPIO (future)	7	PDM 9-10
8	I2S data IN Ch 7&8	8	RST (negative low)	8	PDM 11-12
9	Master clock (MCLK OUT)	9	GPIO (future)	9	PDM 13-14
10	Bit clock out (BCLK)	10	GPIO (future)	10	PDM 15-16
11	Ground (GND)	11	Ground (GND)	11	PDM CLK
12	I2S frame sync (LRCLK)	12	5V external power	12	PDM CLK2

Tabla 1: Descripción conexiones MCH-Streamer.

2.4. Micrófonos MEMS y Arrays.

Para la selección del hardware necesario en la implementación del dispositivo se analizan las características principales de, en este caso, los micrófonos con los que se quiere trabajar. En concreto, se han utilizado unos micrófonos de tipo MEMS (del inglés Micro-Electro-Mechanical Systems) colocados en forma matricial para mejorar la captación y el análisis de la señal.

Debido a la facilidad de integración, estos micrófonos están pensados principalmente para aplicaciones portátiles. La mayoría de estas, incluyen dos o más micrófonos para implementar técnicas de *Beamforming* para la reducción de ruido y obtener claridad en las conversaciones.

2.4.1. Comparativa de diferentes tipos de micrófonos.

Para seleccionar el micrófono que se ha utilizado durante todo el proyecto, se ha realizado un análisis sobre los distintos tipos de dispositivos disponibles. Como característica principal, se puede diferenciar un micrófono entre analógico y digital. Cuando se habla de estos términos, se refiere al tipo de salida que proporciona el micrófono. Por tanto, la explicación de cada uno sería:

- Micrófono analógico: los primeros micrófonos que salieron al mercado, de tipo MEMS, tenían una salida analógica debido a que no tenían integrada la electrónica necesaria que poseen en la actualidad los micrófonos. Estos dispositivos deben ser polarizados de forma adecuada y conectar su salida a un amplificador de alta impedancia de entrada. Últimamente, estos micrófonos están en desuso [13].
- Micrófono digital: hoy en día, los micrófonos MEMS suelen llevar la electrónica incorporada en su circuito integrado (CI). En su interior se incorporan las etapas de acondicionamiento y digitalización de la señal. Las interfaces más utilizadas para la comunicación son I²S (Inter-IC Sound), TDM (Time Division Multiplexing) y PDM (Pulse Density Modulation) [13].

En la Tabla 2 se han recogido los datos más característicos de los micrófonos que utilizan los tres protocolos más utilizados [14]–[16].

INTERFAZ	I2S	PDM	TDM
MODELO	CMM-3526D-261-I2S-TR	MP34DT01-M	ICS-52000
Nº DE CANALES	2	2	16
FRECUENCIA MUESTREO	512 kHz a 12.288 MHz	1 a 3 MHz	Hasta 25 MHz
TAMAÑO DATOS (BITS)	16, 24, 32	1 a 32	16, 24, 32
ANCHO DE BANDA	100 Hz a 10kHz	20 Hz a 10 kHz	50 Hz a 20 kHz
SENSIBILIDAD	-26 dB FS	-26 dB FS	-26 dB FS
ALIMENTACIÓN	3.3 V	3.3 V	3.3 V
CONSUMO	400 µA	600 µA	1000 µA
POSICIÓN ORIFICIO ENTRADA ⁴	TOP/BOTTOM	TOP/BOTTOM	TOP/BOTTOM
PRECIO UNITARIO ⁵	5.84 €	4.19 €	4.21 €

Tabla 2: Comparación entre micrófonos de distintas interfaces [13]–[16].

⁴ La posición del orificio de entrada tiene gran importancia debido a que se puede situar en la parte top o bottom del encapsulado. En el segundo caso, es necesario realizar una perforación en el PCB que facilite el paso del sonido hacia el micrófono. También influye el tipo de montaje seleccionado y su ubicación puede modificar las características de la respuesta en frecuencia y direccionalidad. Esto es debido a las reflexiones y resonancias que se puedan genera. Las tres interfaces tienen de ambos tipos, pero los micrófonos observados tienen una única posición, la cual se ha marcado en la Tabla 2.

⁵ En el precio indicado está incluido el precio que tiene el micrófono con su break-out board, la cual es muy útil para poder trabajar con el dispositivo de una forma mucho más cómoda y sencilla.

2.4.2. Características principales del micrófono utilizado.

Finalmente se ha elegido el micrófono PDM (MP34DT01-M) debido a que tiene una *break-out board* bastante accesible, la posición del orificio es en la cara top, por lo que no empeora la calidad de la señal de audio. Tiene un consumo razonable y permite obtener un amplio rango de bits en cuanto al tamaño de la señal, ajustable en función de la aplicación realizada. También cabe destacar su precio, ya que es el más barato de los tres que se han analizado, incluyendo la *break-out board*.

Estos micrófonos tienen una tecnología de fabricación CMOS estándar, la misma que se usa para la mayoría de los componentes electrónicos modernos. Una de las ventajas que presenta es que permite integrarse con la electrónica analógica y la digital en el mismo dispositivo. En este tipo de micrófonos, en general, se utiliza un transductor de efecto capacitivo constituido por una membrana de material semiconductor, que vibra en función de las variaciones de nivel de presión sonora, SPL (del inglés *Sound Pressure Level*) que ingresa a la cavidad interior del dispositivo y por otra membrana fija, como se puede ver en la Fig. 5. En el mismo sustrato en el que se construye la membrana, o quizá en otro si se utilizan procesos diferentes, se coloca toda la electrónica necesaria para la polarización de la membrana y la recuperación de la señal de audio [13]. La señal se codifica por la densidad o el número de impulsos en función del tiempo. Variando la frecuencia de trabajo, se decreta el ancho de banda y con ello el consumo del dispositivo. Esto permite una gran flexibilidad en dispositivos portátiles [13].

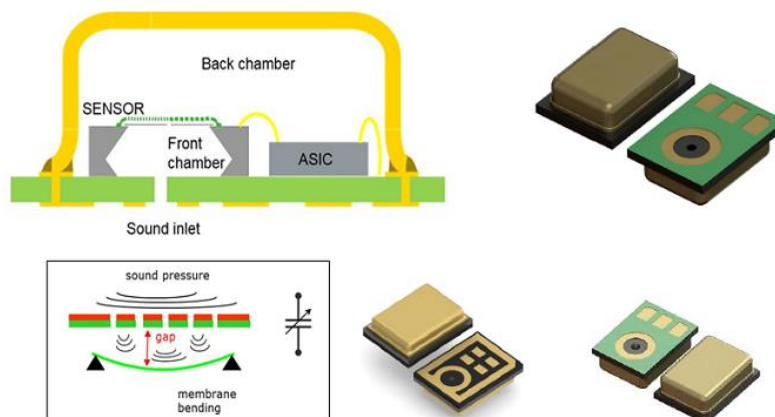


Fig. 5: Configuración micrófono MEMS.

Se han recogido las características principales en la Tabla 3, donde destacan su bajo consumo y su rango de aplicación. Otra cosa a destacar son sus propiedades micro-electromecánicas, y por tanto son ideales para formar matrices de micrófonos [10].

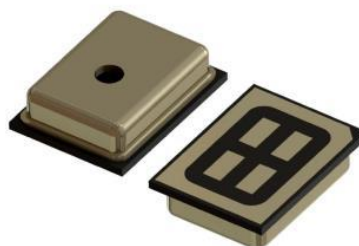


Fig. 6: Micrófonos MEMS MP34DT01-M.

Características	Valores
Alimentación (Vdd)	-0.3 a 6 V
Consumo en modo normal	0.6 mA
Valor de pico	120 dB SPL (Sound Pressure Level)
Ratio de sonido	61 dB
Sensibilidad	-26 dB FS (Full Scale)
Frecuencia de muestreo	1-3 MHz
Ancho de Banda	20 Hz a 10 kHz
Temperatura de trabajo	-40 a 85 °C
Valor del nivel lógico alto	$\uparrow 0.65 \cdot V_{dd}$
Valor del nivel lógico bajo	$\downarrow 0.35 \cdot V_{dd}$

Tabla 3: Características principales del micrófono MP34DT01-M [15].



Fig. 7: Breakout board del micrófono MEMS de Adafruit.

En la Fig. 6 se puede el aspecto del micrófono elegido, mientras que la Fig. 7 muestra la *breakout board*, diseñada por la empresa Adafruit. La placa se llama Adafruit PDM Microphone Breakout y se puede adquirir a través de los numerosos distribuidores de componentes electrónicos que hay en el mercado.

Otra de las ventajas que tiene este módulo es que el pin SEL (conectado a VCC o GND) permite seleccionar el comportamiento del micrófono (canal derecho o izquierdo), de este modo cada micrófono entrega los datos en el flanco ascendente y en el flanco descendente de la señal de CLK, alternando entre dichos canales para adquirir la señal de audio en el momento adecuado.

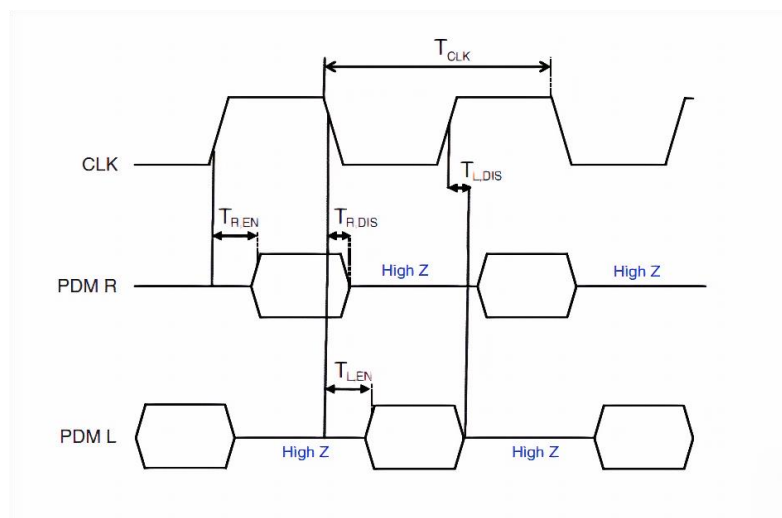


Fig. 8: Representación de las señales de los micrófonos.

Tal y como se muestra en la Fig. 8, la captación de datos se realiza alternando el envío del dato entre el canal izquierdo y el canal derecho, a través de una señal cuadrada, CLK, con un valor de tensión de 3.3 V [17]. Es importante que la señal de CLK alcancen sus valores en alto y bajo de forma periódica ya que en caso contrario el envío de los datos estaría alterado y no se realizaría correctamente.

2.4.3. Matrices de micrófonos.

Los sistemas de reconocimiento de habla incorporan mecanismos que permiten realizar localización espacial del oyente, lo que facilita, mediante técnicas de filtrado espacial, capturar la señal de audio en entornos ruidosos. Para ello se utilizan matrices de micrófonos.

Existen múltiples distribuciones de micrófonos posibles para obtener una captura de audio óptima del sistema. El diseño más adecuado depende del número de micrófonos, del espacio disponible y de la distribución espacial de los micrófonos.

Cuando se diseña un dispositivo, en algunos casos, el hardware debe adaptarse a las especificaciones de diseño del producto, y en otros casos ocurre lo contrario, que el producto se diseña alrededor del hardware que se va a utilizar.

Por tanto, cada configuración de micrófonos que sea posible realizar tendrá unos resultados diferentes, y en función de la aplicación será más beneficioso utilizar una u otra. Por ello, antes de realizar cualquier montaje, es necesario realizar distintas simulaciones para confirmar qué distribución es la óptima para un caso concreto.

Siguiendo el trabajo de Palla, Fanucci, Sannino y Settin [5], es necesario tener en cuenta ciertos aspectos en la construcción del array de micrófonos:

- AMA (Additive Microphone Array): consigue mejorar la señal y eliminar el ruido utilizando los principios de retardo y suma (delay-and-sum). AMA permite la conformación de haces/ondas óptimo, en términos de Ganancia de Ruido Blanco, conforme el número de micrófonos aumenta. Sin embargo, el patrón de haz es dependiente de la frecuencia y por tanto decrece cuando la distancia entre los micrófonos es pequeña.
- DMA (Differential Microphone Array) referido al array que es sensible al cambio de presión espacial. Es importante que la distancia que haya entre dos micrófonos sea menor a la mitad de la longitud de onda mínimo partido por dos, como se describe en la Ec. 1.

$$d \leq \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad \text{Ec. 1}$$

Para el caso que se plantea, se trata de alcanzar todo el rango audible, que va de 20 Hz a 20 kHz.

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\min}} = \frac{343}{20} = 17.15 \text{ m} \rightarrow d_{\max} \leq \frac{17.15}{2} = 8.57 \text{ m} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{343}{20000} = 0.01715 \text{ m} \rightarrow d_{\min} \leq \frac{0.01715}{2} = 0.857 \text{ cm} \quad \text{Ec. 3}$$

Como se puede apreciar en la Ec. 2 y la Ec. 3, las distancias entre los micrófonos tienen un gran rango, por lo que se escogería el peor caso, que sería 0.857 cm entre micrófonos.

- TOA (Time of Arrivals) la localización se realiza mediante el cálculo de la diferencia de tiempos que se registran en dos micrófonos ante la llegada de una misma señal. La Ec. 4 representa este retraso, siendo d la distancia entre los micrófonos, c la velocidad del sonido y θ el ángulo de entrada del sonido.

$$\tau_0 = \frac{d}{c} \cos \theta \quad \text{Ec. 4}$$

En una de las distribuciones utilizadas en los sistemas de bajo consumo, para el reconocimiento de la voz, se utiliza un sistema para despertar al micro, que está en modo de bajo consumo. Para ello, se utiliza un VAD (Voice Activity Detector), el cual se muestra en la Fig. 9(a). Donde la señal de entrada es una señal diferencial proveniente del micrófono y almacenada a través de un seguidor de tensión y es convertida a una señal digital a través de un sigma-delta. En la Fig. 9(b) se puede observar el conjunto de señales que interactúan para despertar al microcontrolador de su estado de reposo[18].

Uno de los problemas que presenta este método es que, si la señal de entrada es muy grande, puede saturar el sistema. Cabe decir que, cuando se ha trabajado con estos micrófonos, al tener una sensibilidad baja es complicado que la señal se sature fácilmente, ya que para ello se tendría que recibir una señal acústica con un valor muy alto de decibelios.

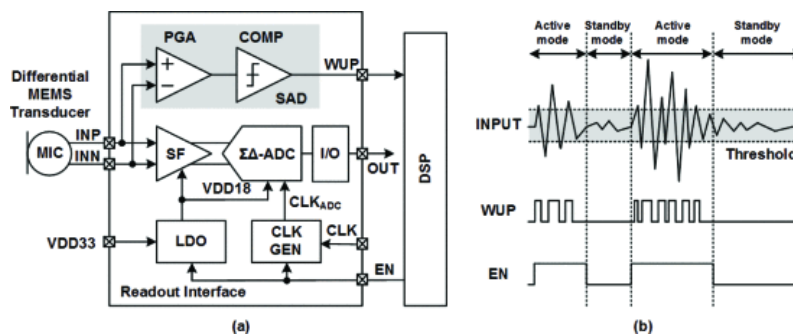


Fig. 9: (a) Arquitectura propuesta de micrófonos MEMS. (b) Formas de onda del detector de sonidos.

Para un mayor rendimiento es necesario realizar un estudio sobre la localización óptima de los sensores que se quieren utilizar, y más en especial, en un ámbito en el que los sensores son micrófonos. No existe una distribución buena, ni una mala, simplemente hay unas mejores que otras en función de la aplicación que se desea y las limitaciones de las que se dispone.

Según el estudio, que realizaron J. Stamac, S. Grubesa, y A. Petosic [9], existen diferentes disposiciones de los sensores, utilizando configuraciones de arrays lineales, cuadradas, circulares y espirales. También se tuvo en cuenta la separación entre micrófonos utilizando DMA, comentado anteriormente, para la localización. También se ha utilizado un algoritmo para determinar el número óptimo de sensores, llamado *Hemisphere*. Los resultados indican que, aumentando el número de micrófonos, se produce una mayor ganancia de la señal en la dirección deseada. Esta dirección deseada es desde la cual se quiere que provenga la señal sonora. La conclusión que se obtiene de dicho estudio es que la mejor configuración, para su aplicación (una cámara acústica), es en semiesfera, Fig. 10, obteniendo la ventaja de una reducción de espacio y la ganancia de las señales es aceptable.

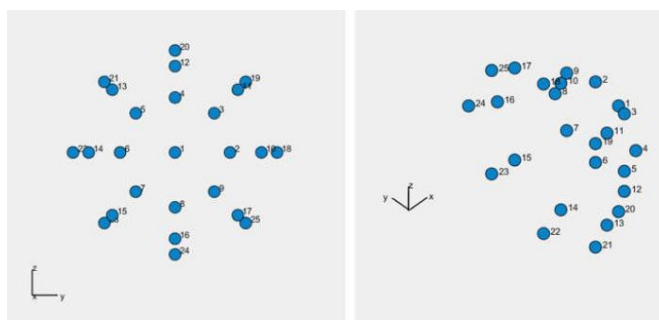


Fig. 10: Configuración en Semiesfera.

Otro grupo de investigación ha desarrollado una matriz circular de micrófonos con 8 canales y un diámetro de 4 cm que encajaría fácilmente en muchos dispositivos de consumo, lo que permite la grabación móvil de 8 canales síncronos de audio. Esta configuración les ha permitido utilizar un algoritmo de *Beamforming* (conformación de haz), para la reducción de ruido, separación de la voz y reducción de la reverberación [8].

2.5. Filtrado y localización de la señal.

Una vez que se dispone de la matriz de micrófonos correspondiente al diseño que se adapta mejor al espacio disponible, es necesario captar las señales que transmiten y procesarlas. Hay infinitud de formas de procesamiento de la señal que se pueden utilizar, y en cada caso se utilizará la que mejor se adapte a la aplicación que se quiere realizar. En este punto se van a explicar algunos de los algoritmos más utilizados.

Se puede distinguir entre algoritmos de eliminación de ruido y algoritmos de detección de la fuente sonora.

2.5.1. Eliminación del ruido

Estos algoritmos sirven para identificar fuentes de sonido que puedan perjudicar la señal principal. Una vez identificados, se pueden analizar y realizar distintos filtros para evitar la inclusión de esa forma de onda característica.

A. Beamforming.

El *Beamforming* supone un filtrado espacial, donde la señal de los sensores se filtra de forma temporal (o se multiplica por una constante compleja en el caso de agrupaciones de banda estrecha) y se suman.

La técnica de *Beamforming* más simple, que además es la que maximiza la relación señal a ruido en un escenario con una única fuente y ruido omnidireccional, es la denominada *delay-and-sum*, que consiste en compensar los retardos sufridos por la propagación para la dirección θ_0 a la que se desea apuntar con la agrupación, de forma que las señales provenientes de ésta se sumen en fase [19].

Dentro del *Beamforming* pueden aparecer varias técnicas como son *delay-and-sum* (nombrada anteriormente) y el método de Capon [19].

B. Frost Beamforming.

Cada micrófono tiene un filtro FIR con distintos pesos. La salida está formada por la suma de todas las salidas de los filtros que lleva cada micrófono utilizando la varianza mínima limitada linealmente. En la Fig. 11 se muestra el esquema de implementación de este algoritmo [5].

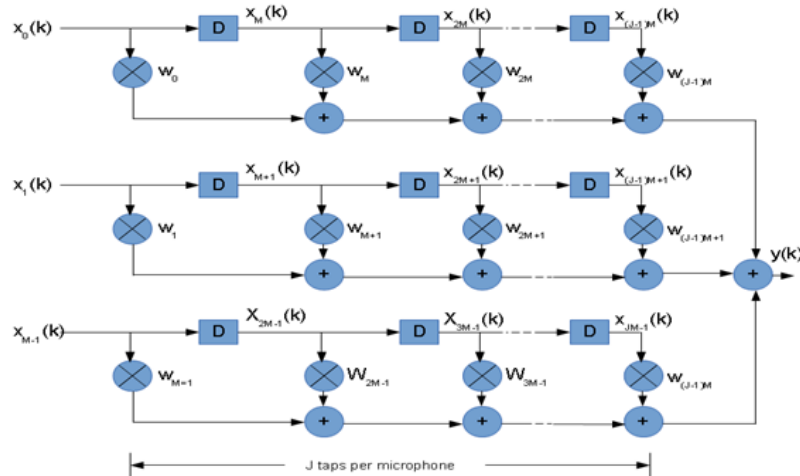


Fig. 11: Esquema del Frost Beamforming Software

2.5.2. Localización de la fuente sonora.

En este caso, se pretende encontrar la localización de la fuente de sonido, determinar su dirección y detectar cuál es esa fuente de sonido.

A. Sistema basado en correlación temporal.

Se plantea un sistema basado en los diferentes retardos con los que llega la señal a cada sensor. El primer paso es estimar el retardo mediante la correlación cruzada entre las señales leídas por cada sensor y después buscar el origen de la excitación que minimice el error cuadrático entre el retardo teórico para esa posición y el estimado. El problema que aparece es que se necesita un alto coste computacional, ya que requiere el cálculo de $N(N-1)/2$ correlaciones cruzadas. Una vez se tengan estas correlaciones, la diferencia entre los retardos con los que se recibe la señal en cada sensor podrá estimarse como las diferencias entre las posiciones de los máximos de estas dividido por la frecuencia de muestreo [20].

B. Sistema basado en estimación de las respuestas impulsionales.

En este caso se tiene en cuenta las posibles reflexiones de la señal que podrían llegar a darse. Este algoritmo se centra en obtener las diferencias entre los retardos con los que llega la señal a cada sensor de una forma similar a la explicada en el apartado anterior.

C. Sistema basado en la energía localizada.

En el caso de que se produzca una reverberación de la señal que se estudia, se espera que primero llegue una onda directa y a continuación lleguen las reflexiones con menos energía. Basándose en eso, se calcula una señal de energía localizada para cada sensor y a continuación buscar el máximo correspondiente al frente de onda directo y de ahí estimar las diferencias

entre los retardos con los que llega la señal a cada sensor para calcular a partir de ellos la posición de la fuente sonora [20].

D. Algoritmo SRP-PHAT.

El primer paso es obtener la Correlación Cruzada Generalizada (GCC) de todas las señales capturadas. A continuación, se realiza la suma de todas las posibles combinaciones de parejas de GCC que están desplazadas por las diferencias en las direcciones de los retardos. Para localizar la fuente, se busca un máximo en un conjunto de posibles localizaciones de la fuente. Como puede haber falsos positivos, el algoritmo se encarga de disminuir la importancia de los máximos considerados como extraños y mejora la resolución del verdadero máximo. Esto permite que haya una menor sensibilidad al ruido [21].

2.6. Alexa

Alexa es un dispositivo virtual, desarrollado por la empresa Amazon, el cual permite controlar diversos aparatos compatibles con el propio producto como pueden ser la iluminación, altavoces, televisores, etc. Mediante el dispositivo principal, se pueden controlar el resto a través de la voz, utilizando una palabra clave.

Una de las principales aplicaciones que se desea desarrollar en el marco del proyecto con la empresa es incluir una *skill* de Alexa en una cocina de inducción para realizar un control de la cocina por voz. Como asistente por voz que es, tiene varios competidores, como son: Siri de Apple, Google Assistant, Cortana de Microsoft, etc. [22]. Se trabaja con Alexa debido a la posibilidad de disponer del sistema de desarrollo de *skills* y de las librerías para realizar una implementación mediante una RaspberryPi. Esto implica que está bastante integrado en la sociedad actual, por lo que representa una gran ventaja frente a sus competidores. Al tener un mayor nivel de implantación que la competencia el público en general está más familiarizado con él, así que si se incluye en el hogar no genera tanta desconfianza como otros productos desconocidos.

Desde un grupo de investigación alemán (dentro de la compañía B/S/H), se están realizando unas pruebas similares utilizando un dispositivo real de Alexa sin integrarlo, es decir, colocando un dispositivo físico en la cocina y que envíe las órdenes a través de wifi o bluetooth a la encimera. En este caso no realizan el estudio para integrar el asistente de voz dentro de la cocina, sino que su objetivo es que Alexa sea capaz de reconocer las palabras claves que se le asignan en un entorno ruidoso.

2.7. Crosstalk.

El crosstalk es un término utilizado para referirse a la diafonía, es decir, la aparición del efecto de una señal en otra. También se puede interpretar como cuando una señal se superpone a otra. Este efecto tiene la complejidad de identificar cuál es su procedencia, ya que puede estar enmascarada en la transmisión por los cables, el PCB con el que se esté trabajando o pequeñas antenas que se puedan formar en el circuito. Finalmente, esto se traduce a problemas de EMI, los cuales son complicados de identificar si no se conocen los fundamentos principales. Para ello,

es aconsejable seguir unas recomendaciones básicas para empezar a diseñar un dispositivo electrónico.

Para poder corregir los efectos que surgen, una de las soluciones pasa por simular el efecto que se obtiene y después corregirlo. La opción más factible para corregirlo es mediante cambios en el hardware.

Los trabajos de simulación son bastante complejos, debido a que muchos de ellos se basan en modelos de elementos finitos [23]. También se realizan estudios sobre el efecto, que tienen en los conductores o pistas, de la frecuencia [24] o los efectos de campo que aparecen sobre cables paralelos [25]–[27].

Las conclusiones que se obtienen de las lecturas realizadas son que es preferible utilizar cables o pistas cortas, sobre todo para las señales más vulnerables y también para las más ruidosas, para así evitar ser contaminado y contaminar respectivamente. También se aconseja utilizar señales que varíen lentamente con el tiempo, lo que significa que tengan una baja frecuencia. Y en caso de que estas dos anteriores no sea posible, la mejor opción es llevar una señal de masa pegada a la propia señal ruidosa para evitar que así se acople a otras señales. Esto se traduce en utilizar un plano de masa en un PCB para conseguir aislar lo máximo posible esa señal y en caso de utilizar cables, tratar de llevar un cable de masa en paralelo con una señal ruidosa.

2.7.1. Transmisión en cables paralelos.

Para poder saber el comportamiento que tiene una señal ante el resto, una opción es realizar una simulación que permita ver las formas de las ondas correspondientes. Para ello se aplica el circuito que se ve en la Fig. 12 y los valores de los componentes se obtienen a partir de las ecuaciones Ec. 5, Ec. 6, Ec. 7 y Ec. 8. En estas ecuaciones se obtienen los valores de las tensiones y corrientes que aparecen en el circuito en función de la longitud de la línea y el tiempo. En concreto, z , representa la longitud de la línea, t , el tiempo.

Por otro lado, se representa la tensión y la corriente del cable generador como V_G e I_G respectivamente. Mientras que en el caso del cable receptor se expresan como V_R e I_R .

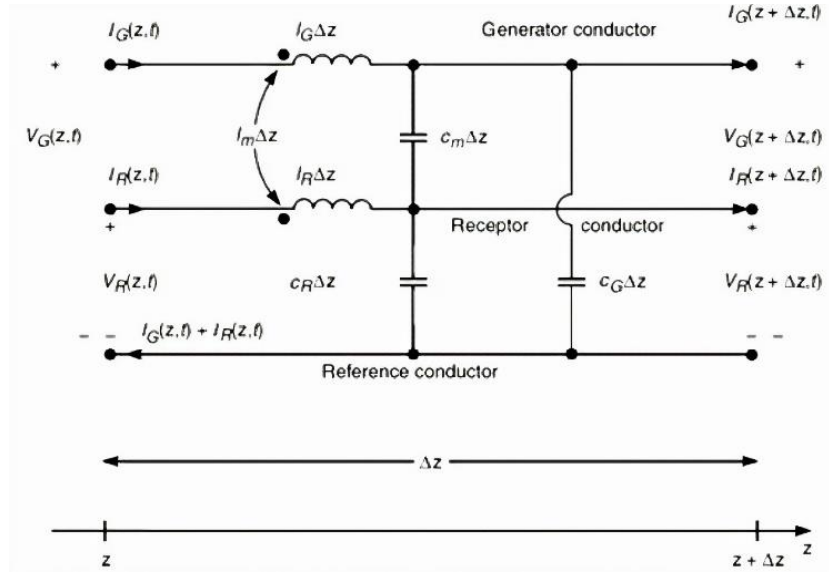


Fig. 12: Esquema de los efectos del crosstalk.

$$\frac{\partial}{\partial z} V(z, t) = -L \frac{\partial}{\partial t} I(z, t) \quad \text{Ec. 5}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} I(z, t) = -C \frac{\partial}{\partial t} V(z, t) \quad \text{Ec. 6}$$

$$V(z, t) = \begin{bmatrix} V_G(z, t) \\ V_R(z, t) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 7}$$

$$I(z, t) = \begin{bmatrix} I_G(z, t) \\ I_R(z, t) \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 8}$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se obtienen los valores de los parámetros requeridos para la simulación en las ecuaciones Ec. 9 y Ec. 10, y con ello obtener los valores de las inductancias y capacitancias que forman el circuito mostrado en la Fig. 12.

$$L = \begin{bmatrix} l_G & l_m \\ l_m & l_R \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 9}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_G + c_m & -c_m \\ -c_m & c_R + c_m \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 10}$$

Según el estudio desarrollado por A. Roy, S. Ghosh, y A. Chakrabarty, los resultados obtenidos con este tipo de simulación pueden considerarse como buenos, pero sería necesario realizar aproximaciones más exactas para obtener una mayor precisión [27].

Las variables que forman las matrices generadas en las Ec. 9 y Ec. 10 son: en el caso de la inductancia, se pueden distinguir entre la del cable generador (l_G), la del receptor (l_R) y la mutua (l_m), mientras que en el caso de las capacitancias aparecen la del cable generador (c_G), la del receptor (c_R) y la mutua (c_m). Cuando se habla de cable generador se refiere al cable que lleva la señal que contamina, mientras que el cable receptor es el que se ve contaminado por la señal ruidosa.

3. Diseño electrónico de la solución.

3.1. Presentación de la encimera.

La placa de inducción con la que se ha trabajado es una proporcionada por el Grupo B/S/H. En concreto, es el modelo StudioLine de la marca Siemens, el cual se puede ver en la fotografía de la Fig. 13. La característica principal de esta cocina es que el extractor de humos está situado en el centro. Este tipo de encimera es bastante inusual en España ya que su uso está más extendido en países nórdicos donde necesitan mantener el calor dentro del hogar, ya que con una campana extractora convencional se escapa parte del calor de la habitación. El inconveniente que generan este tipo de encimeras es la eliminación de espacio de cocinado y la duda de si realmente se consigue una extracción del humo óptima. Esto es debido a que los humos y vapores tienden a ascender, y el extractor debe ser lo suficientemente potente como para absorber estos gases. La potencia que necesita este sistema hace que se genere una fuente de ruido bastante grande, llegando a ser molesta en el peor de los casos.

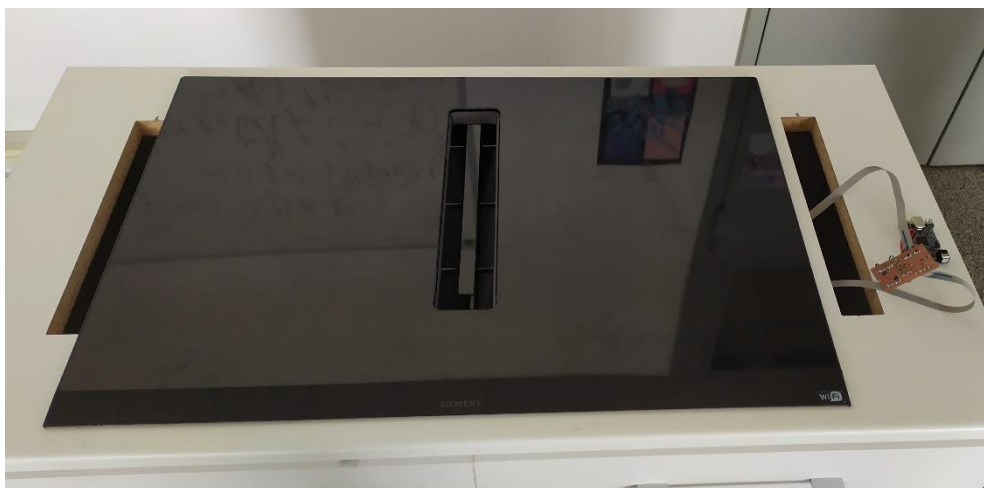


Fig. 13: Placa de inducción StudioLine.


Para el proyecto que se ha realizado, el factor del extractor de humos es la principal fuente de ruido. También hay que tener en cuenta los ruidos que se producen durante el cocinado.

En base a lo analizado en este trabajo, se ha decidido realizar una solución propia para la aplicación deseada, que es alcanzar un control de la cocina por voz. Debido a que se disponen de 16 micrófonos para realizar una distribución óptima en toda la placa de inducción se ha planteado un reparto que permita abarcar todas las zonas de una forma uniforme y así poder realizar una caracterización y unos ensayos lo más realistas posibles. La distribución que se plantea, basada en la cocina de la que se dispone, la cual aparece en la Fig. 14, es la que se muestra en la Fig. 15. La distribución ha sido realizada observando los espacios disponibles dentro de la propia placa, teniendo en cuenta cómo podría ser la topología del sistema de captación de las señales acústicas y, sobre todo, evitando interferir en el correcto funcionamiento de la cocina de inducción para poder realizar las pruebas posteriores con la cocina en marcha.



Fig. 14: Interior de la placa de inducción.

Los elementos enumerados en la Fig. 15 corresponden con:

- 1- Extractor de humos.
 - 2- Panel de control de la encimera.
 - 3- Bobinas de inducción de la encimera.
 - 4- Ventilador del extractor de humos.
-  Localización del micrófono en la placa.

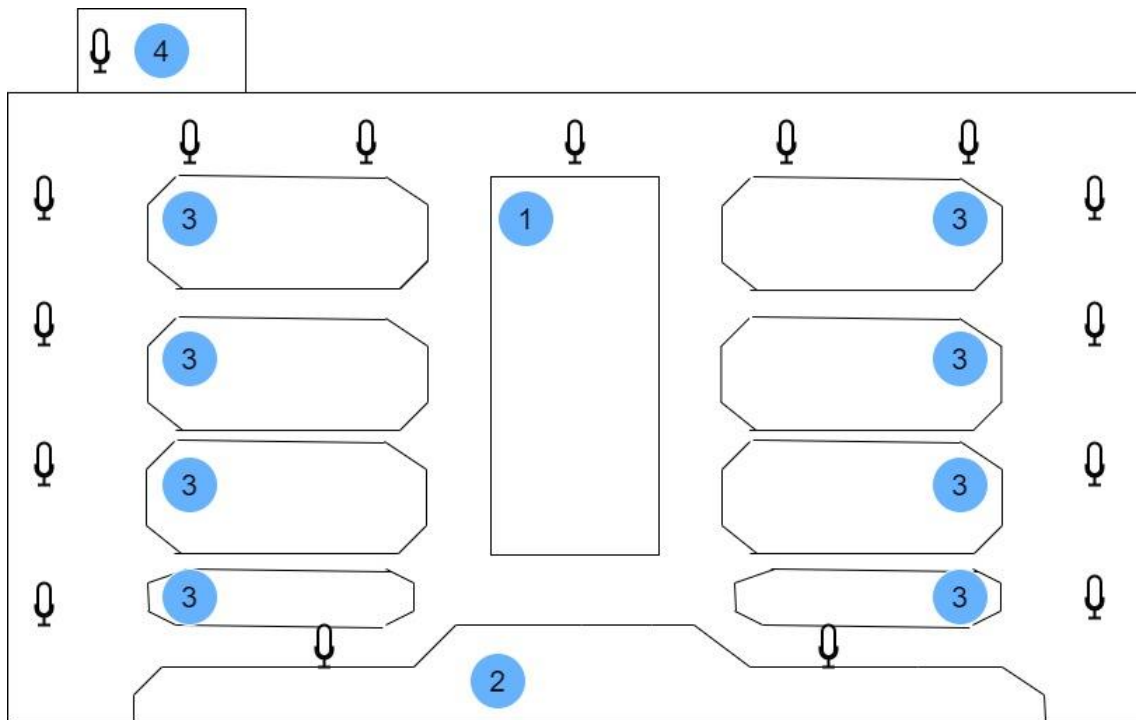


Fig. 15: Distribución de los micrófonos.

Se puede observar cómo los huecos más representativos son los que existen en los laterales y parte superior de la encimera, donde se colocarían la mayoría de los micrófonos. Por otro lado, se han colocado dos micrófonos cerca del panel de control para poder tener referencia del sonido que generan los botones táctiles cuando se manipulan. Lo mismo ocurre con el ventilador del extractor de humos, que es la fuente de sonido mayoritaria y es necesario saber qué valores de señal tiene para poder realizar posteriormente un buen filtrado de la señal.

Los 16 micrófonos que se utilizan se conectan al *Streamer*, Fig. 3, el cual permite trabajar con los datos en distintos formatos. En concreto, se ha trabajado con micrófonos PDM, cuyo funcionamiento se ha explicado anteriormente.

Como se puede apreciar en la Tabla 1, se dispone de 8 pines de señal, como se ha comentado anteriormente, una señal de alimentación a 3.3 V, otra de masa y, por último, dos señales de reloj.

Para recoger todas las señales de los micrófonos se ha pensado una configuración en estrella utilizando placas intermedias para evitar que haya cables largos dentro de la encimera. Por tanto, se ha considerado que cada placa intermedia recogerá las señales de cuatro micrófonos, y a su vez se conectará a otra que recogerá las señales que provienen del resto de placas para finalmente conectarlo al hardware principal, como se muestra en la Fig. 16.

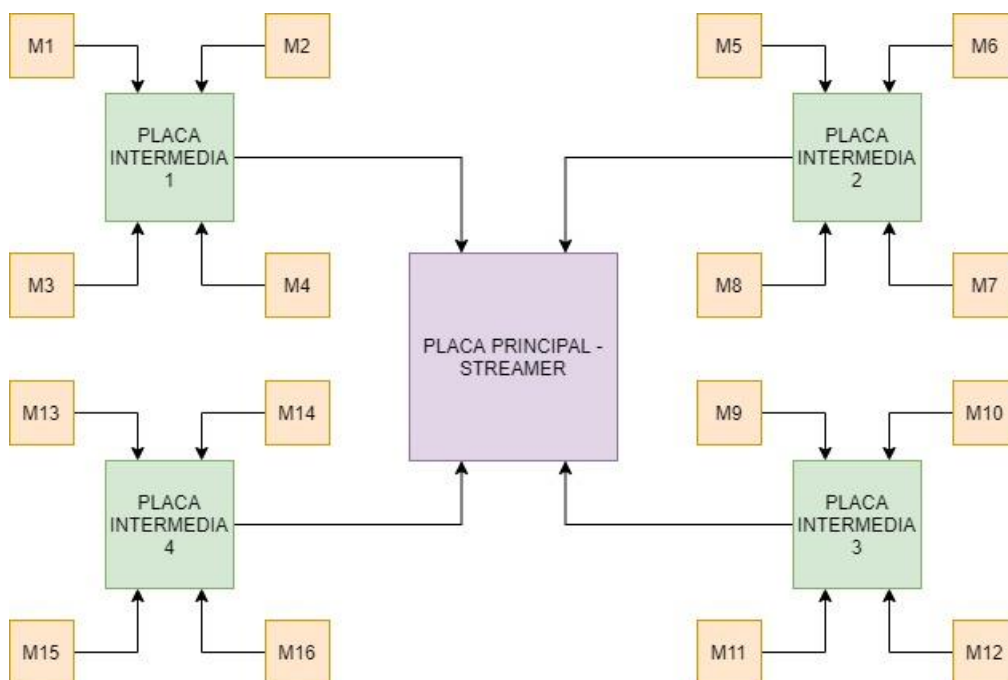


Fig. 16: Distribución en estrella.

3.2. Primeros diseños.

Inicialmente se fabricaron las placas intermedias donde se recogían 4 micrófonos para cada placa. Con estas placas se querían realizar las pruebas necesarias para comprobar la efectividad de los micrófonos y el funcionamiento con los distintos tipos de cables que se habían planteado.

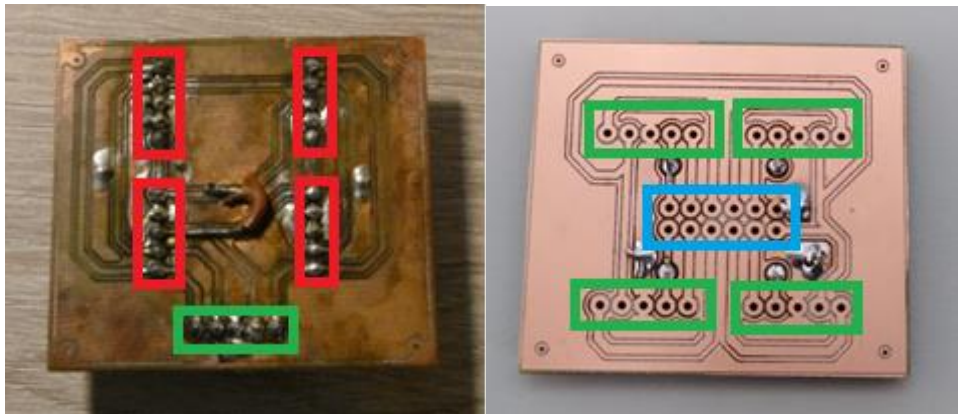


Fig. 17(a): Placa intermedia (izquierda). Fig. 17(b) Placa principal (derecha).

Los micrófonos constan de 5 pines a través de los cuales se llevan las señales de VCC, GND, SEL, CLK y DAT. El pin de SEL se conecta a VCC o GND en la placa intermedia en función del comportamiento deseado del micrófono (canal derecho o izquierdo respectivamente). Por tanto, en la Fig. 17(a) se ven los cinco conectores donde llegan las señales de los micrófonos, marcado en rojo, y el conector de abajo, marcado en verde, tiene los conectores de alimentación, masa, señal de reloj, datos del primer par de micrófonos y la otra de datos del segundo par de micrófonos. Mientras que en la Fig. 17(b), los conectores que cubren los rectángulos verdes son las señales que se conectan con la placa anterior, mientras que los conectores que se observan en el rectángulo azul son los que se conectan directamente con el Streamer.

Las decisiones de diseño para las placas fueron: utilizar las pistas lo más cortas posibles, sobre todo atendiendo la prioridad de las señales críticas como son la señal del reloj y la de datos ya que son bastante susceptibles al acople de ruido exterior. Las últimas pistas que se trazaron son las de alimentación, intentando siempre dejar todas las pistas por la misma cara para poder aplicar un plano de masa completo por la cara opuesta. Para esta primera aproximación, las decisiones de diseño no fueron las óptimas, pero se han tratado de corregir en los siguientes diseños.

Para comprobar el correcto funcionamiento de las placas se colocaron los micrófonos en los conectores que aparecen en la parte superior e inferior de la Fig. 17(a) y se enviaron las señales al Streamer, capturándose mediante el software llamado Audacity, viendo las señales correspondientes en la pantalla.

Estas placas se utilizaron para poner a prueba las distintas opciones disponibles de cables que se iban a utilizar. Los cables con los que se han realizado las pruebas son: cable de cobre estañado, cable apantallado y cable plano.

3.3. Problemas detectados.

3.3.1. Pérdidas en la señal.

Inicialmente, se trató de utilizar un cable de cobre recubierto de estaño (como los utilizados en las prácticas de laboratorio) para cada señal que llega al micrófono. Los resultados no fueron satisfactorios debido a que las señales de CLK y DAT se contaminaban cuando se trataba de utilizar longitudes de cable largos (superiores a 0.5 m aproximadamente) para hacer las pruebas iniciales, tal y como se observa en la Fig. 18. Esta señal sale distorsionada, cuando en realidad debería tener una forma de onda cuadrada con valores entre 0 y 3.3 V y con una frecuencia de 3 MHz. Como se sabe que es muy complicado obtener una onda perfectamente cuadrada, se pretende que sea lo menos distorsionada posible, tratando de conseguir los valores de tensión que permitan mantener los estados lógicos '0' y '1' durante el tiempo que le corresponde a cada estado.

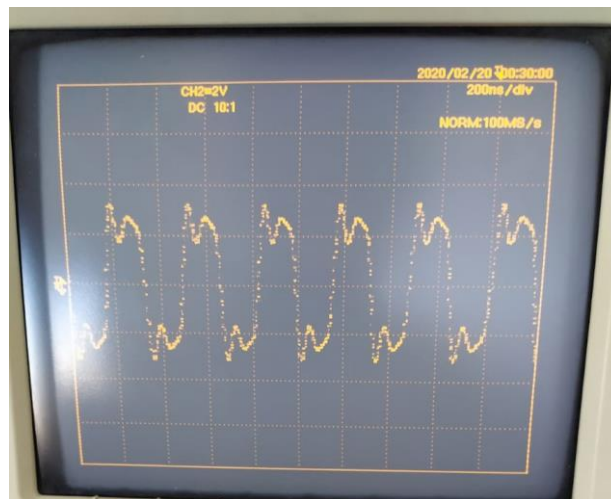


Fig. 18: Señal CLK con cables normales.

El efecto que se produce en la señal si no se alimenta correctamente dentro de los valores que indica el fabricante, tanto alimentación como señal del reloj, la señal que se captura se puede ver afectada de tal forma que se introduce ruido en las señales que se registran en Audacity. Como se puede ver en la Fig. 19 (y de forma ampliada en la Fig. 20).

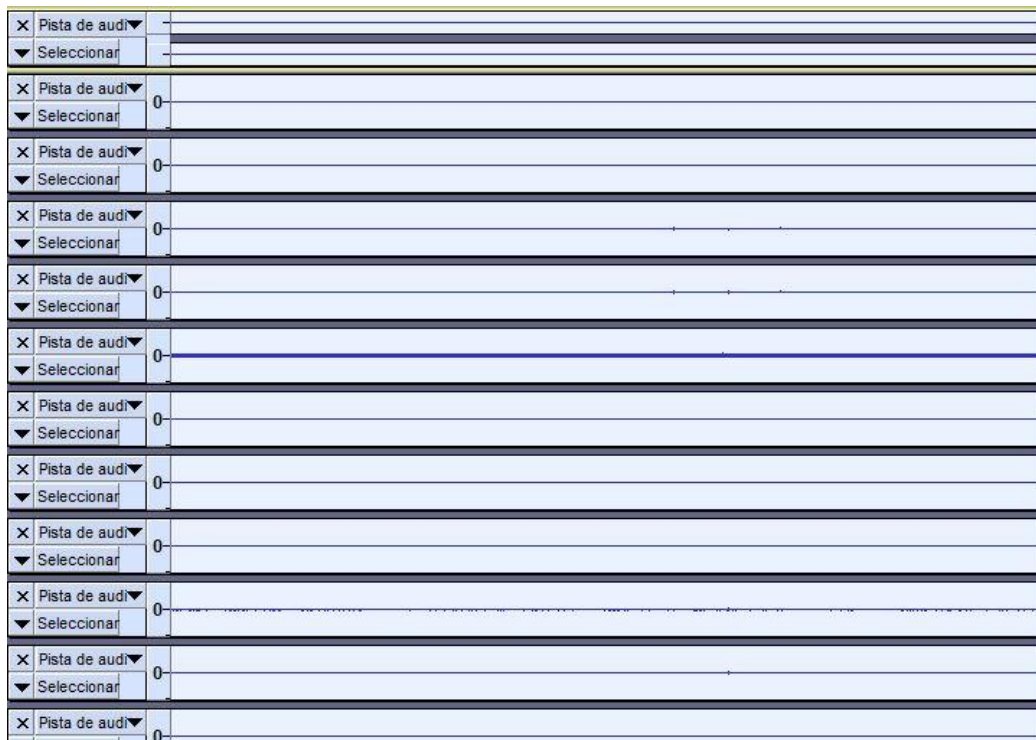


Fig. 19: Señales en Audacity contaminadas por una mala alimentación.

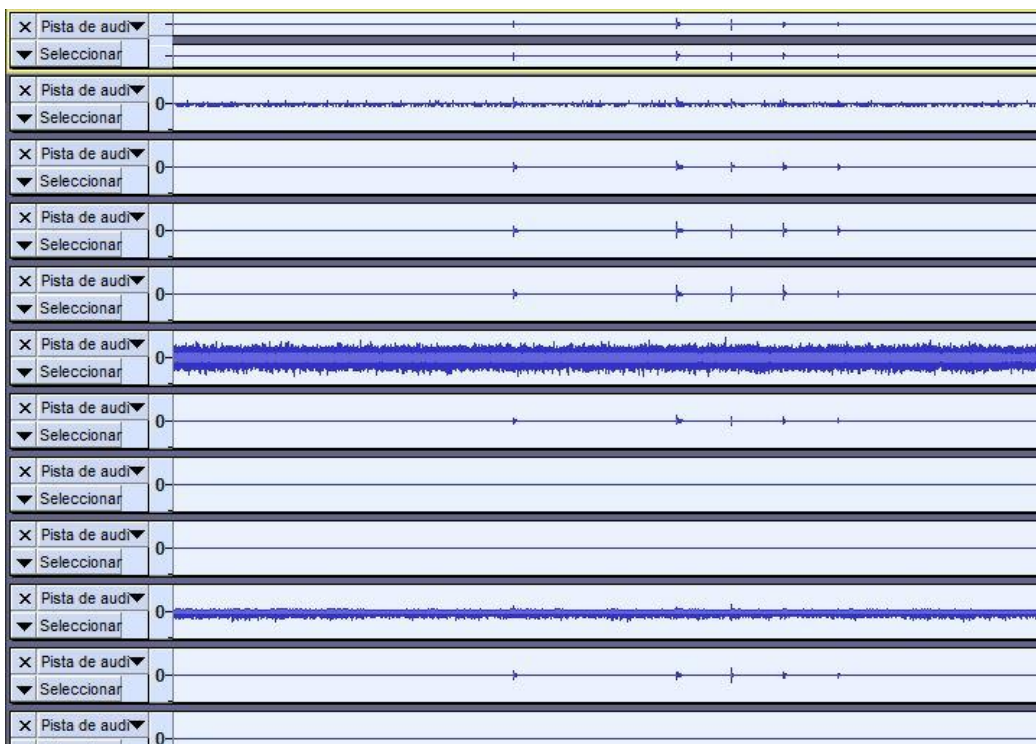


Fig. 20: Señales en Audacity contaminadas por una mala alimentación (ampliada).

Para analizar los diferentes efectos que aparecían en los cables se decidió realizar unas simulaciones básicas que permitían ver el comportamiento de las señales.

Primero, se caracterizó el micrófono, midiendo los valores de la impedancia de la carga (micrófono) y la impedancia de salida de la fuente (*Streamer*), al igual que los valores de las corrientes y tensiones que había en cada señal del micrófono.

Para medir la impedancia de salida, se mide la tensión que existe a la salida sin ninguna carga ($V_{vacío}$), y a continuación hay que medir de nuevo la tensión que cae en una resistencia de 1 k Ω (V_{carga}). Así, se obtiene la resistencia de la fuente (R_s) como se indica en la Ec. 11, obteniendo un valor de 25 Ω .

$$R_s = 1k \cdot \frac{V_{vacío} - V_{carga}}{V_{carga}} \quad \text{Ec. 11}$$

Algo similar ocurre con la resistencia de la carga, donde se tiene que medir la tensión que cae en el micrófono para calcular la resistencia que tiene (R_{carga}), tal y como se muestra en la Ec. 12. El valor obtenido para la R_{carga} es de 11 M Ω .

$$R_{carga} = \frac{V_{carga}}{V_{vacío} - V_{carga}} \cdot R_s \quad \text{Ec. 12}$$

Al ver los problemas detectados, se decidió simular el efecto que se produce cuando se sitúan dos micrófonos cerca y la transcendencia que tenía el poner los cables a una distancia pequeña.

Los valores de las inductancias mutuas L2 y L4 que aparecen en la Fig. 21 han sido calculados a partir de las leyes físicas del electromagnetismo. Se realizaron los cálculos pertinentes para establecer todos los valores necesarios a partir de las ecuaciones Ec. 13, Ec. 14, Ec. 15, Ec. 16 y Ec. 17.

$$B = \frac{\mu_0 I \cdot l}{4\pi d^2} \quad \text{Ec. 13}$$

La Ec. 13 permite conocer el campo magnético que genera un hilo conductor con una longitud finita a una distancia determinada. Las variables que forman el campo magnético son: la permeabilidad magnética en el vacío (μ_0), la corriente que circula, I, la longitud l del cable y la distancia d que existe entre el cable generador y receptor.

$$\Phi = B \cdot S \quad \text{Ec. 14}$$

Una vez obtenido el campo magnético B a partir de la ecuación anterior es necesario saber el flujo de campo que existe, simplemente haciendo el producto de B por S, siendo esta la superficie que encierra el cable por el que circula la corriente. Este valor se obtiene a partir de la Ec. 14.

$$M = \frac{\Phi_2}{I_1} \quad \text{Ec. 15}$$

La inducción mutua, Ec. 15, permite conocer la relación entre el flujo, Φ_2 , que hay en el secundario y la corriente del primario, I_1 .

$$K = \frac{\Phi_{21}}{\Phi_{11}} \quad \text{Ec. 16}$$

A través de la Ec. 16 se calcula el coeficiente de acoplamiento, cuyo valor está determinado por $0 \leq k \leq 1$. Si su valor es 1, indica que el acoplamiento entre las inductancias es perfecto, mientras que es todo lo contrario si $K = 0$. Se obtiene resolviendo la fracción entre el flujo que afecta un cable sobre el otro, Φ_{21} , entre el flujo que se genera en un mismo cable, Φ_{11} .

$$L1 \cdot L2 = \left(\frac{K}{M}\right)^2$$

Aplicando la Ec. 17 se obtiene la relación que existe entre L1 y L2 utilizando el valor del coeficiente de acoplamiento, K, y el de inducción mutua, M.

Finalmente, determinando que L1 = L2, se podía establecer el valor de las inductancias mutuas para realizar la simulación posteriormente.

Los valores de R2, L1 y C1, al igual que los de R5, L3 y C2 (todos ellos aparecen en la Fig. 21) están establecidos con los parámetros que indica el fabricante.

VALORES COMPONENTES MODELADO DE LOS CABLES				
R_I	L_I	C_I	L_ind	Comentarios
40 Ω	0.6889·1 μH	131.2335·1 pF	0.176 μH	Esquema con cable multifilar "I" representa la longitud del cable

Tabla 4: Valor de los componentes que representan un sistema con cableado multifilar.

En la Tabla 4 se pueden ver los valores que han tomado los distintos componentes que forman el sistema que representa un cable multifilar simple, mostrado en la Fig. 21. Los valores R_I, L_I y C_I corresponden con las notaciones {R(I)}, {L(I)} y {C(I)} respectivamente que aparecen en la Fig. 21. Esta notación hace referencia a que los componentes que se mencionan están en función de un parámetro (que va entre paréntesis) y que en este caso es la longitud del cable (I). Por otro lado, como se ha calculado anteriormente, las resistencias R3 y R6 corresponden con la resistencia de salida del generador, cuyo valor es de 25 Ω, mientras que las resistencias R1 y R4 son las resistencias de carga de los micrófonos, cuyo valor es de 11 MΩ.

El primer ejemplo que se probó fue con cables multifilares, cuya simulación se plasmó con la caracterización que se puede ver en la Fig. 21, donde los valores de los componentes se han obtenido caracterizando el cable utilizado a partir de los datos proporcionados por el fabricante. Los resultados obtenidos se presentan en función de la longitud del cable. Se ha querido representar la onda de reloj que necesita el micrófono para funcionar, por lo tanto, conforme más largo es el cable, más se filtra la onda y se aleja de la señal real. En la Fig. 22 se ha representado el valor de la tensión medida al final del cable, utilizando longitudes de cable entre 0.1 y 1 m (con saltos de 0.1m), y se puede observar la diferencia que hay entre el estado en alto y bajo para cada longitud. Se puede determinar que, para una longitud corta, el comportamiento de la señal es mucho más cercano al ideal, mientras que conforme va aumentando su valor, el comportamiento se aleja del deseado.

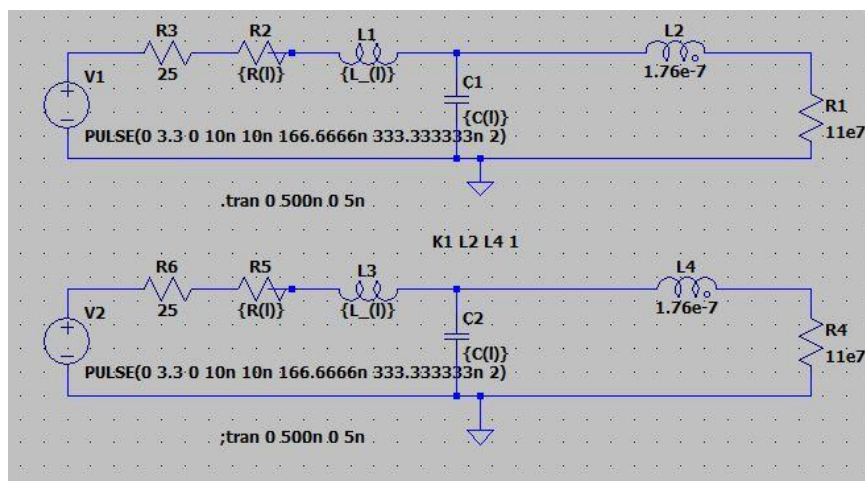


Fig. 21: Esquema que representa el cableado multifilar.

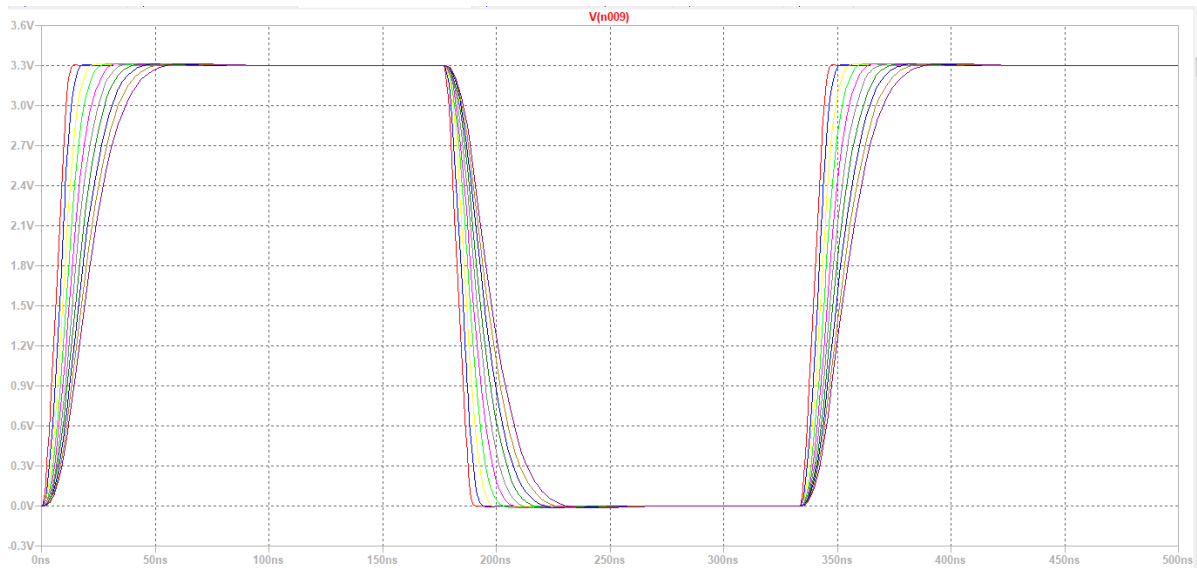


Fig. 22: Tensión en la carga con cableado multifilar.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación, se constató que ésta no era la mejor aproximación que se podía realizar ya que las curvas de tensión representadas en la Fig. 22 se no se parecen a lo que se observa en la realidad.

Para comprobar realmente el efecto de los problemas que están surgiendo se puede calcular el límite de la longitud de los cables con los que se trabaja, cuyo valor depende de la rapidez con la que varía la señal. En este caso, como se dispone de una señal principal, la del reloj, que es la que hace que varíe la selección entre canal derecho e izquierdo, se utilizarán los datos de dicha señal para realizar los siguientes cálculos.

El tiempo de subida, t_r (time rise), se ha medido con el osciloscopio en la realidad y se ha obtenido un valor de 12.5 ns. A partir de este valor se ha calculado el ancho de banda, BW, con la Ec. 18 para calcular el rango de frecuencias a partir del cual ya no tiene efecto la frecuencia de oscilación de la señal. Con la Ec. 19 se calcula la longitud de onda máxima a partir de la cual empiezan a haber problemas con las señales. Y, por último, es necesario determinar cuál es la longitud máxima del cable permitida para evitar que se acoplen señales indeseadas. La Ec. 20 permite conocer que la longitud máxima del cable es de 0.56 m [28].

$$BW_{clock} = \frac{1}{\pi \cdot t_r} = \frac{1}{\pi \cdot 12.5n} = 26.52 \text{ MHz} \quad \text{Ec. 18}$$

$$\lambda = \frac{300}{BW_{clock}(\text{MHz})} = \frac{300}{26.52} = 11.30 \text{ m} \quad \text{Ec. 19}$$

$$long_{cable} \ll \lambda \rightarrow long_{cable} = \frac{\lambda}{20} = \frac{11.30}{20} = 0.56 \text{ m} \quad \text{Ec. 20}$$

El valor que se ha calculado como la longitud máxima sin obtener distorsión de la señal puede modificarse si se utilizan diferentes configuraciones del cable. Las propuestas aplicadas son: utilizar cable coaxial, par trenzado o hilos paralelos.

3.3.2. Problemas de masa.

Cuando se trabajan con distintas placas puede aparecer un problema con la conexión entre la referencia que debe haber entre ellas. En la Fig. 23 se puede ver la medida en el osciloscopio del nivel de tensión que hay entre los planos de masa de las placas intermedias de nuestro diseño. No se obtiene una señal limpia, lo que implica que no hay una buena conexión entre los distintos planos de masa ya que la señal que se debería ver en el osciloscopio sería continua y de tensión nula.

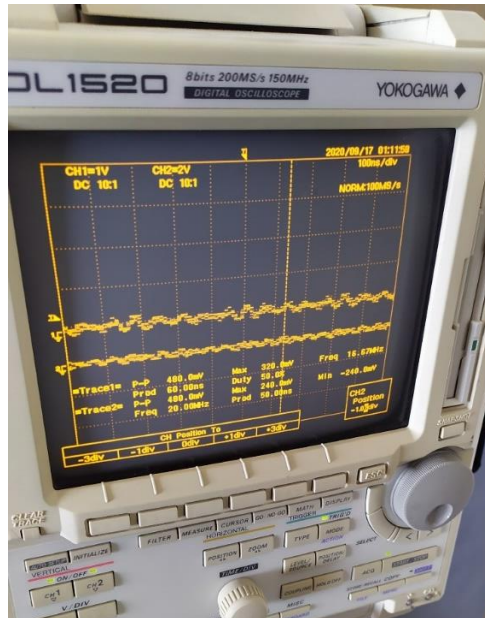


Fig. 23: Diferencia entre los planos de masa.

3.4. Aplicación de las soluciones propuestas.

Se ha intentado realizar las configuraciones que se han propuesto anteriormente, realizando diversas pruebas para comprobar cuál era la mejor configuración. Para determinar si una configuración es válida o no, se realizaron las pruebas con longitudes superiores a la obtenida en la Ec. 20. En concreto, se utilizaron longitudes de cable que estaban entre los 70 y 90 cm, ya que se considera que es una longitud lo suficientemente larga para abarcar uno de los peores casos dentro de la placa de inducción.

A. Cable coaxial.

Este tipo de cable es muy utilizado para transmitir señales de alta frecuencia. La característica principal de este tipo de cables es que tienen un conductor central, dedicado al transporte de los datos, y una malla, que actúa como retorno de la corriente. Entre ambos se sitúa un dieléctrico cuyas características dependen de la calidad del cable.

La experiencia con este cable es que es muy voluminoso y no resulta cómodo trabajar con él ya que se dispone de dos señales sensibles en cada micrófono, el reloj y los datos, y eso hace que el montaje aumente mucho su tamaño. Un ejemplo del montaje sería el que aparecen en la Fig. 24.



Fig. 24: Micrófono con cables coaxiales.

B. Par trenzado.

Cuando se propuso utilizar la solución del par trenzado, se decidió trenzar las señales más ruidosas que aparecen en el sistema, que son los datos y reloj, junto a la señal de masa, cada uno de forma individual. La funcionalidad de este método es que exista el menor bucle posible entre la línea de ida de la corriente y la de vuelta. Al evitar este bucle, la impedancia del cable disminuye y por tanto las señales que se obtienen en el osciloscopio son prácticamente iguales al comienzo y al final del cable. Los resultados, con este tipo de conexión, son bastante aceptables, pero volvía a aparecer el problema de la solución anterior y es que el trenzado de cables hacía que ocupasen más espacio en la encimera sobre la que se trabaja, aspecto que resulta inviable para realizar las pruebas necesarias. La muestra de cómo sería el cable utilizado aparece en la Fig. 25, donde los cables negros son los de GND, el rojo es VCC, el azul es la señal de datos y el cable verde es la señal del reloj. La imagen es una muestra representativa de cómo sería la disposición de los cables trenzados.

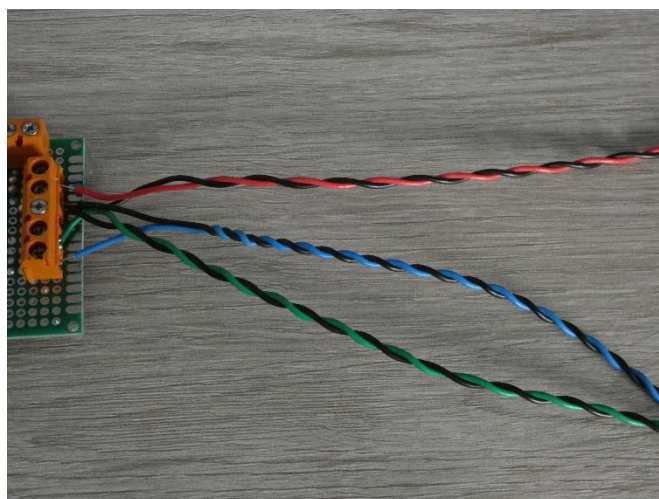


Fig. 25: Cables con par trenzado.

C. Hilos paralelos.

Con esta técnica sucede algo parecido a la anterior, donde se consigue que el bucle que se crea entre el camino de ida de la corriente y el de vuelta sea nulo, ya que si se consigue que el camino de ida y el de vuelta sean paralelos y estén pegados, no aparece ese bucle de corriente. Una configuración posible sería la que se muestra en la Fig. 26, donde se coloca una señal de GND entre cada señal que se lleva al micrófono.



Fig. 26: Cable plano para hilos paralelos.

A la hora de aceptar o rechazar las opciones se ha tenido en cuenta también la reacción que tiene el montaje cuando se captan las señales de audio en el sistema de captura software basado en Audacity. En algunos momentos, la señal que se medía estaba contaminada y se registraba ruido que no se corresponde con la señal de audio real, como se puede observar en la Fig. 27. Esto puede ser debido a la complejidad del montaje ya que algunos cables no permitían una buena conexión y se introducía ruido o al tratarse de cables largos podía introducirse ruido externo si no se aíslan de una forma correcta.

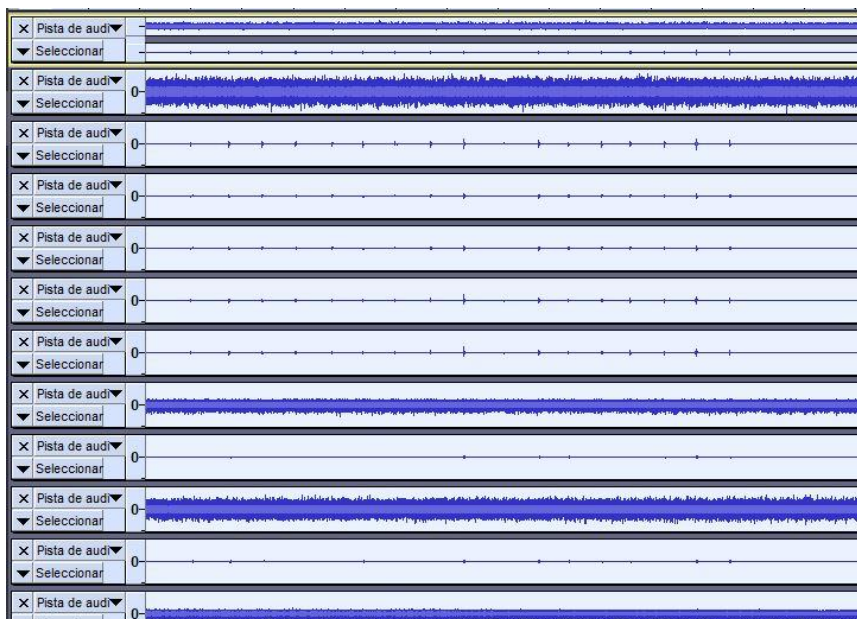


Fig. 27: Señal con ruido acoplado.

4. Simulación y diseño final.

Tal y como se ha visto en el apartado anterior, las soluciones de simulación propuestas tienen bastantes defectos a la hora de su implementación.

Por tanto, vistos los resultados obtenidos en la primera simulación se decidió realizar una simulación más próxima a la realidad. El camino a seguir es utilizar el esquema mostrado en la Fig. 12, mostrado por A. Roy, S. Ghosh y A. Chakrabarty, [27], a través de las ecuaciones características para poder obtener los parámetros con los que se trabajan. En el Anexo 1 se puede encontrar un *script* de Matlab que permite obtener los valores de los componentes. Para ello se deben introducir los parámetros necesarios como son la distancia entre cables, permeabilidad y radio de los conductores entre otros. La Fig. 28 muestra el esquemático diseñado con los valores calculados para obtener la simulación deseada. Se siguen incluyendo los valores propios de los cables y se han añadido los componentes relativos que simulan la parte de crosstalk.

VALORES COMPONENTES MODELADO DE LOS CABLES								
R ₁	L ₁	C ₁	LM ₁	LG ₁	LR ₁	CG ₁	CM ₁	CR ₁
40	0.6889·1	131.2335·1	1.061·1	1.52·1	1.522·1	4.3168·1	9.92·1	4.2985·1
Ω	μH	pF	μH	μH	μH	pF	pF	pF

Tabla 5: Valores de los componentes que representan un sistema con crosstalk.

En la Tabla 5 se pueden ver los valores que adquieren los componentes que representan el efecto del crosstalk en función de la longitud del cable. Al igual que lo comentado anteriormente en el apartado 2.7.1 sobre el significado de R₁, L₁ y C₁, los valores de LM₁, LG₁, LR₁, CG₁, CM₁ y CR₁ se corresponden con las inductancias y capacitancias de los cables generadores, receptores y modo común respectivamente.

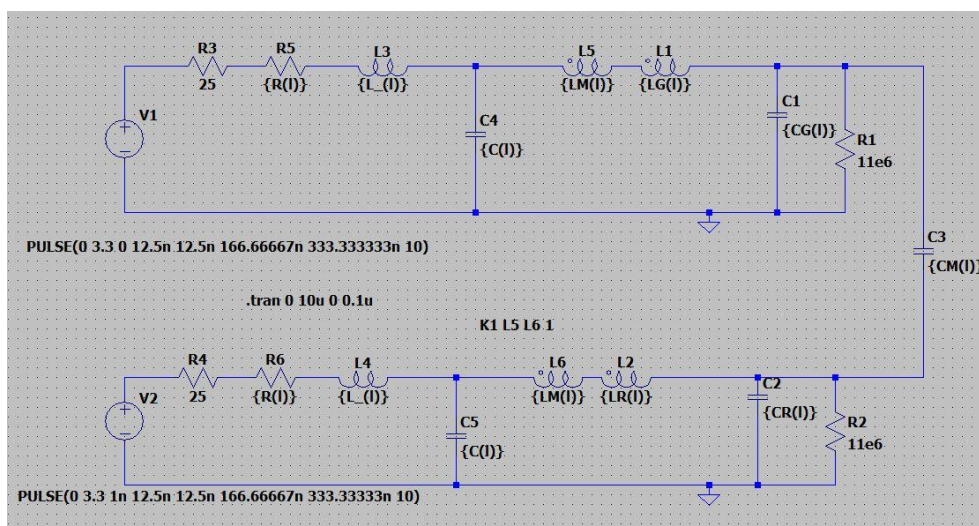


Fig. 28: Esquema de la simulación del crosstalk.



Fig. 29: Resultados de la simulación del crosstalk.

El efecto del crosstalk hace que la señal se distorsione de una forma que afecta al comportamiento del sistema que se está estudiando, ya que se introduce ruido en la señal que se está analizando. El resultado obtenido está representado por la señal roja que se ve en la Fig. 29, dando la forma de una señal cuadrada, representando la señal de reloj en el micrófono, al final del cable, mientras que el resto de las señales son las obtenidas al final del cable en función de la longitud del cable.

Esto conlleva a concretar que, la simulación realizada sobre el *crosstalk*, pudiéndose ver en la Fig. 29, puede relacionarse con la medición tomada anteriormente sobre la señal de reloj, la cual aparece en la Fig. 18. Esta situación hace que haya sido necesario adaptar el diseño realizado a las señales con las que se han trabajado. Este es el motivo principal por el cual se ha considerado utilizar una configuración de cable plano de hilos paralelos como la que se muestra en la Fig. 26.

4.1. Diseño de las placas.

4.1.1. Placa para los micrófonos.

Para realizar la configuración que se planteó inicialmente se han tenido que fabricar unas placas de circuito impreso para poder facilitar la distribución deseada. Se ha decidido realizar un diseño de PCB único para montar los micrófonos y así su configuración de canal derecho o izquierdo sea mucho más sencillo. El diseño se muestra en la Fig. 30, conectándose en el conector JP1 el micrófono con el que se trabaja. Los componentes J1, J2 y J3 son 3 conectores donde van los cables que llevan las señales y el componente JP2 es un jumper de selección de canal izquierdo o canal derecho para el micrófono.

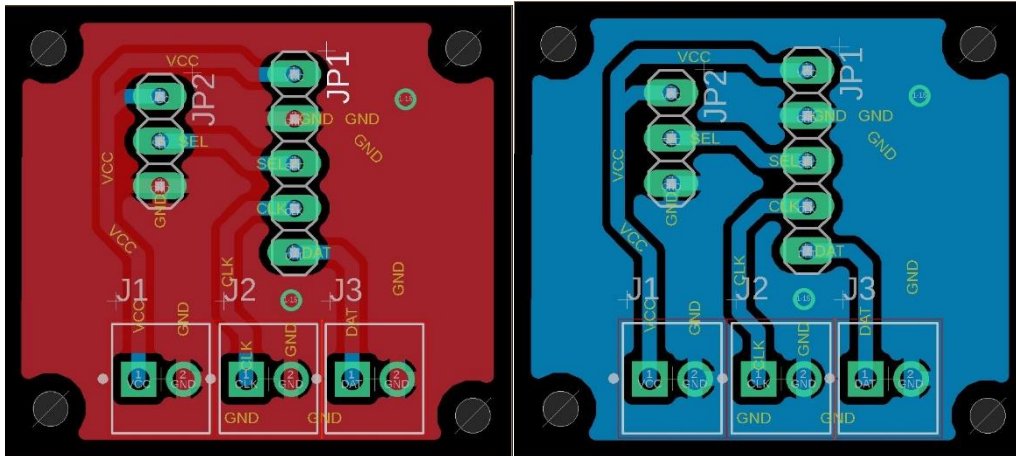


Fig. 30: (a)Diseño PCB micrófonos cara TOP (izquierda). Fig. 30: (b)Diseño PCB micrófonos cara BOTTOM (derecha).

Cabe destacar la selección de los conectores atornillables, Fig. 31, ya que son fáciles de insertar, soldar y no tiene influencia el uso de un cable cualquiera. Esto quiere decir, que no importa el cable que se utilice ya que siempre resulta cómodo realizar las conexiones. Otro motivo de su elección ha sido el precio, el cual es de 0.28 €. Se estuvo estudiando la opción de utilizar otro tipo de conectores, pero eran un poco más complicados de manipular y su precio era más elevado. También es bastante útil cuando se está cambiando constantemente la configuración de los micrófonos ya que la longitud de los cables va variando y para intercambiar cables es mucho más cómodo utilizar este conector.



Fig. 31: Conector atornillable.

4.1.2. Placa intermedia.

En la Fig. 16 se ve la topología elegida en estrella que requiere de una placa intermedia que permita recoger los micrófonos para una mayor agrupación y poder reducir el número de cables distribuidos por la encimera. Por ello, en la Fig. 32 aparecen las configuraciones top y bottom de los PCB diseñados, donde todos los elementos que aparecen en el diseño tanto en la parte izquierda y derecha, como en la parte inferior, son conectores atornillables donde van conectados los cables que vienen de los micrófonos y se dirigen a la placa principal.

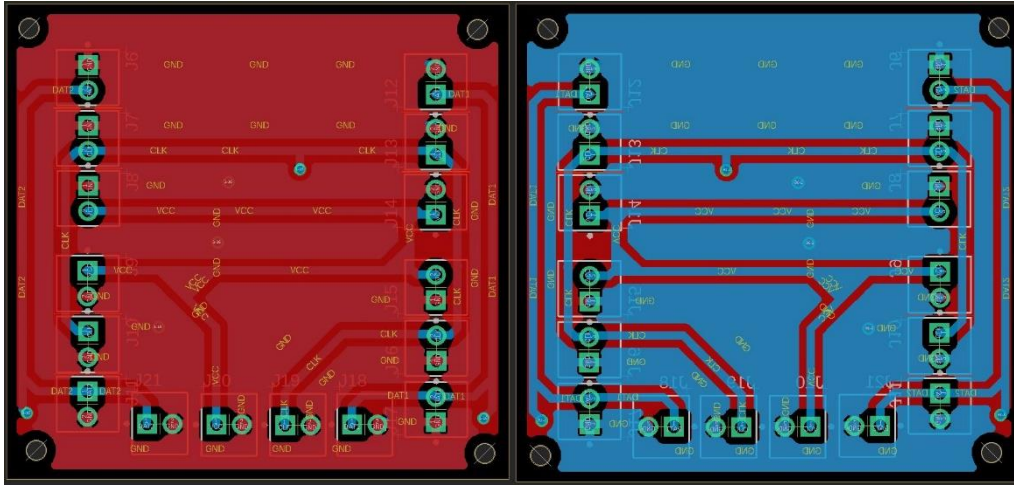


Fig. 32: (a)Diseño PCB intermedia cara TOP(izquierda). Fig.32 (b) Diseño PCB intermedia cara BOTTOM(derecha).

4.1.3. Placa principal.

Finalmente, se dispone de la placa principal, mostrada en la Fig. 33 y la Fig. 34, la cual recoge todas las señales que vienen de todos los micrófonos y a través del conector central se pueden enviar dichas señales a la placa *Streamer*. Se han colocado un par de condensadores para evitar rizados de tensión y un diodo para evitar realizar una conexión inversa de la alimentación y así proteger el dispositivo o alguno de los micrófonos. La idea principal del conector central es que se coloquen unos pines hembra para poder conectar el PCB diseñado sobre el *Streamer*, haciendo que coincidan los pines correspondientes a modo de escudo (*shield*).

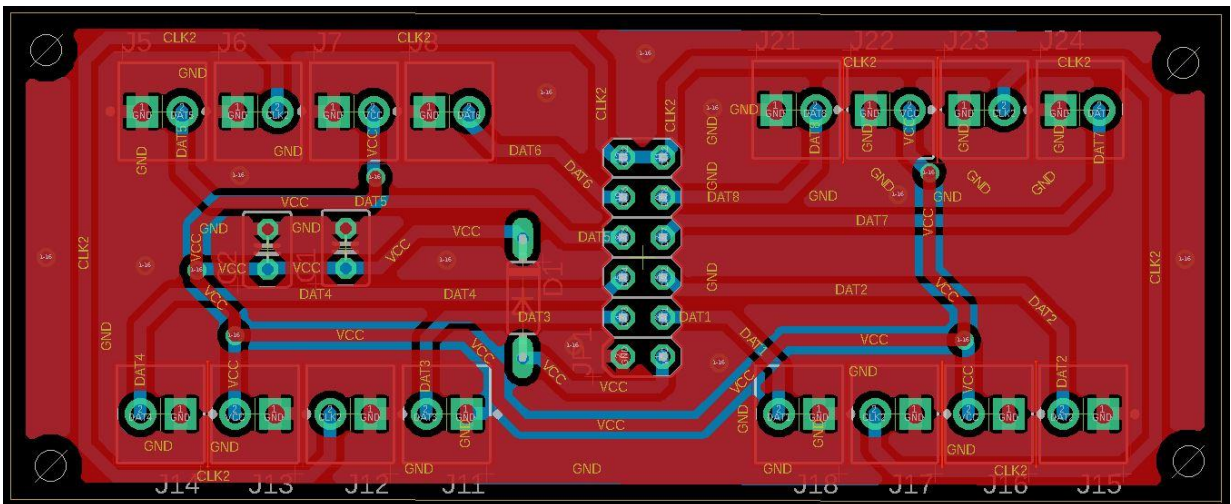


Fig. 33: Diseño PCB principal cara TOP.

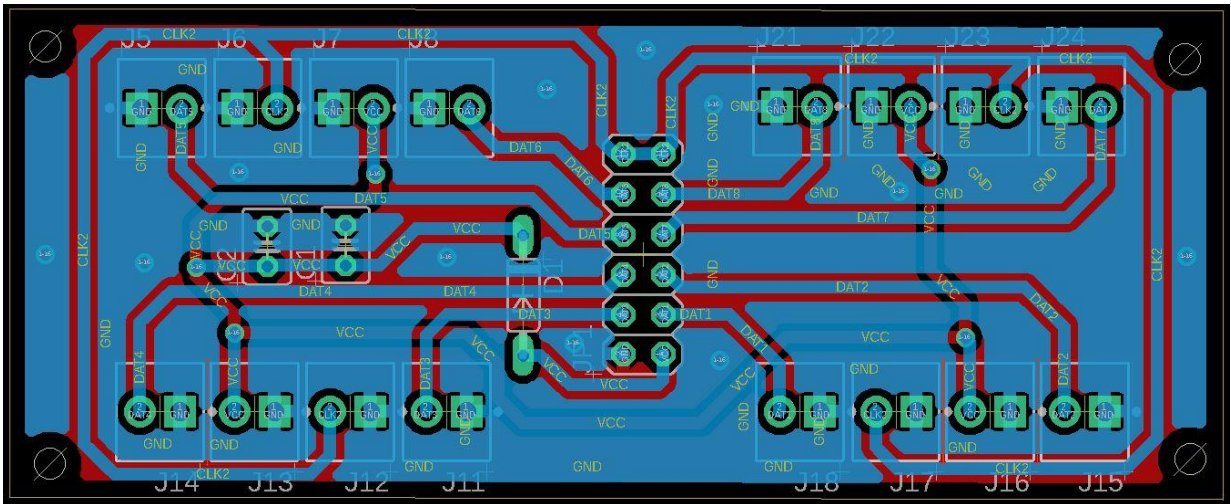


Fig. 34: Diseño PCB principal cara BOTTOM.

La característica principal que tienen todas las placas que se han diseñado es que se ha asegurado un plano de masa por una de las caras, en este caso en la cara top, para poder facilitar el camino de retorno de la corriente. En el caso de la placa principal, no se ha podido evitar colocar una pista de alimentación por la cara top, pero el plano de masa sigue siendo lo bastante grande como para cumplir lo esperado.

A la hora de diseñar las placas se ha tenido en cuenta también el espacio disponible en la encimera. Esto implica que se ha tenido que limitar el tamaño de las placas, intentando que estas fuesen lo más pequeñas posibles.

4.2. Resultado de las placas diseñadas.

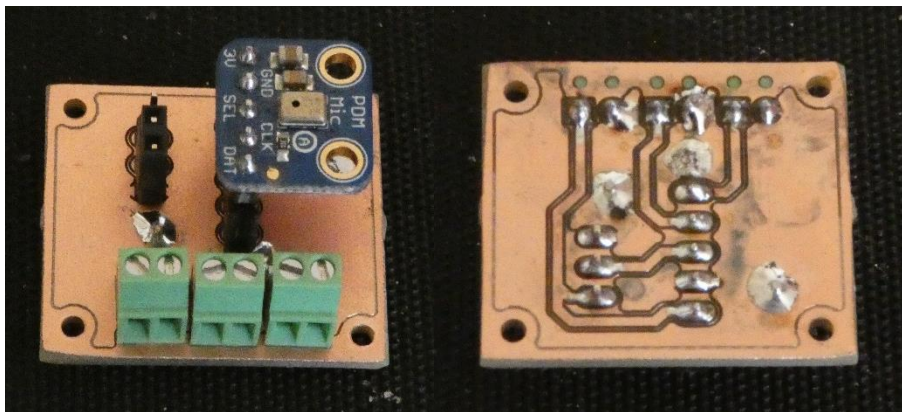


Fig. 35: Prototipo de PCB final de los micrófonos.

Comparando el PCB que se muestra en la Fig. 35 con el diseño que aparece en la Fig. 30, se puede observar cómo se han colocado los conectores atornillables, siendo estos enfocados hacia el exterior de la placa para que su acceso sea mucho más sencillo. También se observa el jumper utilizado, en la parte superior izquierda de la imagen, el cual permite seleccionar el canal que tendrá el micrófono (izquierdo o derecho), tal y como se ha mencionado anteriormente.

Las placas intermedias que se han fabricado son las que se muestran en la Fig. 36, las cuales permitirían recoger las señales de cuatro micrófonos y llevarlas a la placa principal, la cual se conecta directamente al hardware que permite capturar las señales y grabarlas en el ordenador a través de la conexión USB.

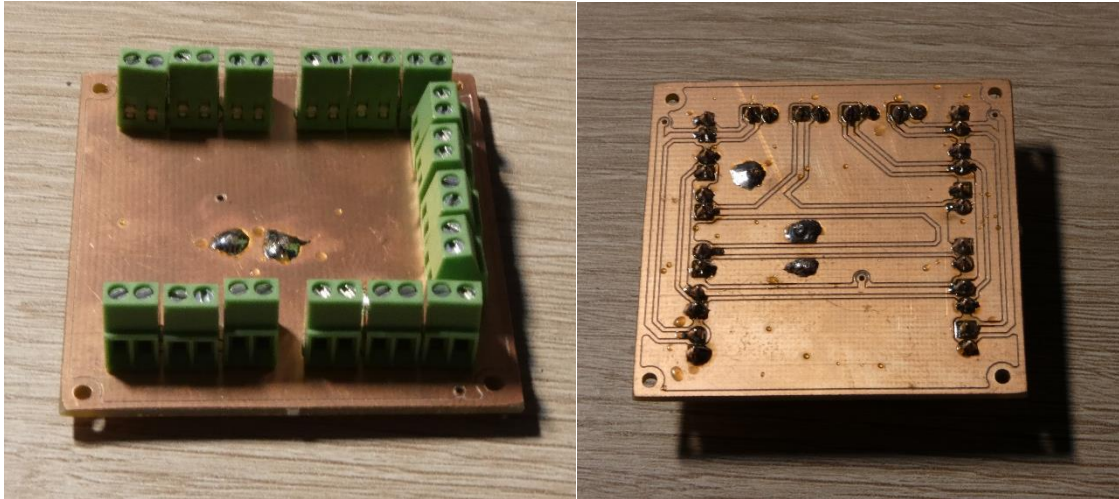


Fig. 36: Prototipo de PCB final de las placas intermedias.

Durante el diseño de estos PCB hubo diversos problemas en el ruteo de las señales debido a que era complicado cumplir las normas básicas de ruteo (pistas cortas y plano de masa, entre otras normas). Así que se decidió priorizar el poder utilizar una cara completa como plano de masa y tratar de realizar el mejor ruteo posible por la cara *bottom*. La principal intención fue evitar crear bucles con las pistas de reloj y señal ya que son las que trabajan a altas frecuencias, pero al no ser especialmente críticas su efecto se veía reducido en cierta medida.

Por último, la placa que recoge todas las señales y se conecta con el Streamer se observa en la Fig. 37 y la Fig. 38. Como se observa en la Fig. 38, se dispone de un conector en el centro del PCB que se conecta directamente con el Streamer, mientras que alrededor de la placa hay unos conectores atornillables donde se conectan los cables que vienen de las placas intermedias.

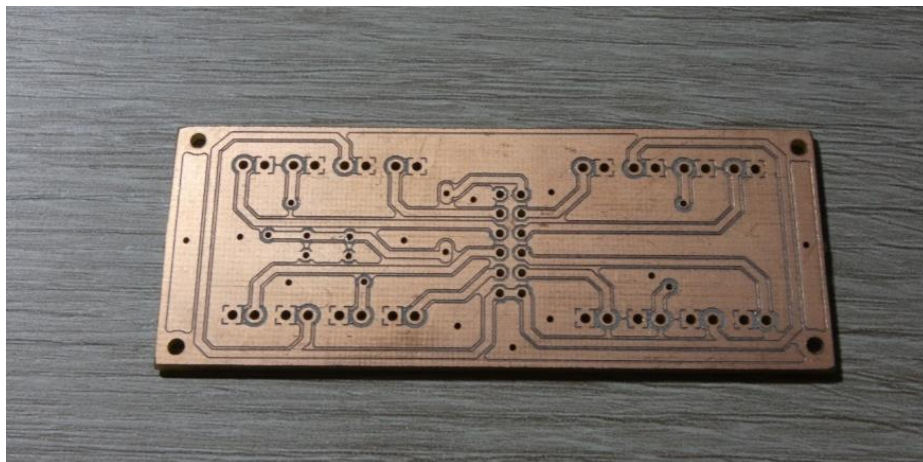


Fig. 37: Prototipo de PCB final de la placa principal.

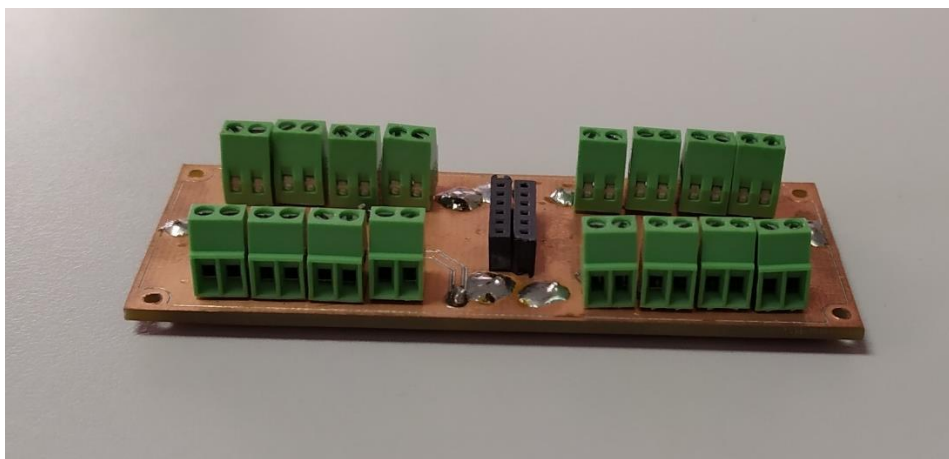


Fig. 38: Prototipo de PCB final de la placa principal montada.

Con estas placas se alcanzan buenos resultados con hasta 12 micrófonos. En el momento en que se añaden más, las señales que se captan son inestables y se introduce ruido al sistema. Este ruido puede tener tres procedencias:

- **Caída de tensión:** La tensión que llega a los micrófonos no es estable y por lo tanto el funcionamiento del micrófono no es el adecuado.
- **Cables largos:** Tal y como se ha demostrado en la Ec. 20, si se supera una longitud máxima de cable, la señal que se transfiere puede ser problemática o puede verse afectada. Por tanto, se tratará de realizar un ajuste de cables para reducir su longitud lo máximo posible.
- **Planos de masa:** Es recomendable utilizarlos siempre que sea posible para facilitar un buen retorno de la corriente. Las placas con las que se ha trabajado hasta ahora tienen el plano de masa al aire, y las soldaduras de las vías realizadas también pueden afectar a la hora de un buen retorno de la corriente.

Por todo ello, se va a tratar de hacer unas placas nuevas donde se mejoren todos los aspectos mencionados anteriormente.

4.3. Placas finales.

Para solucionar los problemas que han aparecido con los últimos diseños, se ha decidido modificar ligeramente las placas. Se han añadido condensadores de filtrado, en las placas de los micrófonos y en las placas intermedias, para tratar que la alimentación llegue lo más limpia posible a los micrófonos. Estas placas han sido fabricadas en una empresa externa, lo que hace que se mejore la calidad de las mismas. Con la incorporación de estos cambios se han podido solucionar los problemas de las caídas de tensión y los planos de masa.

La solución para los cables largos es más complicada debido a que no se pueden cambiar las localizaciones de los micrófonos. Por ello, se ha tratado utilizar la menor longitud de cable posible, y se han cambiado los tipos de conectores, utilizando en este caso unos de crimpado.



Fig. 39: Placa final de los micrófonos.

En la Fig. 39 se puede observar cómo queda definitivamente la placa donde se colocan los micrófonos junto con el condensador SMD que permite filtrar el nivel de continua de la tensión, el *jumper* que permite la selección de canal (entre canal izquierdo y canal derecho) y, por último, el conector que se ve en la parte superior, el cual hace que se lleven las señales a la placa intermedia.

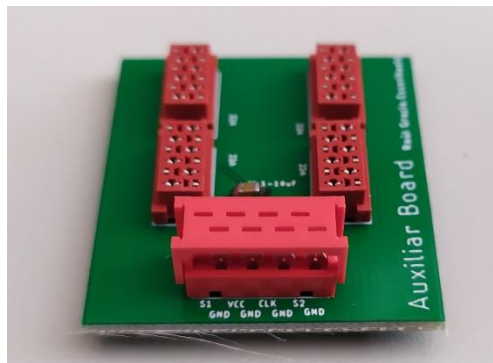


Fig. 40: Placa intermedia final.

La placa intermedia, Fig. 40, dispone de cuatro conectores colocados en los laterales de la imagen, de donde salen tiras de cables que van conectadas a las placas de los micrófonos que hay distribuidas en toda la cocina. Por otro lado, el conector que se ve en la parte inferior conecta esta placa con la placa principal, la cual va conectada al *Streamer*.

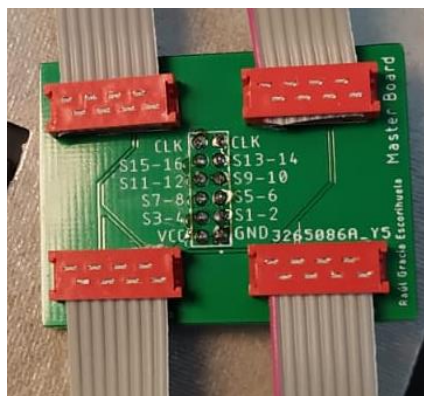


Fig. 41: Placa principal final.

Por último, la Fig. 41 muestra la placa principal que recoge todas la señales que proceden de todos los micrófonos. Esta se conecta a través de unos pines al *Streamer* donde se graban todas la señales a través del software Audacity.

5. Implementación real.

Como se ve en las Fig. 39, Fig. 40 y Fig. 41, finalmente, se decidió fabricar unas placas verdes encargadas a una empresa externa ya que se preveía que los resultados mejorarían debido a que son de mayor calidad que las primeras placas. Estos PCB incorporan una nueva modificación, en la cual se había añadido un condensador (10 μ F) de filtrado para evitar caídas de tensión en la alimentación de los micrófonos. En las placas intermedias también se ha colocado el condensador para prevenir la caída de tensión. Una vez que estaban disponibles todas las placas con todos los componentes insertados se procedió a realizar una batería de pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de cada una de ellas.

Después, se comprobó el correcto funcionamiento de cada placa con su micrófono incorporado, es decir, la placa de la Fig. 35. Posteriormente se comprobó que funcionaba cada placa intermedia, Fig. 36, con cuatro micrófonos conectados. Finalmente se comprobó su funcionamiento conectándose a la placa principal, Fig. 37, y a su vez conectándose el *Streamer*.

Las primeras pruebas se realizaron con la mitad de los micrófonos. La distribución que se planteó con 8 micrófonos se puede observar en la Fig. 42 y en la Fig. 43.



Fig. 42: Vista frontal de la distribución de 8 micrófonos dentro de la cocina



Fig. 43: Vista superior de la distribución de 8 micrófonos dentro de la cocina.

Los ensayos realizados se hicieron con la cocina cerrada y colocada en el hueco disponible en un mueble para simular el funcionamiento en una cocina real.

Para realizar las medidas de forma repetitiva y utilizar siempre la misma fuente de voz, se ha realizado un *setup* en el cual se han puesto diversas condiciones:

- La cocina se debe colocar en una esquina de la habitación para contemplar el efecto de los rebotes de la onda de sonido con las paredes de la habitación.
- La fuente sonora debe situarse a un metro de la cocina.
- La altura de la fuente sonora debe colocarse a una altura de 1.5 metros.
- La intensidad sonora de la fuente debe ser de 70 dB.

En la Fig. 44 se puede observar el *setup* para realizar las medidas correspondientes colocando un altavoz frente a la cocina. Así se asegura que todas las mediciones parten del mismo nivel de sonido que envía la fuente sonora.

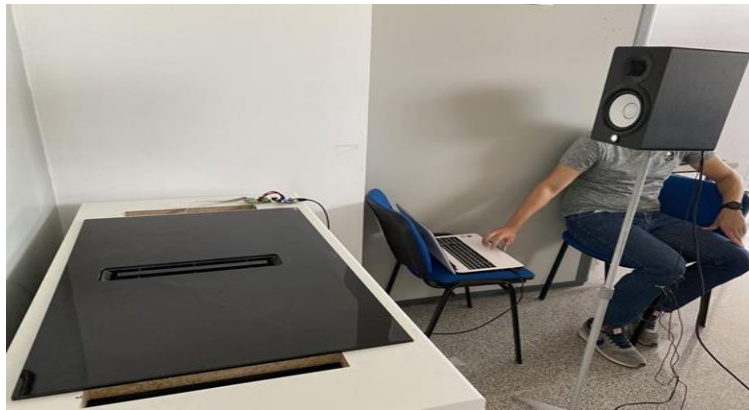


Fig. 44: Muestra del *setup* montado en el laboratorio.

La medida de la fuente sonora se realiza mediante un micrófono calibrado UMIK-1 de miniDSP⁶ y el software de libre distribución REW⁷.

5.1. Primeras pruebas con 8 micrófonos.

Como se ha contado anteriormente, las primeras pruebas fueron realizadas con 8 micrófonos distribuidos por la cocina. Una muestra de las señales capturadas con el software utilizado se puede ver en la Fig. 45 y la Fig. 46. En la primera se muestran las señales que captan los micrófonos con el extractor apagado, mientras que en la segunda se observa como el ruido del extractor encubre la forma de la señal original. Todas las gráficas con las distintas potencias que se han grabado se pueden ver en el Anexo 2. Como se puede observar, cuando se incluye una fuente de ruido, la señal que captan los micrófonos es indistinguible en comparación con la señal que se observa en la Fig. 45, la cual es la señal que se capta cuando no existe ruido. Una vez capturadas las señales es necesario aplicarle un filtro *Beamforming* para poder determinar la procedencia de la fuente de voz y detectar la palabra clave.

⁶ <https://www.minidsp.com/products/acoustic-measurement/umik-1>

⁷ <https://www.roomeqwizard.com/>

Potencia Extractor: Sin Extractor

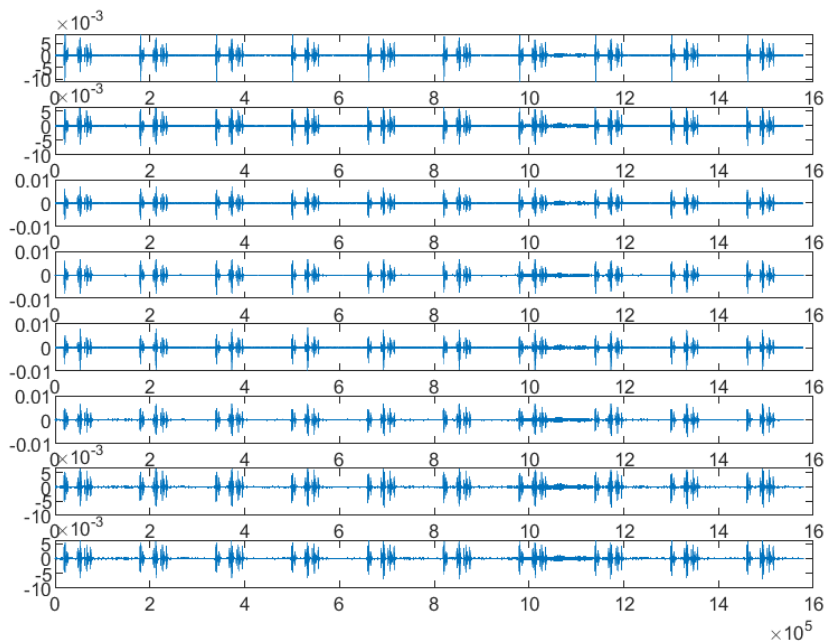


Fig. 45: Señales de los 8 micrófonos sin ruido del extractor con la cocina cerrada.

Potencia Extractor: 5

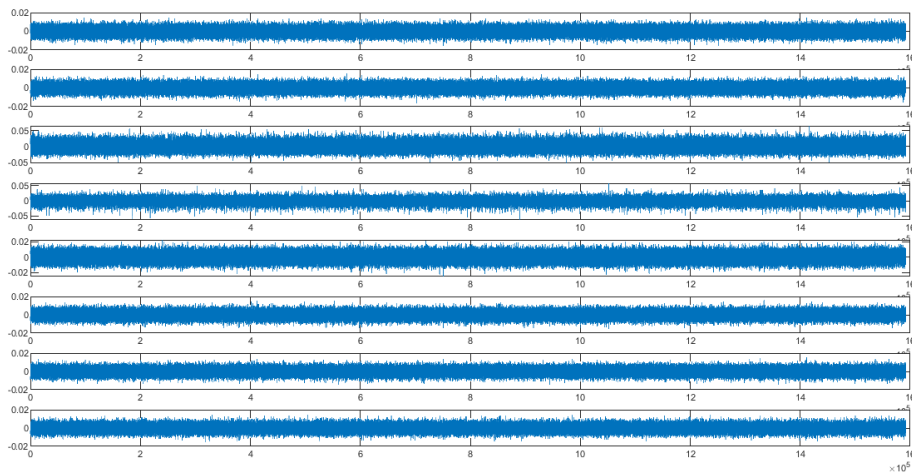


Fig. 46: Señales de los 8 micrófonos con potencia 5 del extractor con la cocina cerrada.

Para poder aplicar el filtro de *Beamforming* es importante poder localizar correctamente los micrófonos. Por ello, se midió la posición exacta de todos ellos, la cual se registra en la Tabla 7, utilizando como referencia la esquina superior izquierda. El eje X es que se traslada a lo largo de la cocina, mientras que el Y mide la profundidad. En la Fig. 47 se puede observar la distribución de los micrófonos en las coordenadas que se indican en la propia Tabla 6.

Micrófono	X (cm)	Y (cm)
1	2.4	1.4
2	3.4	45
3	1.6	23.6
4	45.8	25.8
5	59.6	6.6
6	47.8	40.6
7	70	25.8
8	69.4	38.2

Tabla 6: Localización de los 8 micrófonos en la cocina.

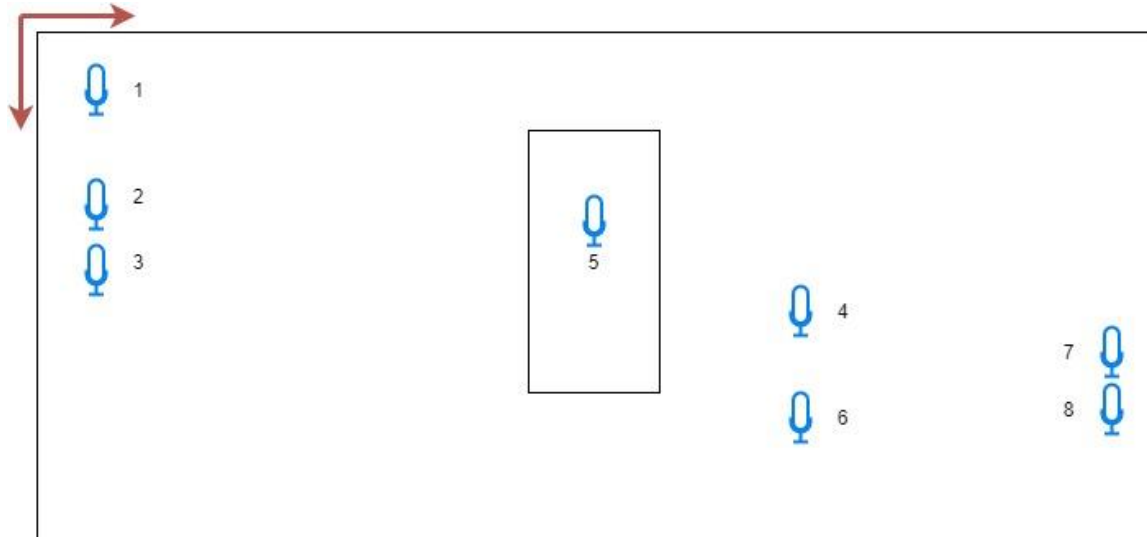


Fig. 47: Distribución real de 8 micrófonos en la cocina.

Después de realizar las primeras mediciones, se observó que las señales que se captaban estaban muy marcadas por el ruido del extractor, como se puede apreciar en la Fig. 48. Esto dificultaba notablemente el poder aplicar el algoritmo de localización de fuentes.

En la Fig. 48 se ha destacado la distribución de los micrófonos (círculos blancos), donde se ha obviado el micrófono que se incluye en el extractor debido a que es el que se toma como referencia para el ruido del extractor. Por otro lado, también se han representado las fuentes de sonido (círculos rojos), siendo el altavoz utilizado durante los ensayos, Fig. 48(a), mientras que la Fig. 48(b) muestra el ruido del extractor situado en el centro de la encimera. Al observarse una dispersión de colores amarillos y naranjas implica que no se puede determinar claramente de dónde procede la fuente sonora.

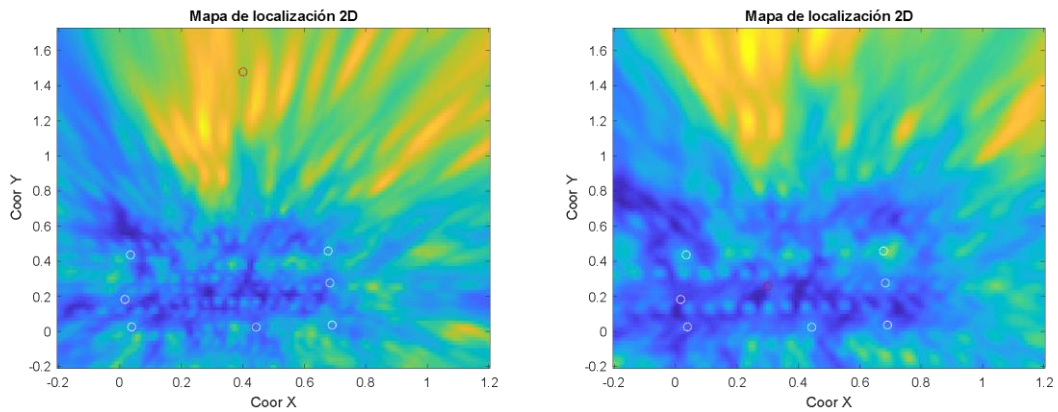


Fig. 48: Mapa de potencia de la localización de la fuente con 8 micrófonos con la cocina cerrada a dos alturas: Fig.48(a) 1.5 metros (izquierda). Fig.48(b) 0.86 metros (derecha).

Debido a la falta de resultados claros, se decidió realizar unas medidas como las mencionadas anteriormente, pero esta vez con la cocina abierta, como se muestra en la Fig. 49, para evitar que el cristal de la cocina absorba parte de la señal, y así poder comprobar el buen funcionamiento del algoritmo que se ha implementado.



Fig. 49: Ensayos de sonido con la cocina abierta.

Las señales obtenidas tras esta nueva configuración son las que se pueden ver en el Anexo 3, en las cuales se puede observar una cierta mejora en cuanto a captación de la señal se refiere ya que a niveles intermedios del extractor aún se puede apreciar la señal de la fuente de sonido original, como se puede observar en la Fig. 50 y la Fig. 51, y no se ve tan fuertemente afectada por la señal de ruido como ocurría en las señales que se muestran en el Anexo 2. Como en el anterior caso, el micrófono que está posicionado en la zona donde está exactamente el extractor es el primero que deja de mostrar de una forma clara la señal de voz que se está emitiendo.

También se pueden representar las gráficas de potencia como se ha realizado anteriormente, mostrándose esta vez en la Fig. 52. En este caso, se puede apreciar de una forma más definida la procedencia de la fuente sonora, ya que el espectro de colores amarillo y naranja tiene una dirección más marcada en comparación con la mostrada en la Fig. 48. Esto implica que con la cocina abierta el algoritmo funciona correctamente y que el cristal hace que la captación del sonido se complique de una forma notable.

Potencia Extractor: Sin Extractor

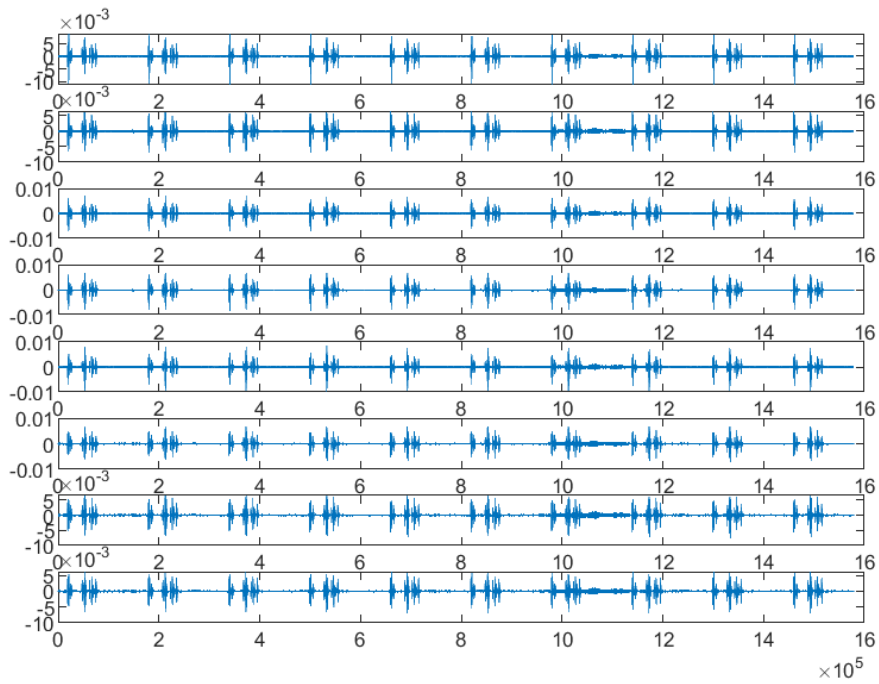


Fig. 50: Señales de los 8 micrófonos sin ruido del extractor con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 5

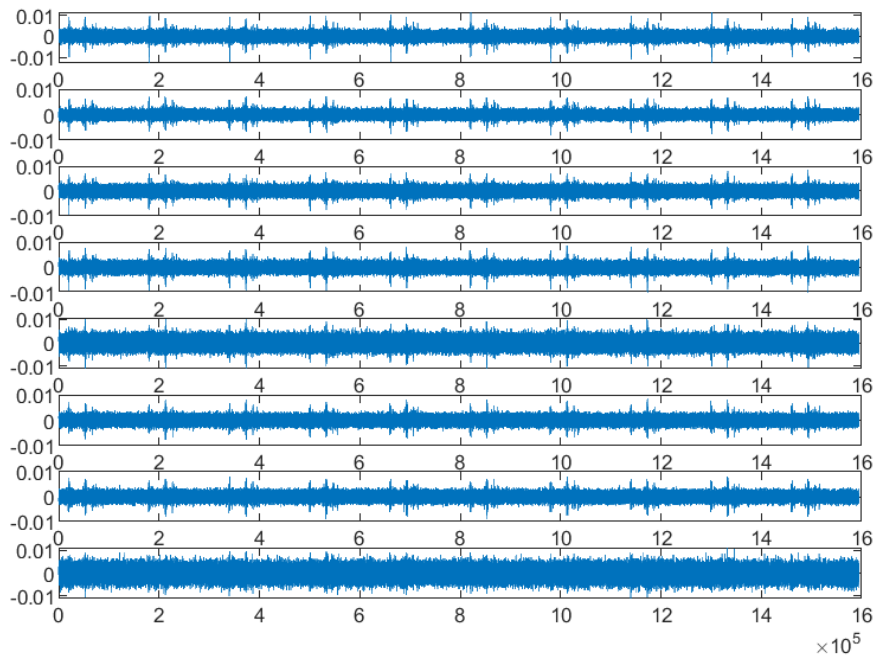


Fig. 51: Señales de los 8 micrófonos con potencia 5 con la cocina abierta.

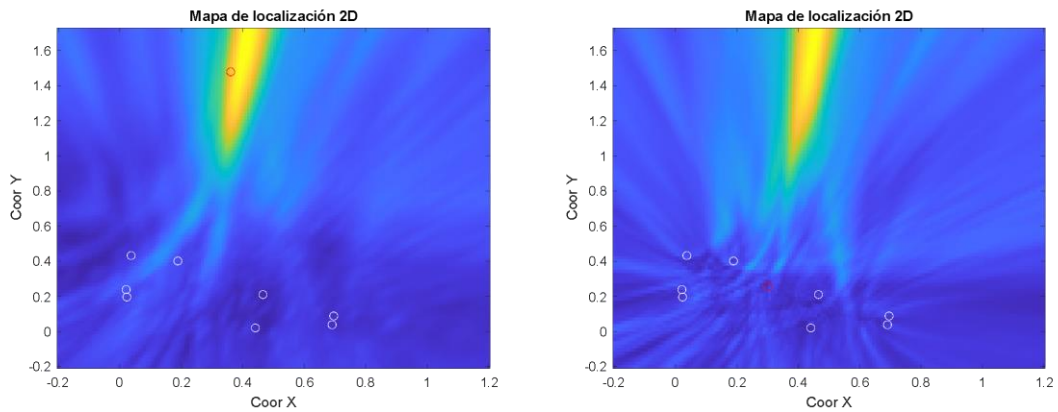


Fig. 52: Mapa de potencia de la localización de la fuente con 8 micrófonos con la cocina abierta a dos alturas: Fig.52(a) 1.5 metros (izquierda). Fig.52(b) 0.86 metros (derecha).

5.2. Mediciones con 12 micrófonos.

De nuevo, se realizan las mediciones de la posición de los micrófonos, como se puede ver en la Tabla 7, donde ocupan la posición correspondiente en la cocina, tal y como se aprecia en la Fig. 53.

Micrófono	X (cm)	Y (cm)
1	3.6	4
2	3	20
3	19	40.8
4	29	1.8
5	44.4	2.6
6	42	22
7	48.7	41.6
8	69.2	3.6
9	69.4	8.2
10	70.8	18.7
11	69	28
12	68.4	46.6

Tabla 7: Localización de los 12 micrófonos en la cocina.

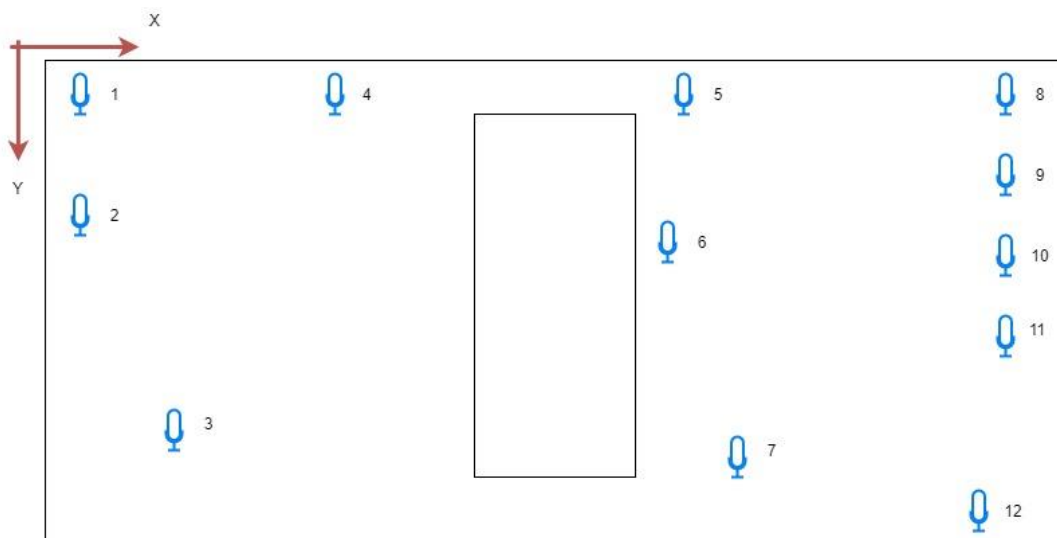


Fig. 53: Distribución real de 12 micrófonos en la cocina.

Los resultados obtenidos se pueden observar en el Anexo 4, donde se han realizado las pruebas con la cocina abierta. De nuevo, se observa que la captación de las señales es aceptable siempre y cuando se trabajen con potencias del extractor no muy elevadas. Esto se puede comprobar al comparar los resultados obtenidos en la Fig. 54 y la Fig. 55, siendo la primera grabada sin el extractor y la segunda con el extractor encendido.

Potencia Extractor: Sin Extractor

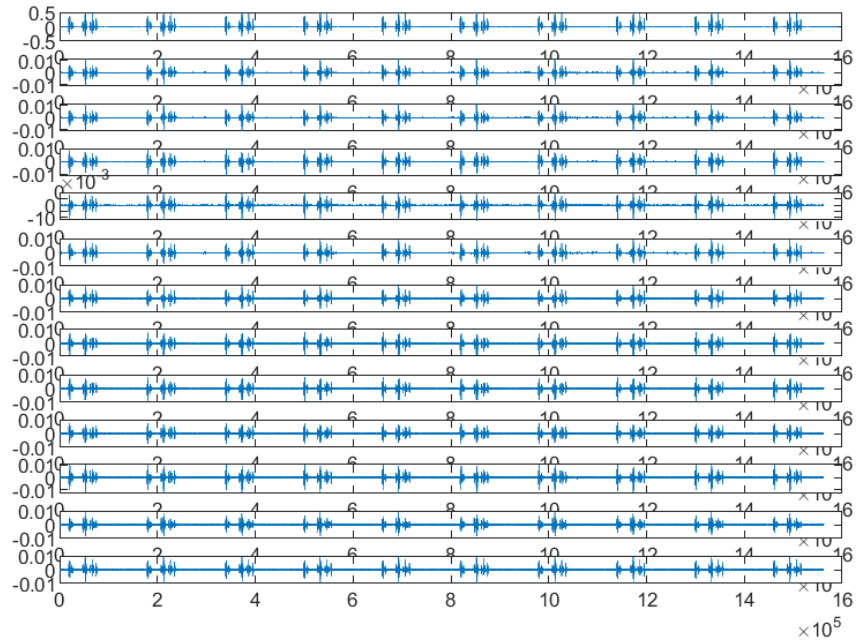


Fig. 54: Señales de los 12 micrófonos sin el extractor con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 5

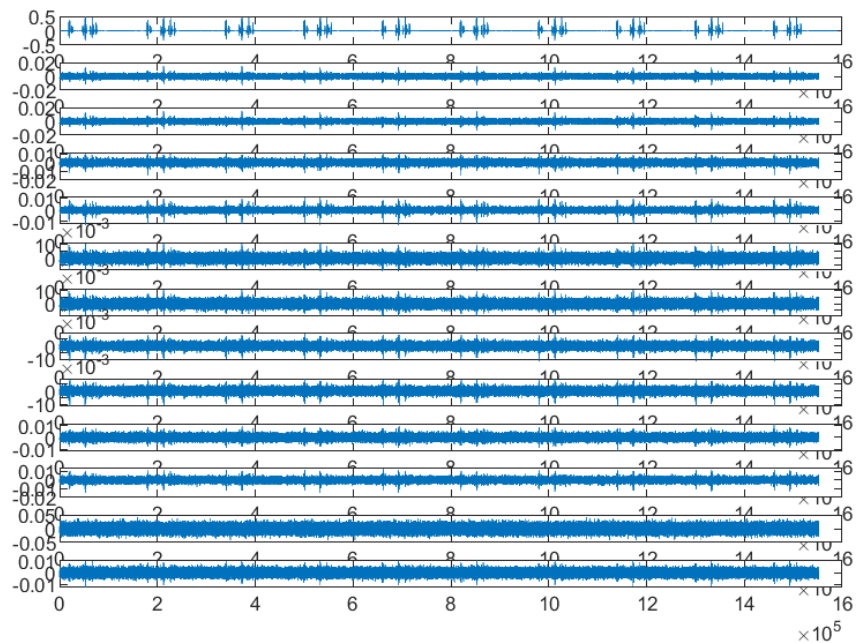


Fig. 55: Señales de los 12 micrófonos con potencia 5 con la cocina abierta.

En la Fig. 56 se muestra el mapa de localización de la fuente sonora incluyendo hasta doce micrófonos dentro de la encimera. Esto permite una mejor localización del sonido ya que en la Fig. 56(a) se obtiene una posición más precisa que en las mostradas anteriormente.

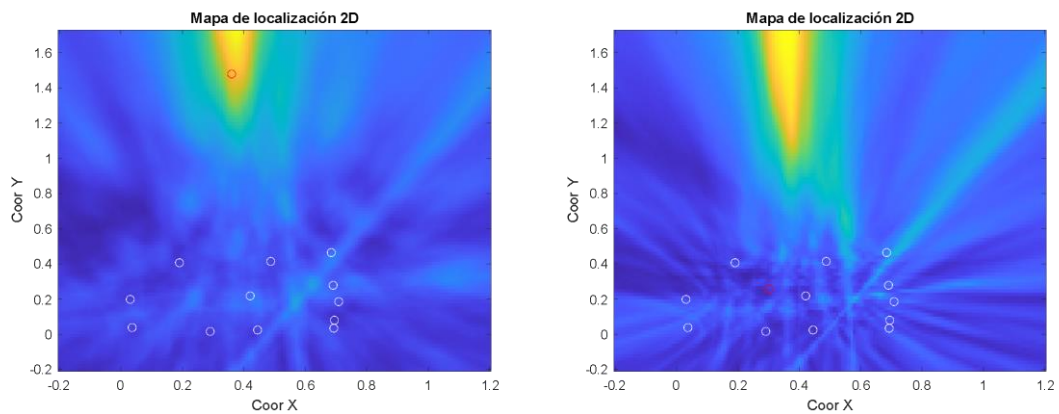


Fig. 56: Mapa de potencia de la localización de la fuente con 12 micrófonos con la cocina abierta a dos alturas: Fig.56(a) 1.5 metros (izquierda). Fig.56(b) 0.86 metros (derecha).

En este caso, la localización de las fuentes de sonido ha mejorado respecto a la configuración con 8 micrófonos. El espectro de potencias apunta a una zona mucho más agrupada, lo que implica que la localización es más precisa. Al incorporar más micrófonos, se puede realizar una localización más fina y por ello obtener mejores resultados. Sólo se ha realizado la medida con la cocina abierta ya que el resultado con la cocina cerrada tiene los mismos problemas que con una configuración de 8 micrófonos.

5.3. Mediciones con 16 micrófonos.

Finalmente, para ver el resultado con el mayor número de micrófonos posibles, se decidió incluir cuatro micrófonos más, hasta llegar a dieciséis (el máximo que permite incorporar el *Streamer*). Para ello, se realizó la distribución que se puede observar en la Fig. 57, tratando obtener una distribución simétrica, como se puede corroborar en la Fig. 58.

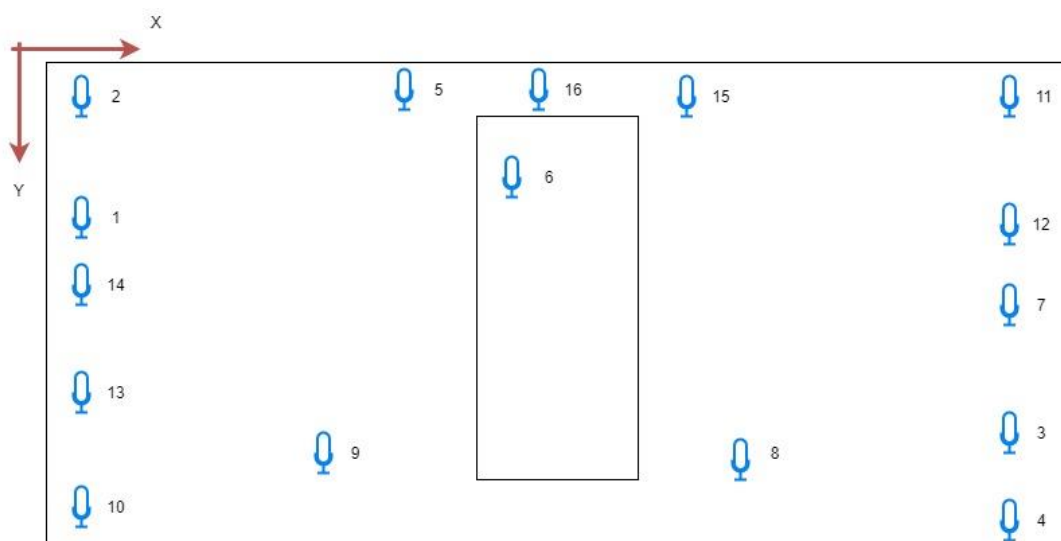


Fig. 57: Plano de la distribución de 16 micrófonos en la cocina de inducción.

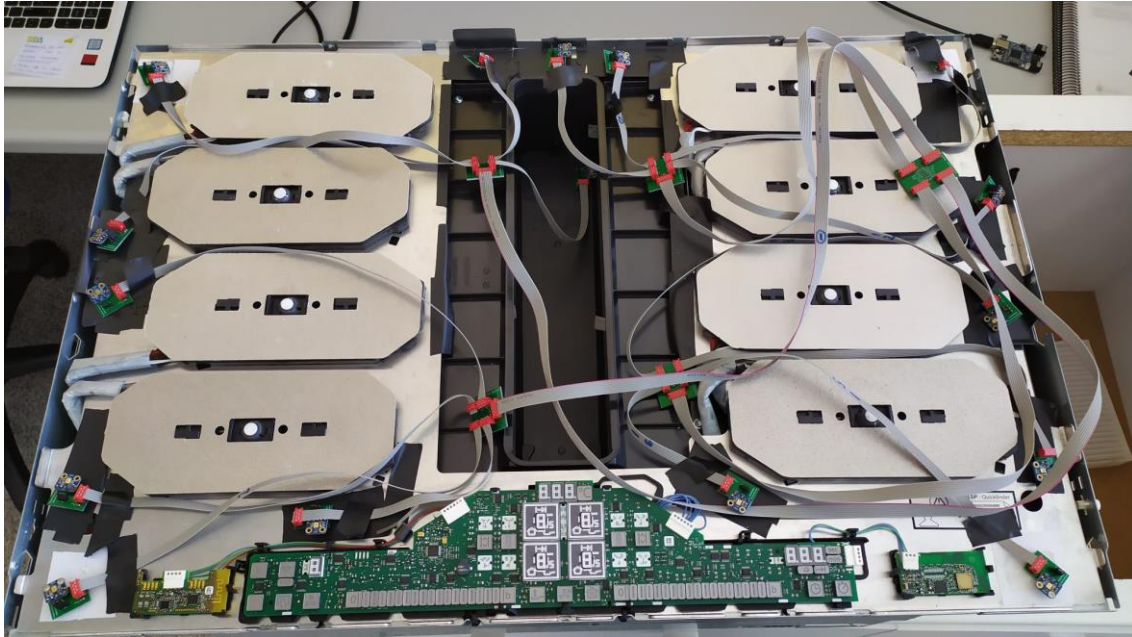


Fig. 58: Distribución de los 16 micrófonos en la cocina.

Al igual que sucedió con las pruebas realizadas con 12 micrófonos, es necesario determinar la posición que tienen los sensores distribuidos en la placa de inducción para poder caracterizar los ensayos que se han realizado. Por ello, se han recogido todas las medidas tomando como referencia la esquina superior izquierda. En la Tabla 8 se pueden observar los datos recogidos que serán necesarios para aplicar las técnicas de localización utilizadas anteriormente.

Micrófono	X (cm)	Y (cm)
1	1	19
2	2.4	1.4
3	69.4	38.2
4	68.3	46.4
5	30.6	1
6	59.6	6.6
7	70	25.8
8	47.8	40.6
9	21.2	41.6
10	3.4	45
11	69.2	2
12	70.8	17.2
13	3	39
14	1.6	23.6
15	43.6	1.2
16	36.8	1

Tabla 8: Localización de los 16 micrófonos en la cocina.

Los resultados obtenidos de las grabaciones se pueden apreciar en las gráficas que aparecen en el Anexo 5, donde se muestra una primera pista con la señal original y el resto corresponden con los distintos micrófonos que hay repartidos en la placa de inducción.

Como comparación, se pueden observar la Fig. 59 y la Fig. 60 para ver la diferencia entre tener el extractor apagado y encendido. En la Fig. 59 se puede comprobar cómo las señales que se han grabado siguen idénticamente la forma de la señal principal, la cual aparece como la primera pista mostrada. Mientras que en la Fig. 60 se observa cómo el extractor tiene un gran efecto sobre la señal de audio que se pretende grabar, por lo que es necesario realizar un tratamiento de la señal para poder determinar la forma de la señal original y posteriormente realizar una localización de la fuente sonora principal.

Potencia Extractor: Sin Extractor

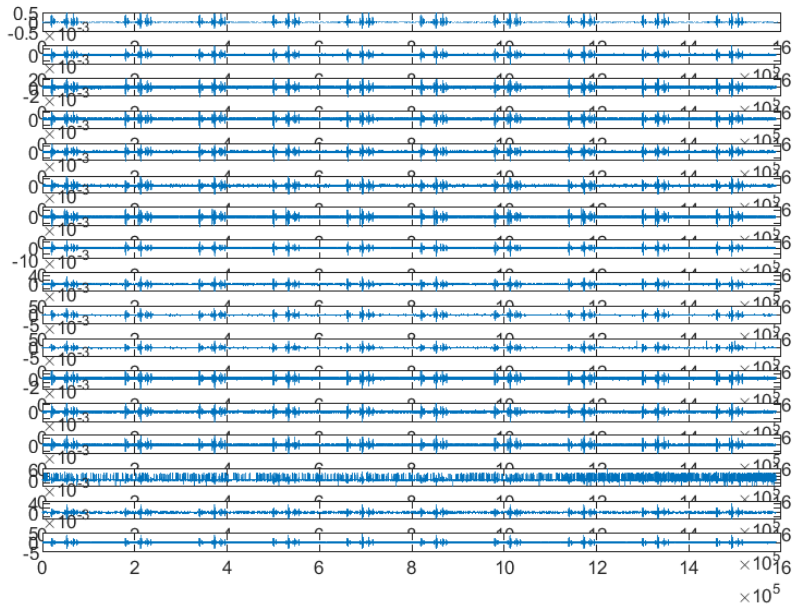


Fig. 59: Señales de los 16 micrófonos sin el extractor con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 3

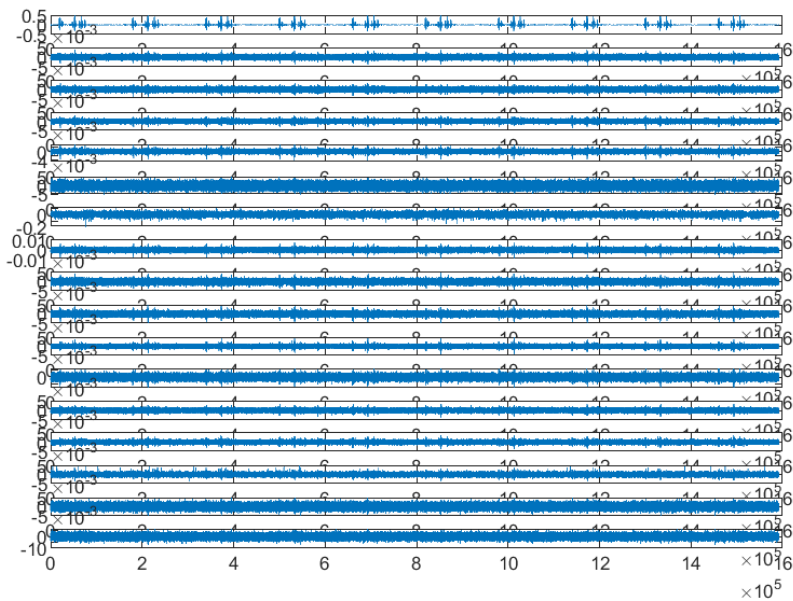


Fig. 60: Señales de los 16 micrófonos con potencia 3 con la cocina abierta.

Como resultado de las últimas pruebas realizadas, se ha obtenido de nuevo el mapa de localización 2D que muestra la localización de la fuente o fuentes sonoras que puede haber en el momento de la grabación de las señales.

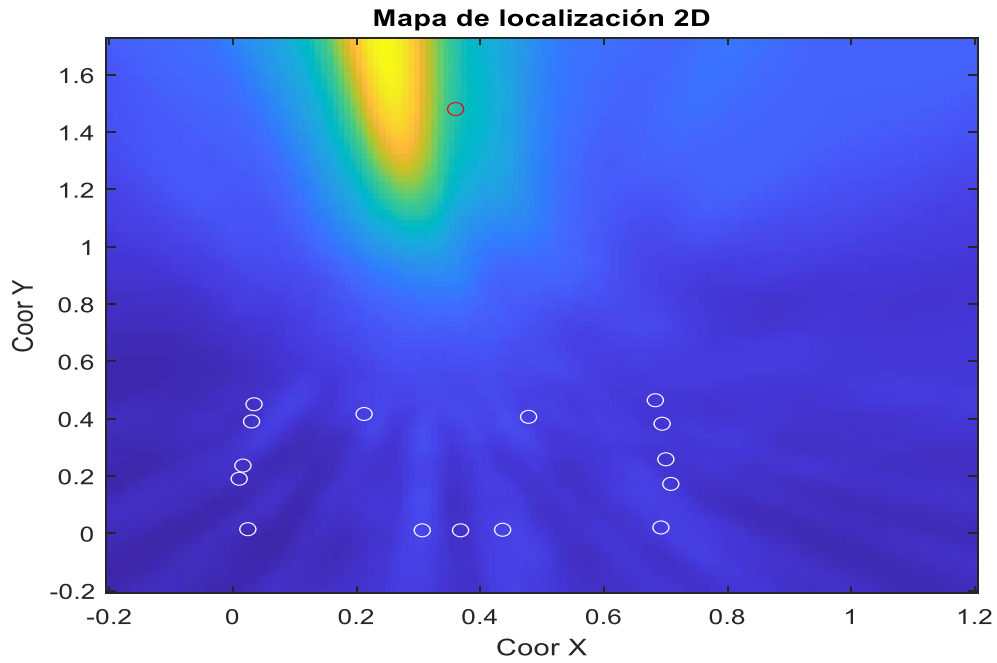


Fig. 61: Mapa de localización de la fuente de sonido de voz con la cocina abierta con 16 micrófonos.

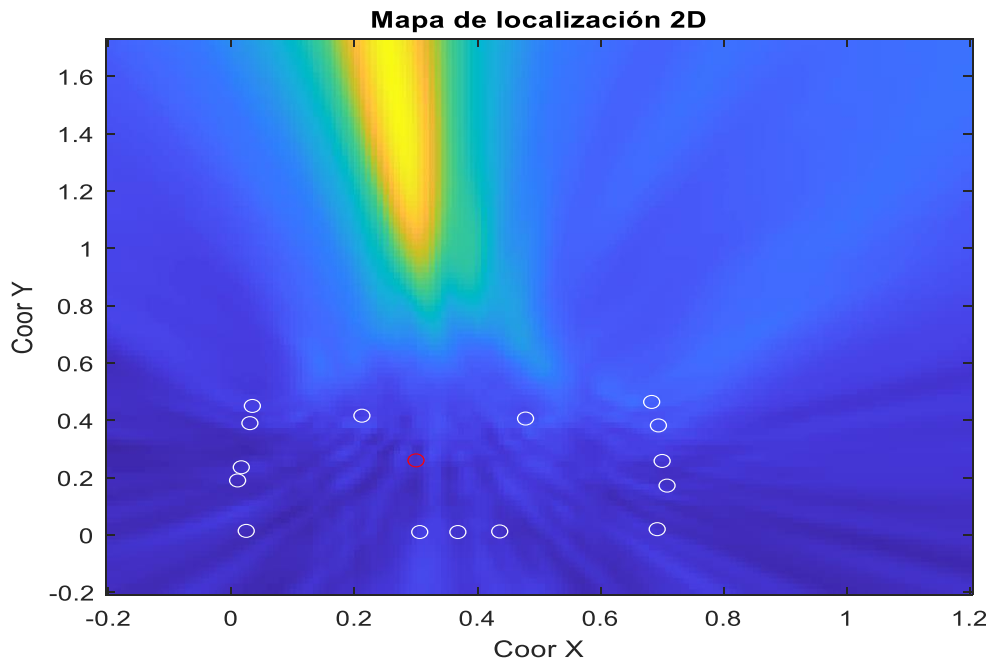


Fig. 62: Mapa de localización de la fuente de sonido del extractor con la cocina abierta con 16 micrófonos.

Tanto en la Fig. 61 como en la Fig. 62, se muestran con círculos blancos la distribución de todos los micrófonos que se han repartido en la cocina, excepto el que está situado en el centro, como se puede ver en la Fig. 57, debido a que éste se utiliza como referencia para la señal de ruido.

Por otro lado, el círculo rojo representa la localización de la fuente sonora en cada uno de los casos. En el caso de la Fig. 61 muestra la localización de la fuente de voz a la altura del altavoz y en el de la Fig. 62 representa la localización del ruido que genera el extractor de humos a la altura de la encimera. En comparación con los resultados mostrados con 12 micrófonos se ve una mayor concentración del lóbulo de localización a la altura de la fuente de sonido, lo que es totalmente coherente con el aumento del número de micrófonos.

Finalmente, se han sacado los resultados con la cocina cerrada. Siguiendo la misma distribución utilizada en la Tabla 8, se ha colocado el cristal de la encimera y se han realizado las mismas mediciones. Por tanto, como se puede observar en la Fig. 63, las señales tienen gran parecido a la señal original, la cual aparece la primera en el conjunto de señales de la imagen. El problema viene cuando se comienza a incrementar el nivel de potencia del extractor, debido a que, al ser un sistema más cerrado, el sonido tiene dificultad para llegar a los micrófonos. Esto se puede comprobar observando la diferencia entre la Fig. 60 y la Fig. 64, ya que en la primera se pueden ver las formas de onda un poco más definidas que en la segunda, al tratarse de la gráfica con la cocina abierta.

Para confirmar el resultado obtenido, se han sacado los mapas de localización como en casos anteriores. En la Fig. 65 y Fig. 66 se puede ver cómo la zona dónde se tendría que localizar la fuente sonora (similar a las imágenes anteriores) está mucho más dispersa, y con ello no se puede aclarar la procedencia exacta de la fuente de sonido. Por ello, se puede confirmar que al incluir los micrófonos dentro de la cocina de inducción se pierde la capacidad de localización de la voz del usuario y por tanto se limita notablemente el funcionamiento del sistema.

Potencia Extractor: Sin Extractor

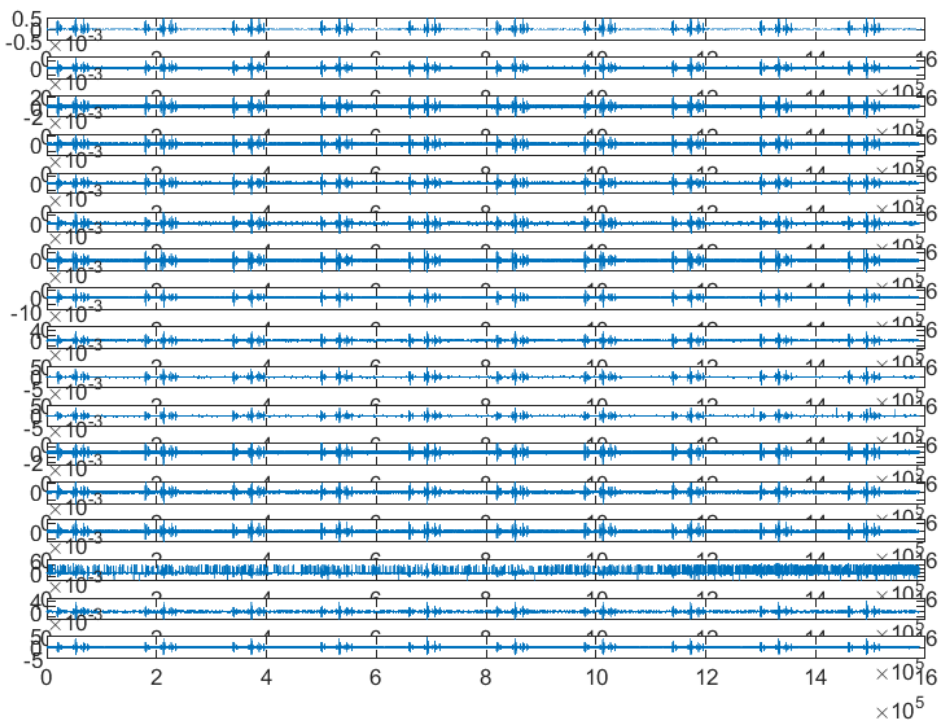


Fig. 63: Señales de los 16 micrófonos sin el extractor con la cocina cerrada.

Potencia Extractor: 3

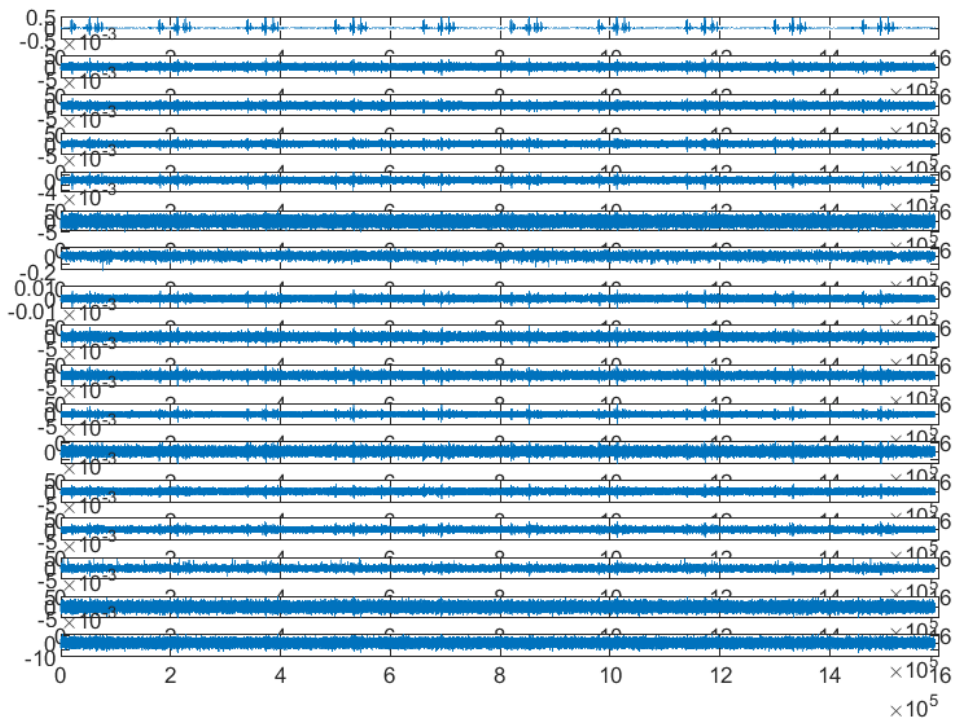


Fig. 64: Señales de los 16 micrófonos con potencia 3 con la cocina cerrada.

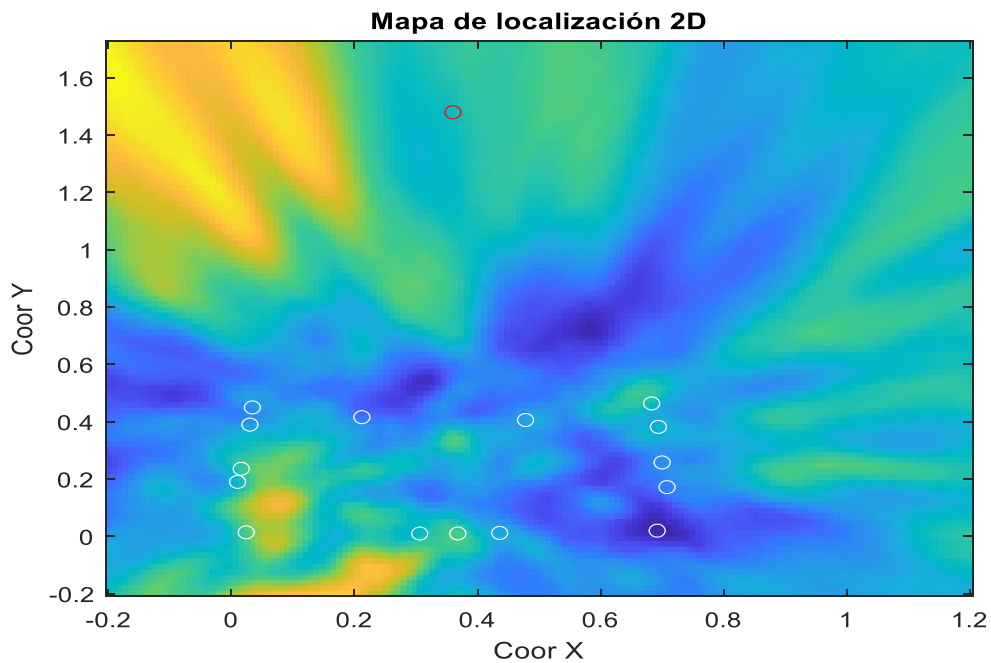


Fig. 65: Mapa de localización de la fuente de sonido de voz con la cocina cerrada con 16 micrófonos.

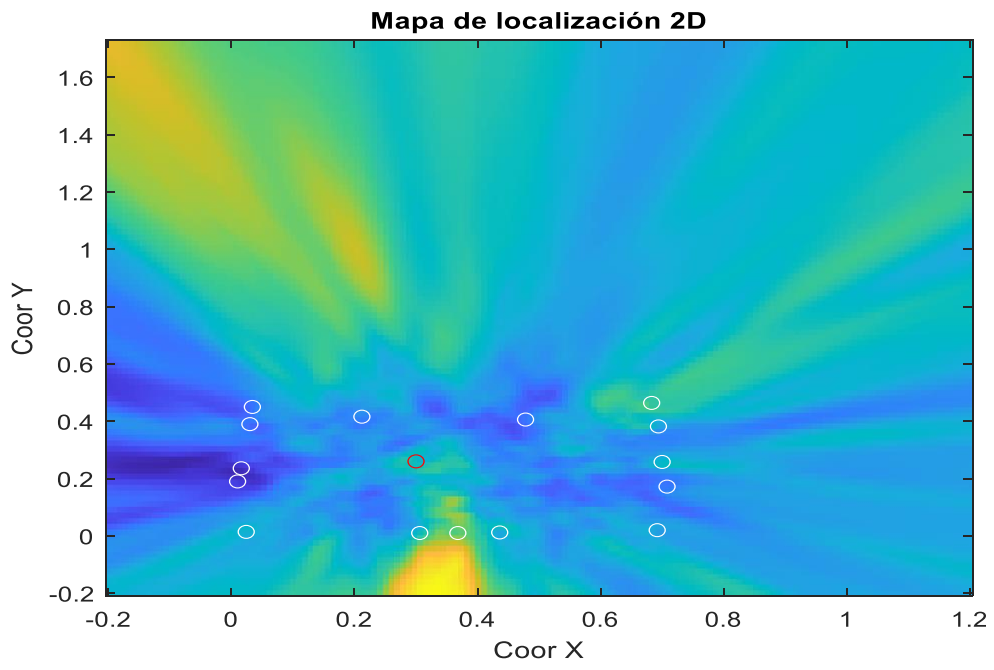


Fig. 66: Mapa de localización de la fuente de sonido del extractor con la cocina cerrada con 16 micrófonos.

6. Resultados, conclusiones y trabajo futuro.

Los resultados obtenidos se pueden dividir en dos partes. En los resultados personales que caracterizan el trabajo realizado por parte del grupo de investigación y, por otro lado, los resultados que se entregan a B/S/H para determinar la viabilidad del sistema que se quiere implementar.

Respecto a las conclusiones del trabajo del grupo de investigación, los resultados obtenidos son satisfactorios debido a que se ha cumplido con los propósitos planteados inicialmente. Es decir, incorporar un sistema de captura de sonidos en el interior de una cocina, procesar esa señal y localizar la fuente sonora. Se ha conseguido construir un array de micrófonos que permite localizar la fuente sonora gracias al algoritmo implementado (SRP-PHAT). Dicha localización es efectiva con la cocina abierta como se ha demostrado previamente, mientras que, con el cristal colocado y la cocina cerrada existe una gran atenuación de la señal debido al aislamiento del cristal, además de no disponer una entrada clara del sonido hacia el interior de la encimera, lo que impide la buena localización de la fuente sonora.

En cuanto al número de micrófonos, los resultados que se han obtenido en el laboratorio indican que la diferencia que hay al usar 12 o 16 micrófonos es mínima, debido a que las formas de las señales tienen una gran similitud al igual que la localización de la fuente sonora. También cabe destacar que lo óptimo es cumplir lo que se propone en la Ec. 1, donde la separación mínima de los micrófonos, calculada en la Ec. 3, debe ser la mitad de la longitud de onda de la señal en cuestión. En este caso, cumplir con esta condición es bastante complicado debido a la disposición que hay en la cocina, y para satisfacer este requisito se debería llenar la cocina de micrófonos, cosa que es inviable.

En cuanto al resultado obtenido para B/S/H, los resultados no son los esperados. Pero se pueden obtener algunas conclusiones que resultan útiles para abordar trabajos de este tipo en el futuro. La primera es que la inclusión de micrófonos dentro de una cocina de inducción es posible técnicamente y se han aportado soluciones adecuadas para ello, pero la gran atenuación que se produce por el cristal y la falta de disponer de una entrada directa del sonido condiciona mucho el tipo de procesado que se puede realizar con el sonido. En segundo lugar, el sistema sí que permite capturar la voz de una persona con claridad cuando no se está utilizando el extractor. Pero debido a que el extractor es una fuente de ruido bastante notable, con el extractor encendido se dificulta enormemente la captura de la voz, lo que junto a la atenuación que presenta el cristal hace que sea muy complicado utilizar un sistema de captura de audio dentro de la encimera para la detección de comandos de voz para el control de la cocina.

Como posibles soluciones se podría plantear la posibilidad de realizar unos agujeros en el cristal de la cocina, para que las señales acústicas puedan introducirse dentro de la cocina donde están los micrófonos adaptando las condiciones de estanqueidad de la solución. Otra solución sería dar la opción al usuario de trabajar con bajas potencias del extractor para que el sistema pueda reconocer la voz de la persona.

Aun así, se ha acordado que la mejor opción sería trabajar con un sistema domótico que se coloque externo a la cocina y tenga la posibilidad de comunicarse a través de señales domésticas, como wifi o bluetooth, con el propio electrodoméstico. Así se podrían evitar los cambios mecánicos que se han mencionado anteriormente sobre la encimera.

Como conclusiones del diseño electrónico cabe decir que es complicado realizar una distribución adecuada de sensores, en este caso de micrófonos, con la configuración que se ha elegido. Esto es debido a que la distribución de las señales en distintas placas hace que la impedancia que hay en cada placa va variando y cuando la señal llega al extremo, después de atravesar una longitud de cable considerada, claramente distorsionada. Este efecto hace que cambie completamente el comportamiento esperado del sistema e impide que se puedan adquirir las señales correctamente. Por tanto, es recomendable utilizar siempre longitudes de cable lo más cortas posibles para poder conseguir el mejor resultado.

También se ha llegado a la conclusión de que la mejor distribución no es la de estrella en cuanto a la conservación de la señal y, por lo tanto, una distribución en serie sería menos problemática en cuanto a calidad de la señal. El problema de esta distribución es que no es replicable, y cada placa que se hace es única. También es necesario introducir más electrónica en el sistema, como buffers, para conservar los niveles de señal.

Respecto a los resultados obtenidos, decir que se ha tratado de llegar a incluir el máximo número posible de micrófonos (limitado por el hardware que capturaba las señales) y se ha concluido que la diferencia, en cuanto a localización de la fuente de sonido, a partir de los 12 micrófonos es mínima. También influye notablemente el uso del cristal ya que hay una gran atenuación, por lo que se han planteado diversas soluciones para poder mejorar en este aspecto. Al igual que con altas potencias del extractor, ya que éste enmascaraba la señal del voz.

Por otro lado, hay que destacar el trabajo en equipo que se ha realizado en un grupo multidisciplinar, ya que se ha colaborado con ingenieros de telecomunicaciones para poder realizar el proyecto. Esto implica una mayor colaboración y comunicación entre las dos partes. El resultado ha sido muy satisfactorio porque siempre es bueno poder colaborar con personas de otras disciplinas ya que acaban aportando conocimientos de otra rama.

Respecto a la percepción por parte de la empresa B/S/H, decir que el trabajo les ha resultado satisfactorio porque desde el principio se planteó como un proyecto exploratorio, no pensando en una solución definitiva. Conocer las limitaciones de una propuesta les ayuda a conocer los problemas que se pueden plantear en este tipo de soluciones de audio para otros proyectos futuros.

Bibliografía

- [1] K. Agarwal, A. Agarwal, and G. Misra, "Review and Performance Analysis on Wireless Smart Home and Home Automation using IoT," in *Proceedings of the 3rd International Conference on I-SMAC IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud, I-SMAC 2019*, Dec. 2019, pp. 629–633, doi: 10.1109/I-SMAC47947.2019.9032629.
- [2] I. Krishna and K. Lavanya, "Intelligent Home Automation System using BitVoicer," in *Proceedings of 2017 11th International Conference on Intelligent Systems and Control, ISCO 2017*, Feb. 2017, pp. 14–20, doi: 10.1109/ISCO.2017.7855973.
- [3] S. Ur Rehman and V. Gruhn, "An approach to secure smart homes in cyber-physical systems/Internet-of-Things," in *2018 5th International Conference on Software Defined Systems, SDS 2018*, May 2018, pp. 126–129, doi: 10.1109/SDS.2018.8370433.
- [4] M. Al-Amin and S. Z. Aman, "Design of an Intelligent Home Assistant," in *Proceedings - International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation, ISMS*, Jul. 2016, vol. 0, pp. 69–71, doi: 10.1109/ISMS.2016.34.
- [5] A. Palla, L. Fanucci, R. Sannino, and M. Settin, "Wearable speech enhancement system based on MEMS microphone array for disabled people," in *Proceedings - 2015 10th IEEE International Conference on Design and Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era, DTIS 2015*, Jun. 2015, pp. 1–5, doi: 10.1109/DTIS.2015.7127384.
- [6] Y. Peled and B. Rafaely, "Study of speech intelligibility in noisy enclosures using spherical microphones arrays," in *2008 Hands-free Speech Communication and Microphone Arrays, Proceedings, HSCMA 2008*, 2008, pp. 160–163, doi: 10.1109/HSCMA.2008.4538711.
- [7] M. Turqueti, J. Saniie, and E. Oruklu, "MEMS acoustic array embedded in an FPGA based data acquisition and signal processing system," in *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2010, pp. 1161–1164, doi: 10.1109/MWSCAS.2010.5548866.
- [8] E. Zwysig, F. Faubel, S. Renals, and M. Lincoln, "Recognition of overlapping speech using digital MEMS microphone arrays," in *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings*, Oct. 2013, pp. 7068–7072, doi: 10.1109/ICASSP.2013.6639033.
- [9] J. Stamac, S. Grubesa, and A. Petosic, "Designing the acoustic camera using MATLAB with respect to different types of microphone arrays," May 2019, doi: 10.23919/SMAGRIMET.2019.8720363.
- [10] M. Turqueti, J. Saniie, and E. Oruklu, "Scalable acoustic imaging platform using MEMS array," 2010, doi: 10.1109/EIT.2010.5612131.
- [11] "Get Started with the Alexa Skills Kit - Alexa Skills Kit Official Site." <https://developer.amazon.com/es-ES/alexa/alexa-skills-kit/start> (accessed Nov. 17, 2020).
- [12] "miniDSP Ltd, Hong Kong / www.minidsp.com / Features and specifications subject to change without prior notice MCHSTREAMER MULTI-CHANNEL MULTI-PROTOCOL USB AUDIO INTERFACE User Manual TOSLINK S/PDIF I2S DSD ADAT TDM PDM." Accessed: Nov. 19, 2020. [Online]. Available: www.minidsp.com.
- [13] F. M. Gonzalez, J. A. Rosales, R. Perez, V. I. Lunati, and A. H. Ortiz Skarp, "Micrófonos MEMS: Análisis y caracterización acústica," Buenos Aires, Oct. . Accessed: Jun. 16, 2020. [Online]. Available:

<http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra><http://www.conicet.gov.ar/>.

- [14] “CMM-3526D-261-I2S-TR | MEMS Microphones | Microphones.” <https://www.cuidevices.com/product/audio/microphones/mems-microphones/cmm-3526d-261-i2s-tr> (accessed Aug. 27, 2020).
- [15] T. Mp *et al.*, “MP34DT01-M MEMS audio sensor omnidirectional digital microphone,” no. March, pp. 1–15, 2014.
- [16] “ICS-52000.” Accessed: Aug. 27, 2020. [Online]. Available: www.invensense.com.
- [17] Adafruit, “Overview | Adafruit PDM Microphone Breakout | Adafruit Learning System.” <https://learn.adafruit.com/adafruit-pdm-microphone-breakout/> (accessed Jun. 24, 2020).
- [18] Y. Yang, J. Socho, B. Lee, and S. Kim, “A Sound Activity Detector Embedded Low-Power MEMS Microphone Readout Interface for Speech Recognition,” in *Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design*, Jul. 2019, vol. 2019-July, doi: 10.1109/ISLPED.2019.8824939.
- [19] D. Díaz-Guerra Aparicio, “Trabajo Fin de Máster Localización de fuentes sonoras mediante agrupaciones de micrófonos Sound source localization with microphone arrays.” Universidad de Zaragoza, 2017.
- [20] D. Díaz-Guerra Aparicio, “Detección de posición de impacto para instrumentos de percusión basado en agrupación de sensores,” Universidad de Zaragoza, 2015. Accessed: Jun. 16, 2020. [Online]. Available: <http://zagan.unizar.es>.
- [21] M. Molina Gracia, “Trabajo Fin de Grado Análisis y localización de fuentes de ruido en una placa de inducción.” 2019.
- [22] V. Kepuska and G. Bohouta, “Next-generation of virtual personal assistants (Microsoft Cortana, Apple Siri, Amazon Alexa and Google Home),” in *2018 IEEE 8th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, CCWC 2018*, Feb. 2018, vol. 2018-January, pp. 99–103, doi: 10.1109/CCWC.2018.8301638.
- [23] Y. Weens, N. Idir, R. Bausière, and J. J. Franchaud, “Modeling and simulation of unshielded and shielded energy cables in frequency and time domains,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 7, pp. 1876–1882, Jul. 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.874306.
- [24] J. E. Rayas-Sánchez, “A frequency-domain approach to interconnect crosstalk simulation and minimization,” in *Microelectronics Reliability*, Apr. 2004, vol. 44, no. 4, pp. 673–681, doi: 10.1016/j.microrel.2003.10.013.
- [25] P. Kirawanich, J. R. Wilson, N. E. Islam, and S. J. Yakura, “Minimizing crosstalks in unshielded twisted-pair cables by using electromagnetic topology techniques,” *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 63, pp. 125–140, 2006, doi: 10.2528/PIER06042603.
- [26] P. Kirawanich, N. E. Islam, and S. J. Yakura, “An electromagnetic topology approach: Crosstalk characterization of the unshielded twisted-pair cable,” *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 58, pp. 285–299, 2006, doi: 10.2528/PIER05091901.
- [27] A. Roy, S. Ghosh, and A. Chakrabarty, “Simple crosstalk model of three wires to predict near-end and far-end crosstalk in an EMI/EMC environment to facilitate EMI/EMC modeling,” *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 8, no. 1, pp. 43–58, 2008, doi: 10.2528/PIERB08050503.
- [28] A. Mediano, “Electronic Design for EMC and SAFETY Fundamentals,” 2020. Accessed:

Nov. 13, 2020. [Online]. Available: www.cartoontronics.com.

Anexo 1

Código para el cálculo de los componentes de simulación.

```
%% Two Wire Cross talk with Ground
%https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/56837-
calculating-two-wires-crosstalk?s_tid=srchtitle
% In this m file we would calculate the L and C matrix for two wires
in homogeneous condition
% wg refers to Generator
% wr refers to receptor
% Ground plane is located in y=0 in 3D coordinates
%% Initial condition
Wire_p=[0 0;0 0.01];% Position of wires [X_wg Y_wg;X_wr Y_wr]
Wire_r=[1e-3 1e-3]; % Radius of wires [R_wg R_wr]
e_0=8.85e-12;
mu_0=4*pi*1e-7;
e_r=1;
mu_r=1;
ep=e_0*e_r;
mu=mu_0*mu_r;
%% Calculating dimansions
d_s=sqrt((Wire_p(2,1)-Wire_p(1,1))^2+(Wire_p(2,2)-
Wire_p(1,2))^2);%distance between receptor and generator wires
d_sl=sqrt((Wire_p(1,1)-Wire_p(2,1))^2+(Wire_p(1,2))^2);%distance
between generator and receptor image point on y=0
d_s2=sqrt((Wire_p(1,1)-
Wire_p(2,1))^2+(Wire_p(1,2)+Wire_p(2,2))^2);%distance between receptor
and generator reflection by y=0
%% Calculating L matrix
l_wg=mu/2/pi*log(2*Wire_p(1,2)/Wire_r(1));
l_wr=mu/2/pi*log(2*Wire_p(2,2)/Wire_r(2));
l_m=mu/2/pi*log(d_s2/d_s);
L=[l_wg l_m;l_m l_wr];
C=mu*ep*L^-1;
```

Anexo 2

Gráficas de las señales de los micrófonos con la cocina cerrada en una configuración de 8 micrófonos.

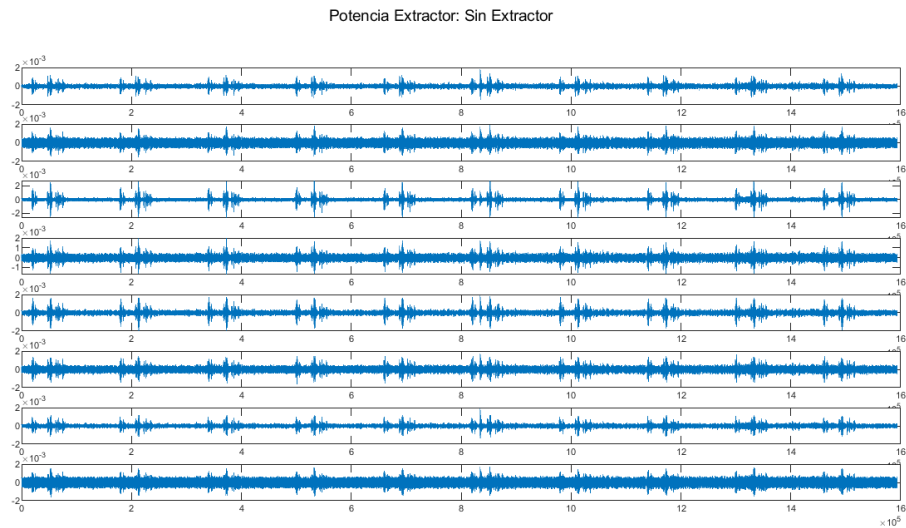


Fig. 67: Señales de los 8 micrófonos sin ruido del extractor.

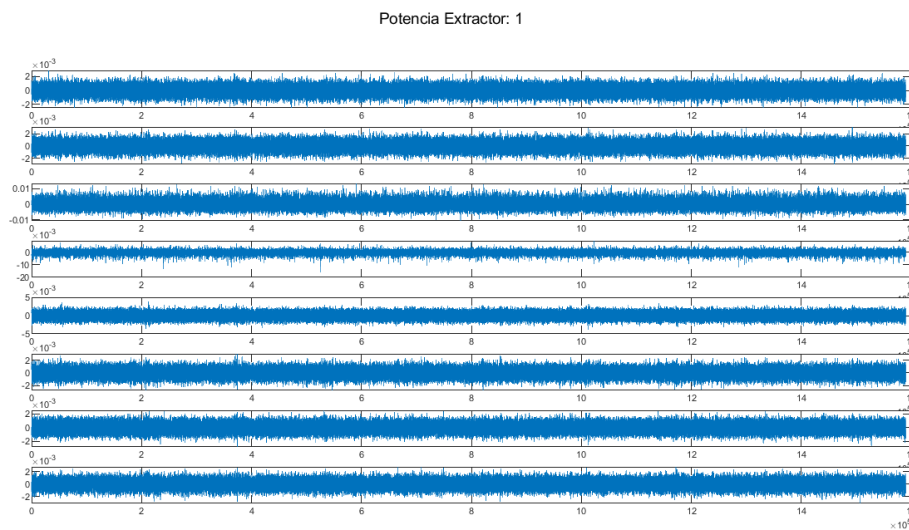


Fig. 68: Señales de los 8 micrófonos con potencia 1 del extractor.

Potencia Extractor: 3

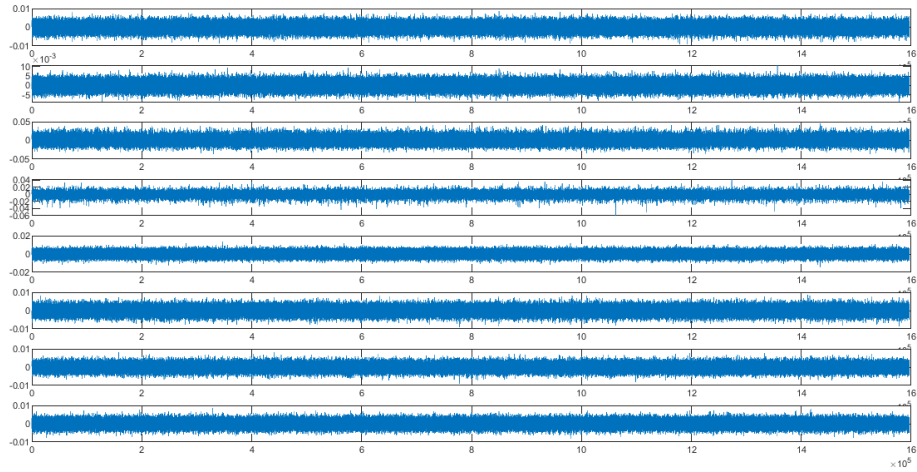


Fig. 69: Señales de los 8 micrófonos con potencia 3 del extractor.

Potencia Extractor: 5

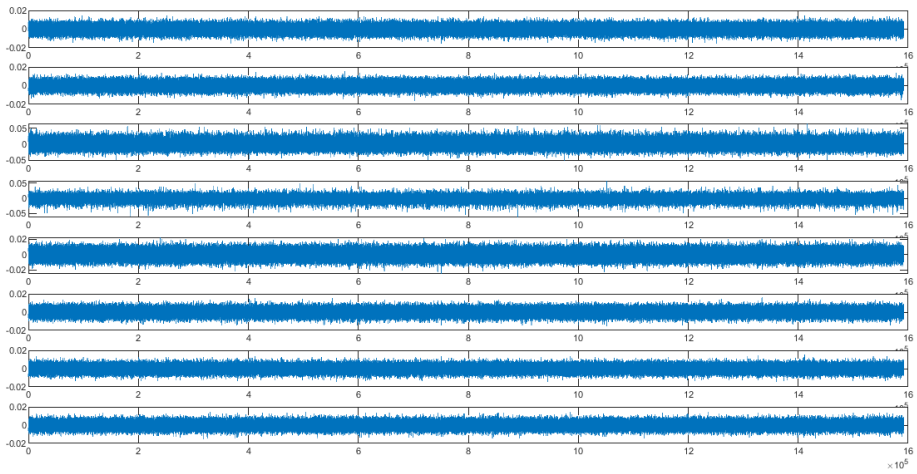


Fig. 70: Señales de los 8 micrófonos con potencia 5 del extractor.

Potencia Extractor: 7

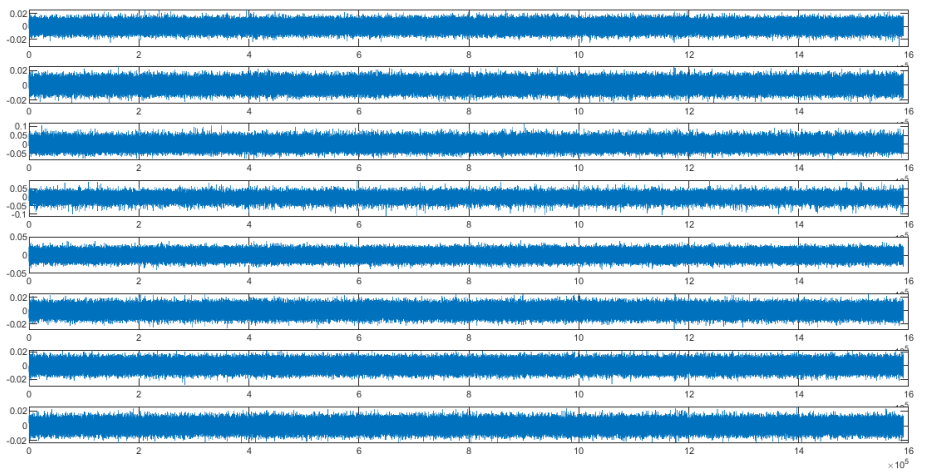


Fig. 71: Señales de los 8 micrófonos con potencia 7 del extractor.

Potencia Extractor: 9

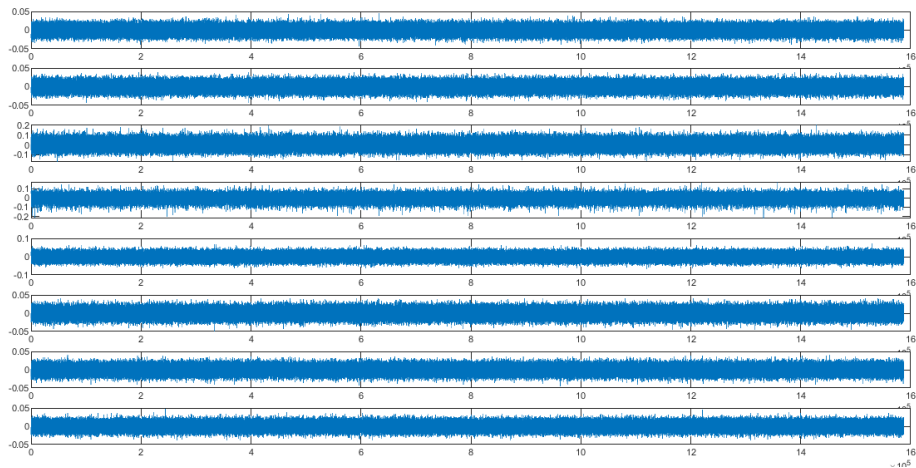


Fig. 72: Señales de los 8 micrófonos con potencia 9 del extractor.

Potencia Extractor: Boost

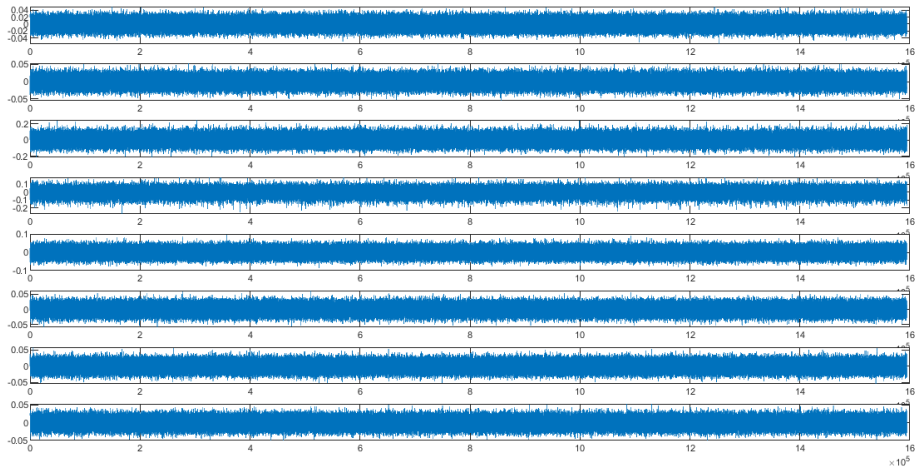


Fig. 73: Señales de los 8 micrófonos con potencia Boost del extractor.

Potencia Extractor: SuperBoost

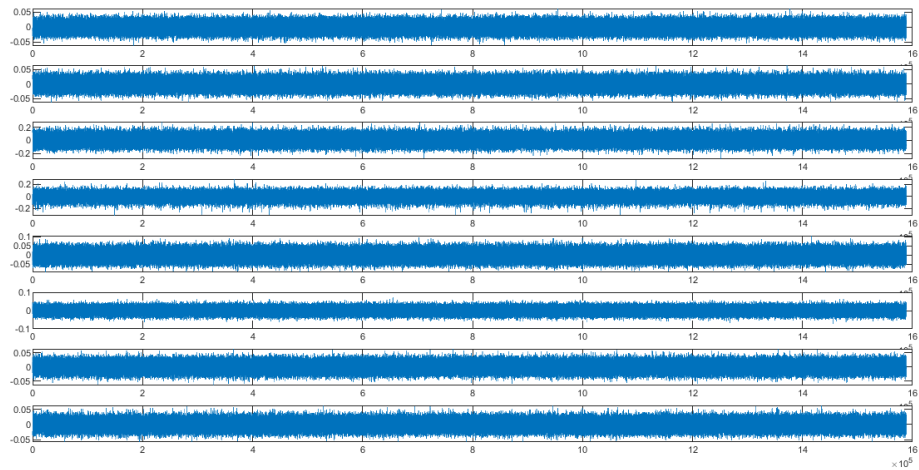


Fig. 74: Señales de los 8 micrófonos con potencia SuperBoost del extractor.

Anexo 3

Gráficas de las señales de los micrófonos con la cocina abierta en una configuración de 8 micrófonos.

Potencia Extractor: Sin Extractor

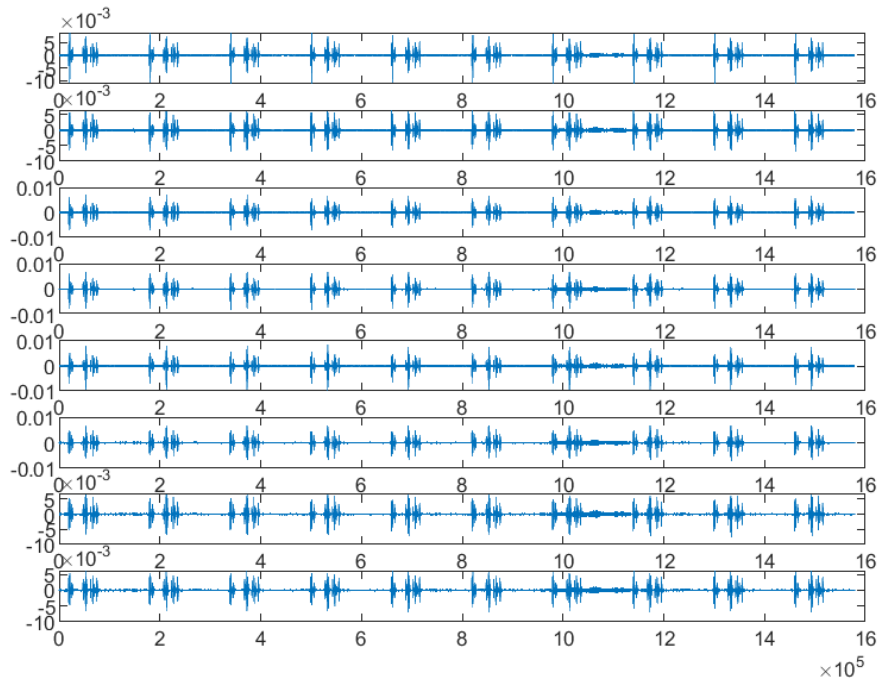


Fig. 75: Señales de los 8 micrófonos sin ruido del extractor con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 1

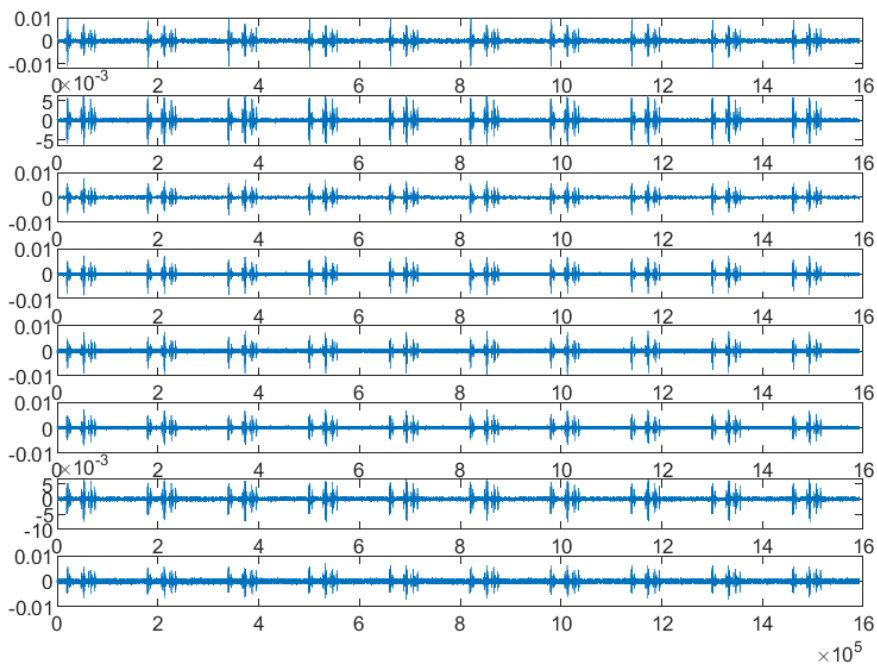


Fig. 76: Señales de los 8 micrófonos con potencia 1 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 3

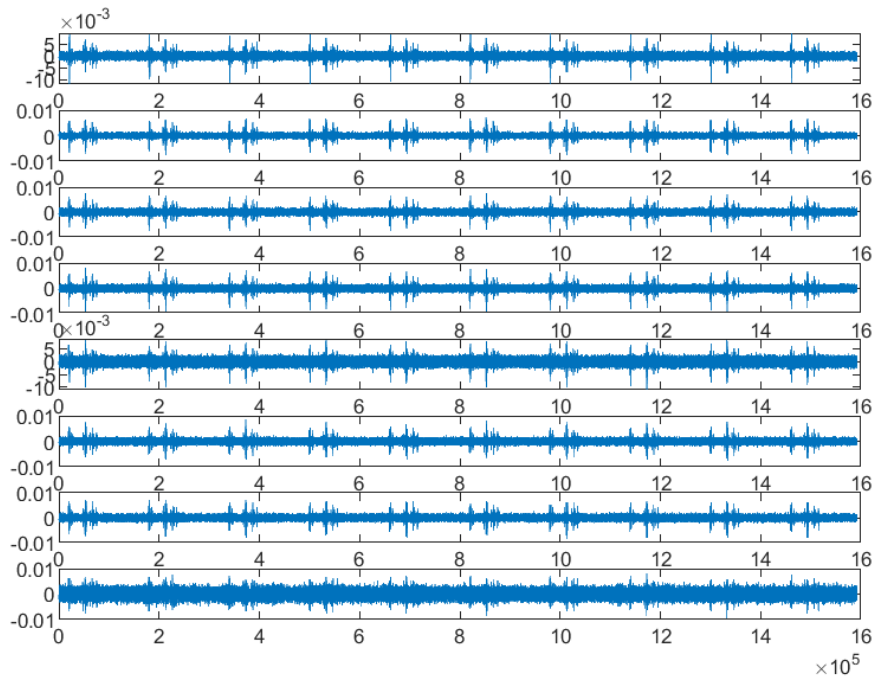


Fig. 77: Señales de los 8 micrófonos con potencia 3 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 5

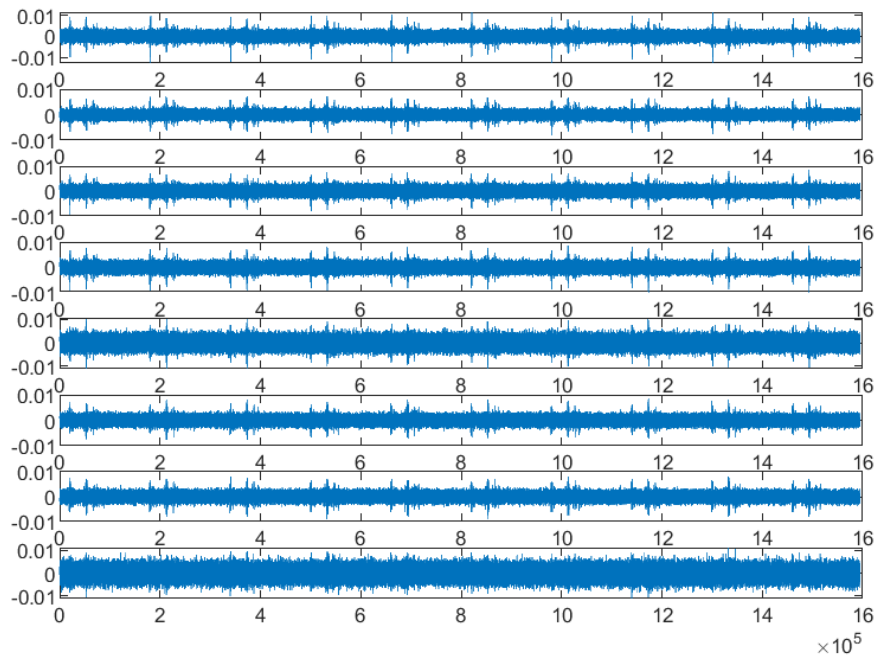


Fig. 78: Señales de los 8 micrófonos con potencia 5 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 7

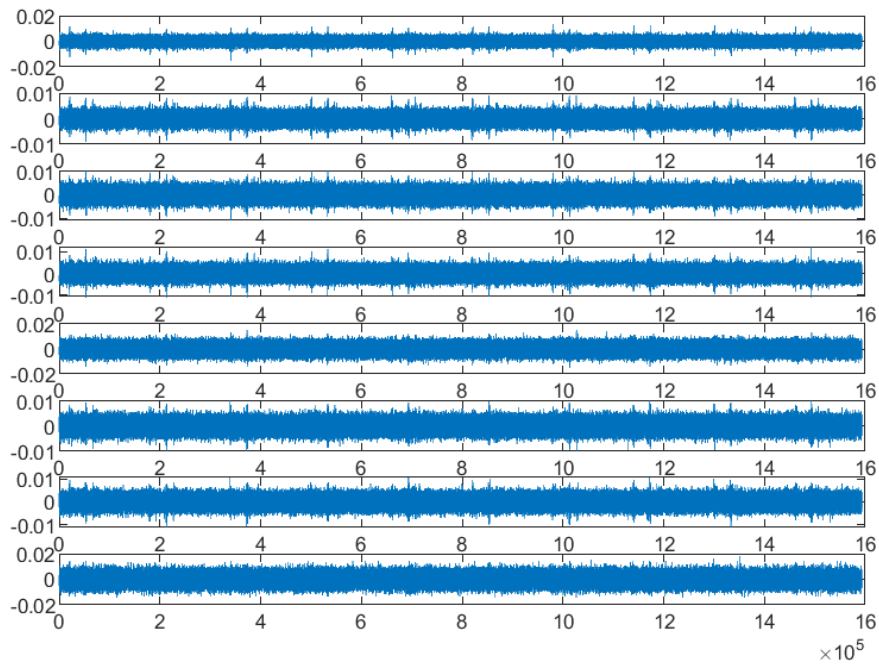


Fig. 79: Señales de los 8 micrófonos con potencia 7 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 9

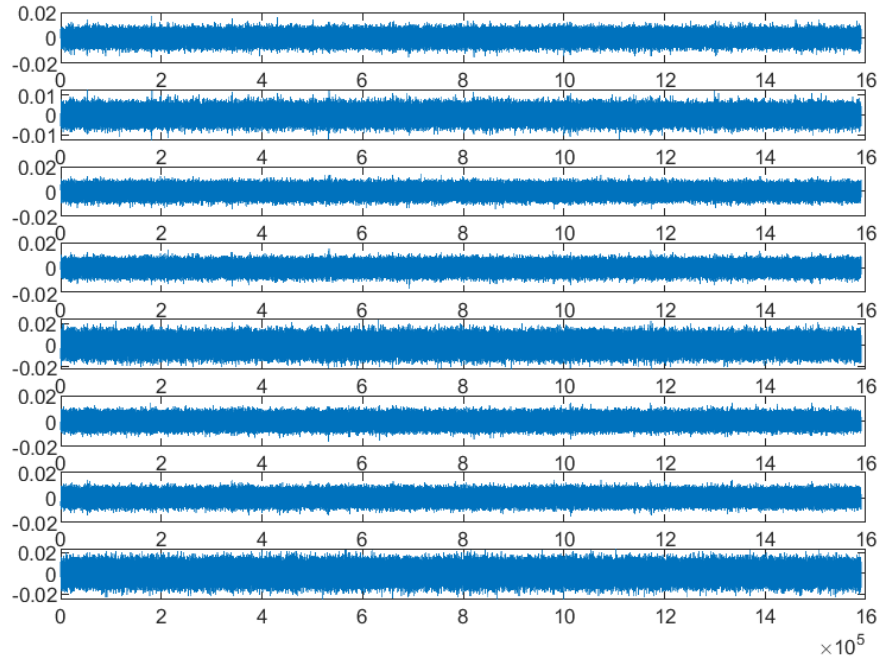


Fig. 80: Señales de los 8 micrófonos con potencia 9 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: Boost

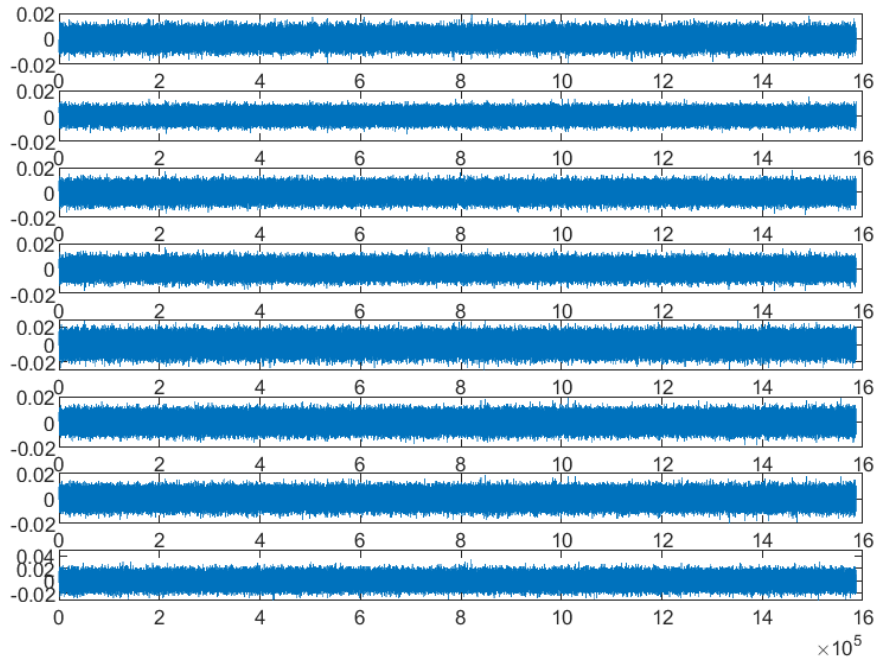


Fig. 81: Señales de los 8 micrófonos con potencia Boost con la cocina abierta.

Potencia Extractor: SuperBoost

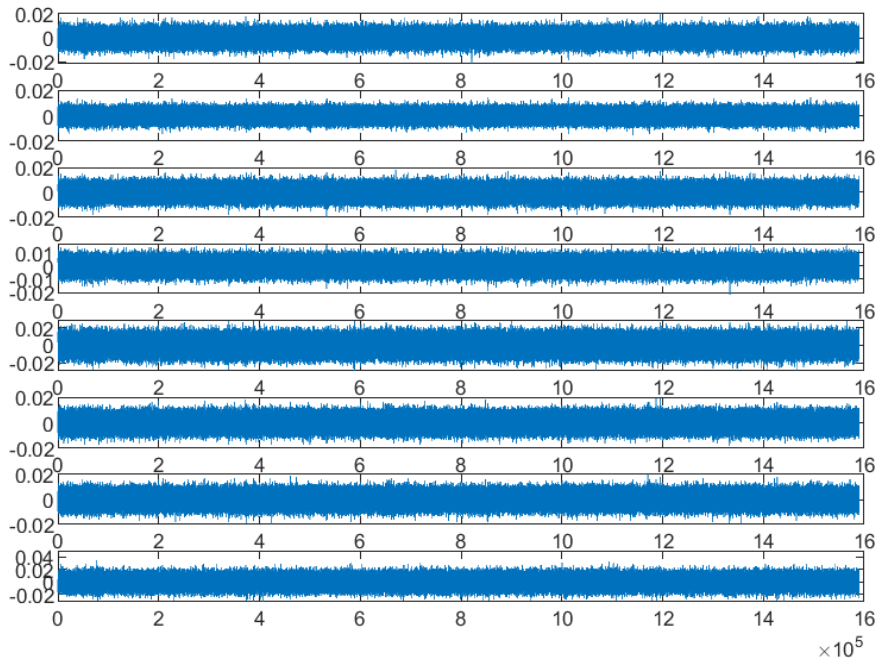


Fig. 82: Señales de los 8 micrófonos con potencia SuperBoost con la cocina abierta.

Anexo 4

Gráficas de las señales de los micrófonos con la cocina abierta en una configuración de 12 micrófonos.

Potencia Extractor: Sin Extractor

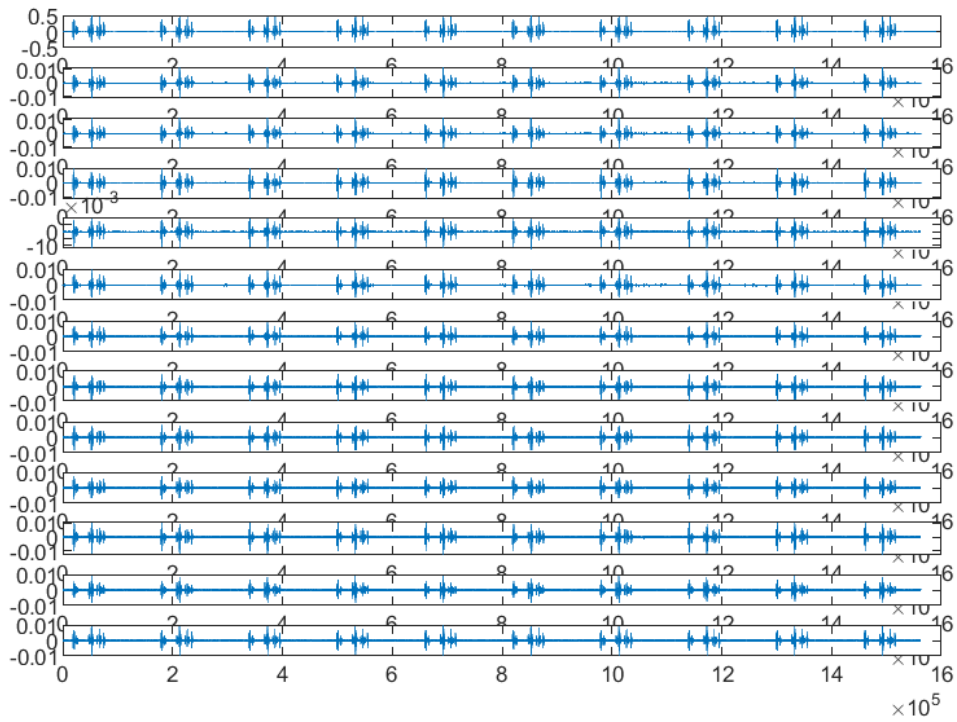


Fig. 83: Señales de los 12 micrófonos sin el extractor con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 1

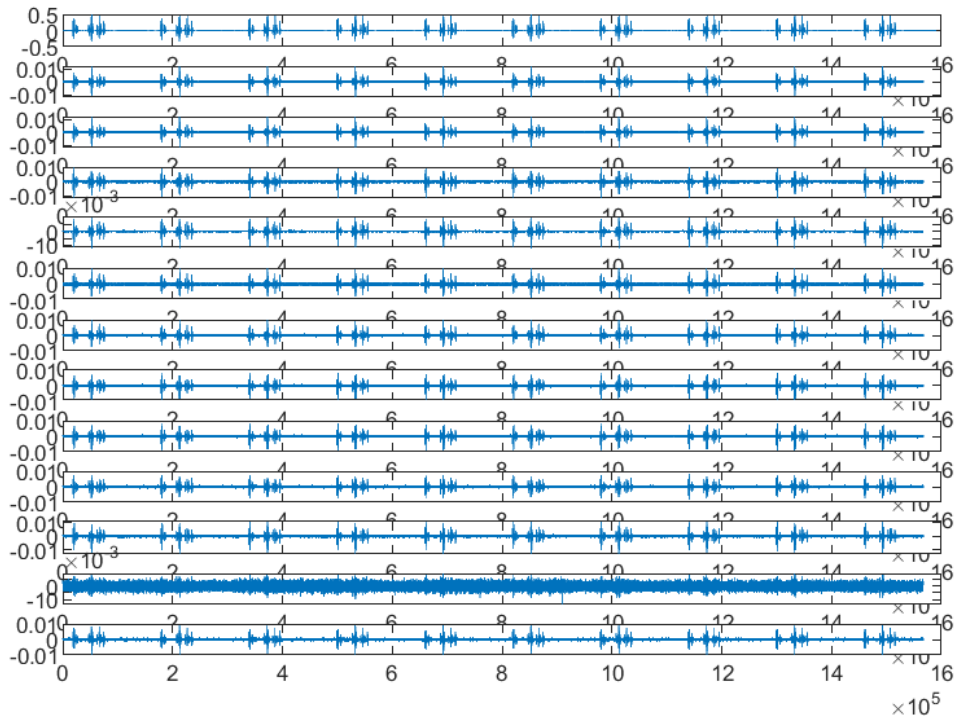


Fig. 84: Señales de los 12 micrófonos con potencia 1 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 3

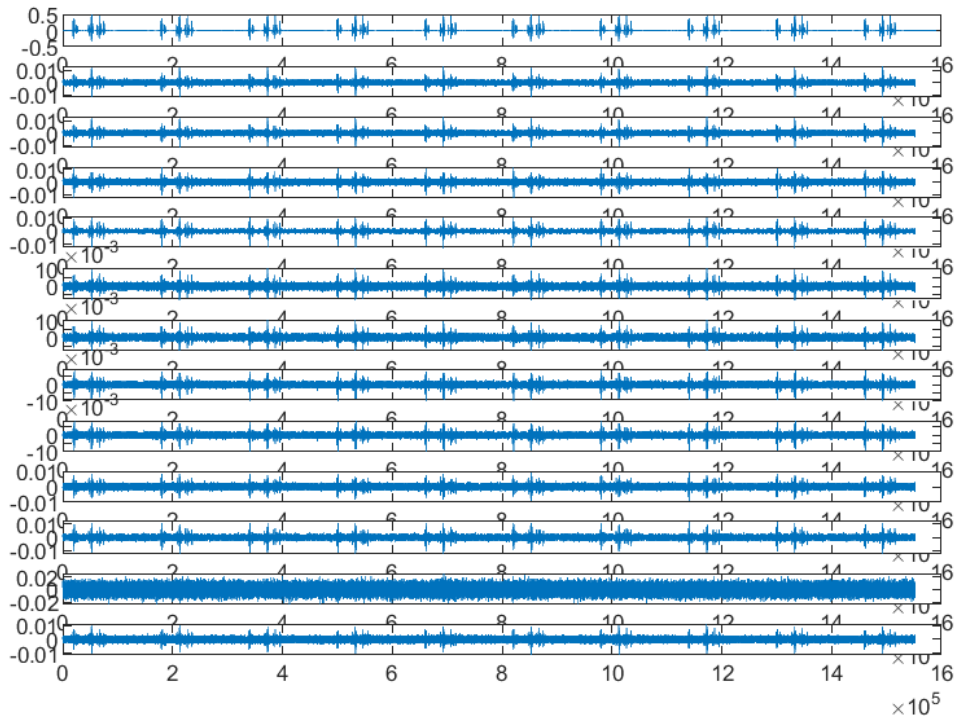


Fig. 85: Señales de los 12 micrófonos con potencia 3 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 5

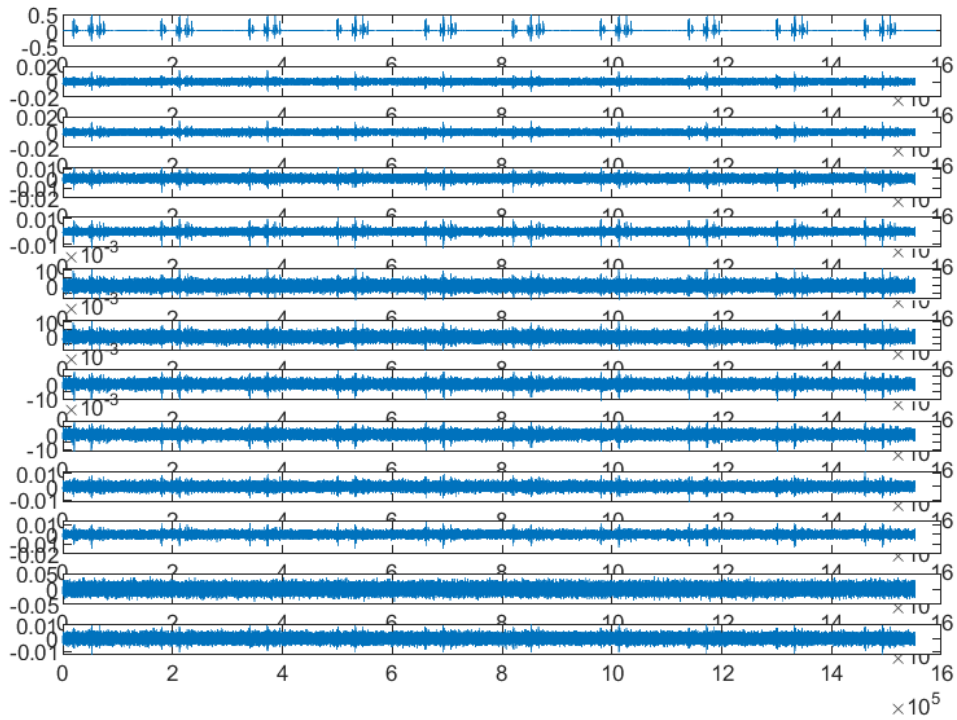


Fig. 86: Señales de los 12 micrófonos con potencia 5 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 7

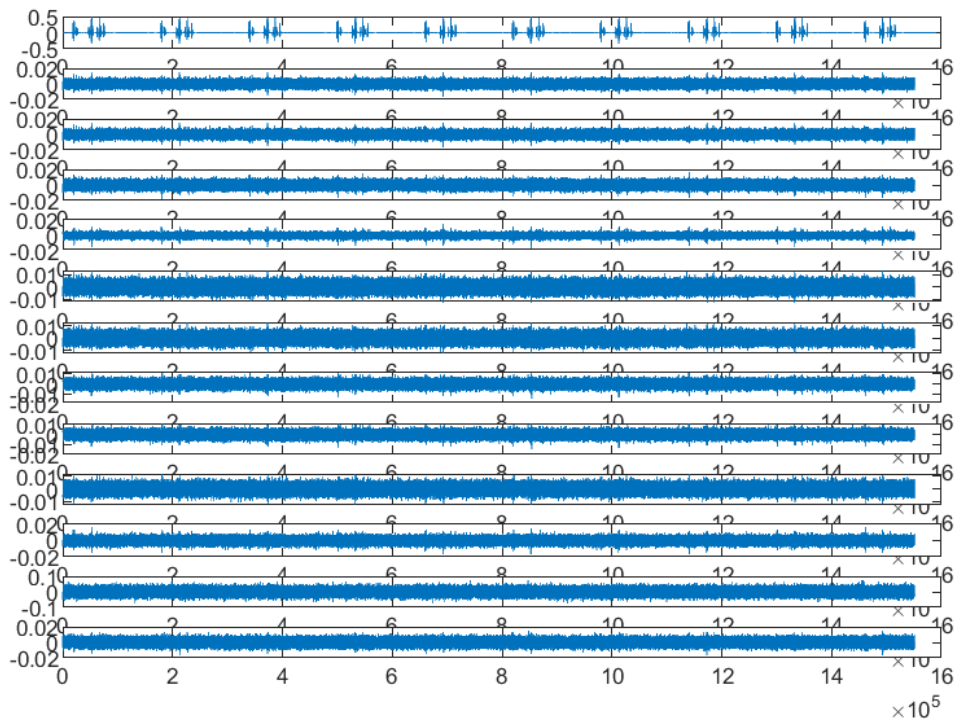


Fig. 87: Señales de los 12 micrófonos con potencia 7 con la cocina abierta.

Anexo 5

Gráficas de las señales de los micrófonos con la cocina abierta en una configuración de 16 micrófonos.

Potencia Extractor: Sin Extractor

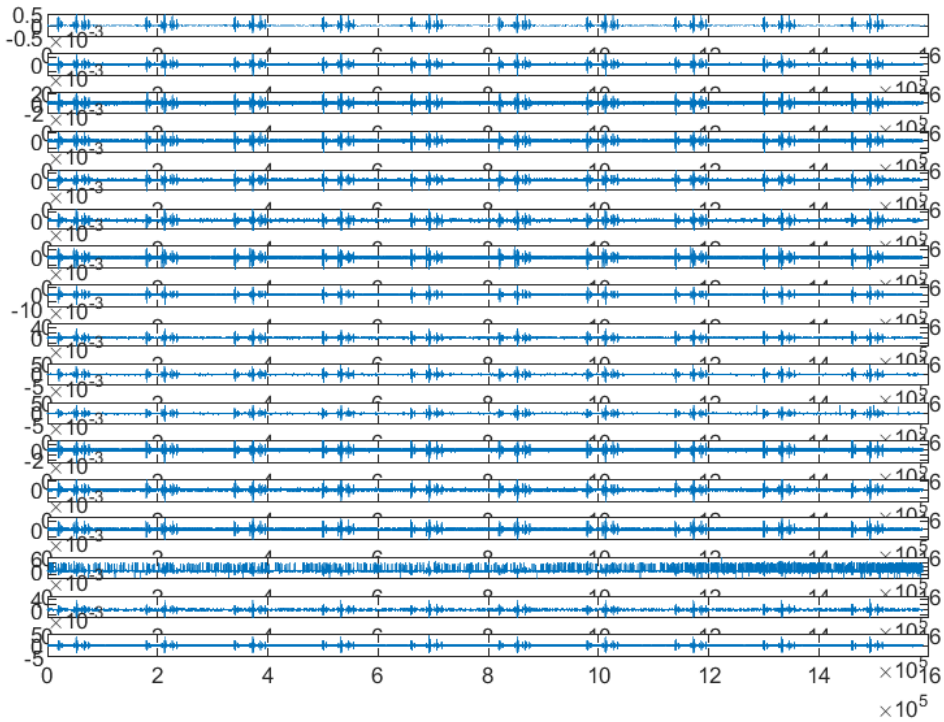


Fig. 88: Señales de los 16 micrófonos sin el extractor con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 1

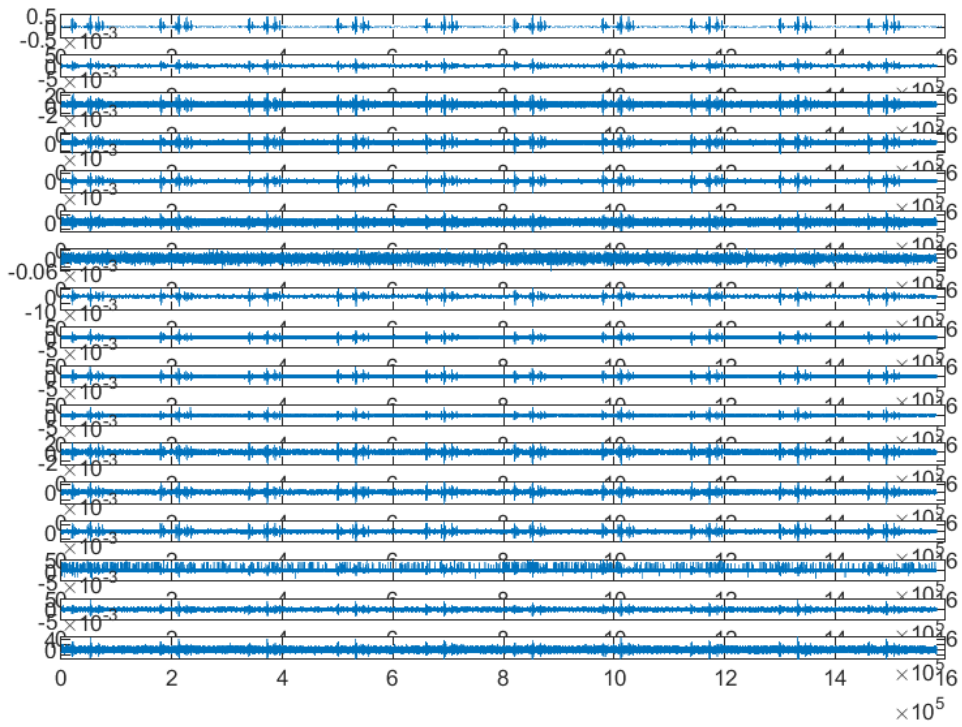


Fig. 89: Señales de los 16 micrófonos con potencia 1 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 3

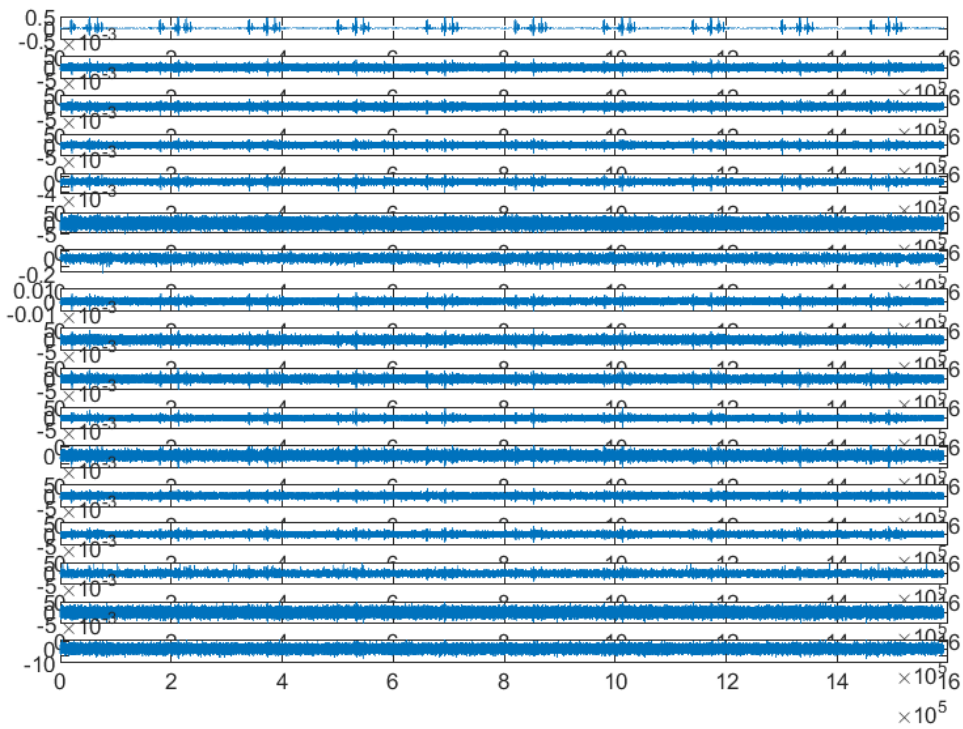


Fig. 90: Señales de los 16 micrófonos con potencia 3 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 5

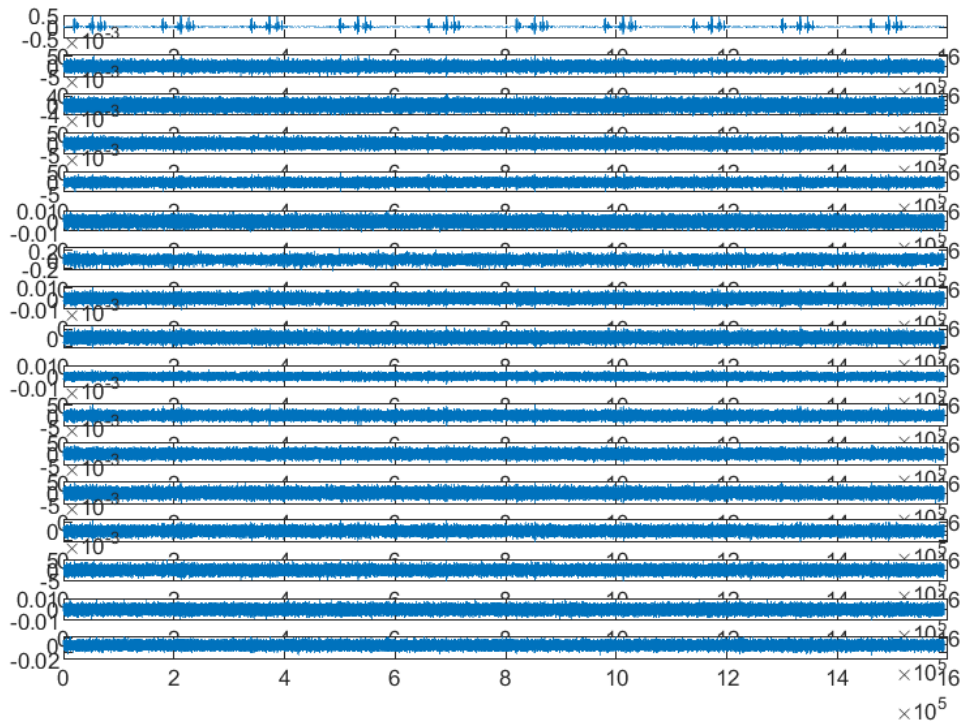


Fig. 91: Señales de los 16 micrófonos con potencia 5 con la cocina abierta.

Potencia Extractor: 7

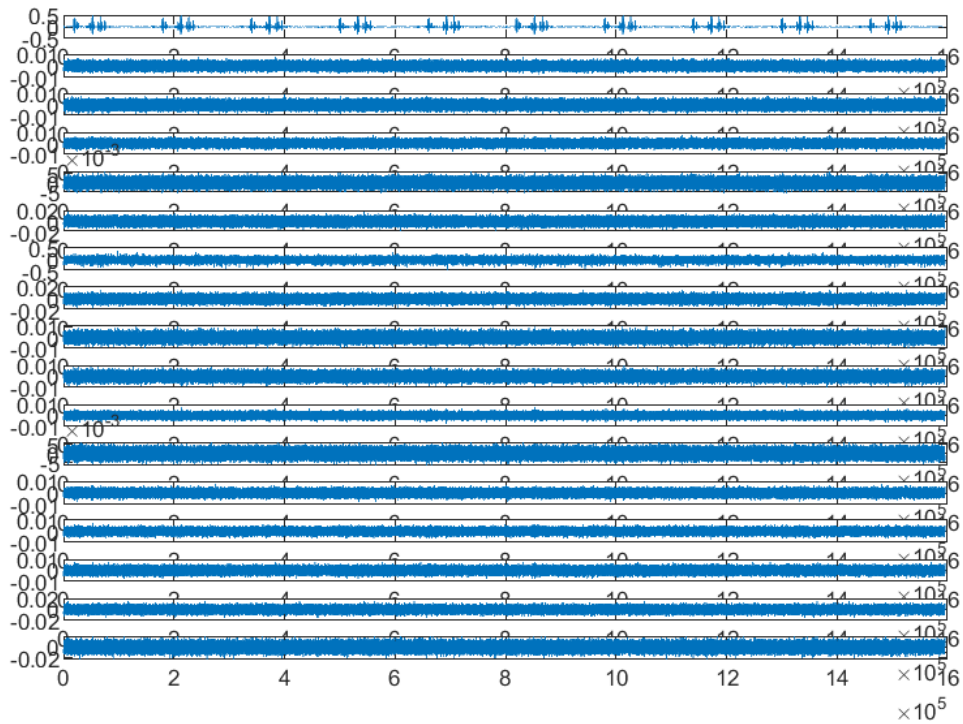


Fig. 92: Señales de los 16 micrófonos con potencia 7 con la cocina abierta.

Anexo 6

Gráficas de las señales de los micrófonos con la cocina cerrada en una configuración de 16 micrófonos.

Potencia Extractor: Sin Extractor

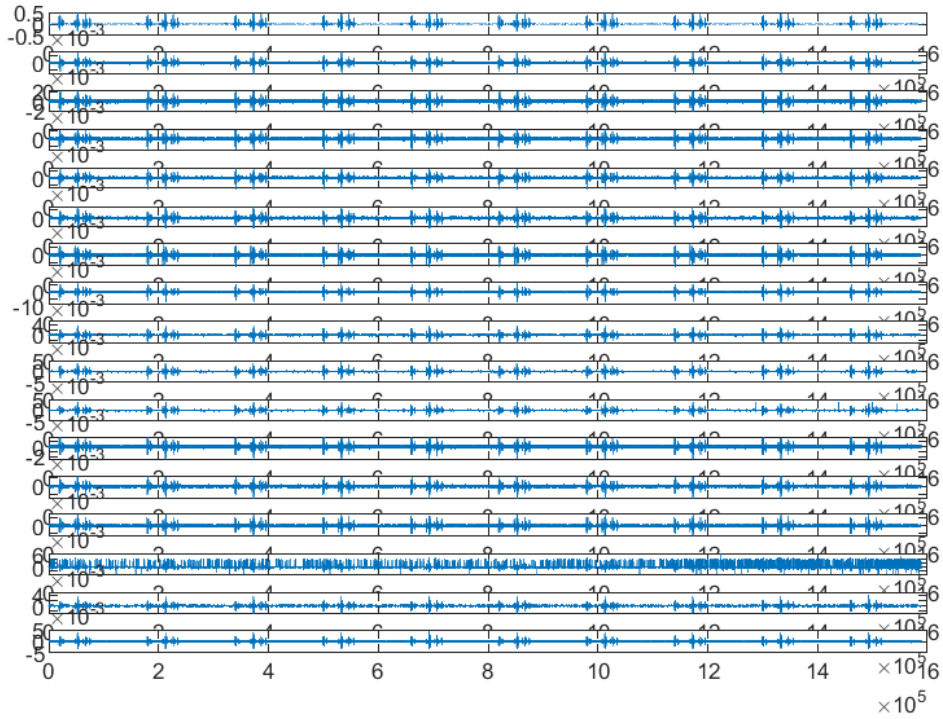


Fig. 93: Señales de los 16 micrófonos sin el extractor con la cocina cerrada.

Potencia Extractor: 1

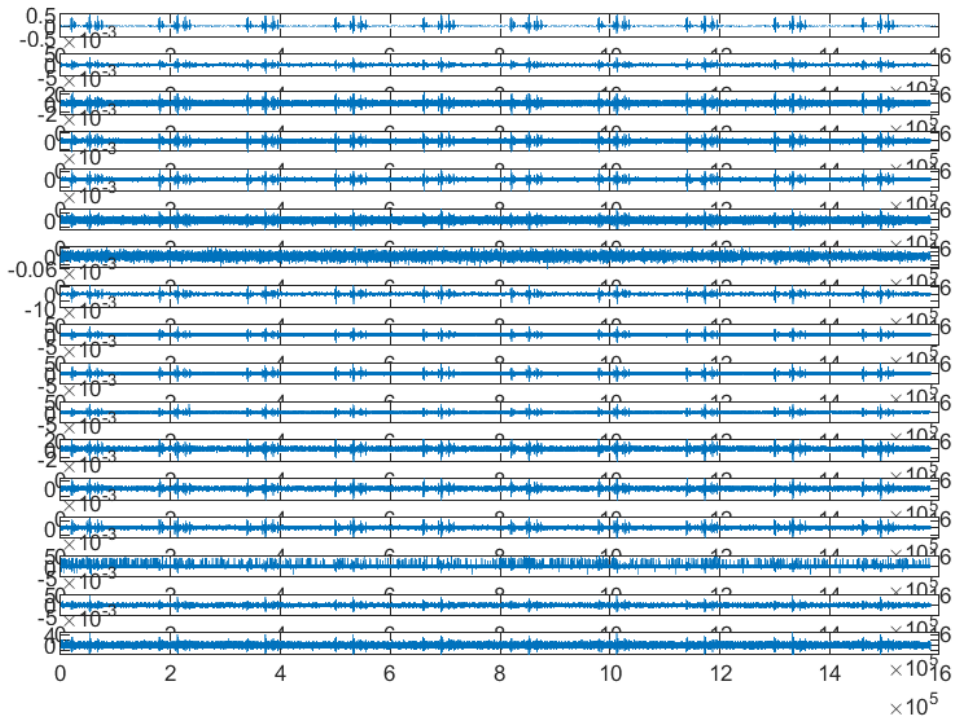


Fig. 94: Señales de los 16 micrófonos con potencia 1 con la cocina cerrada.

Potencia Extractor: 3

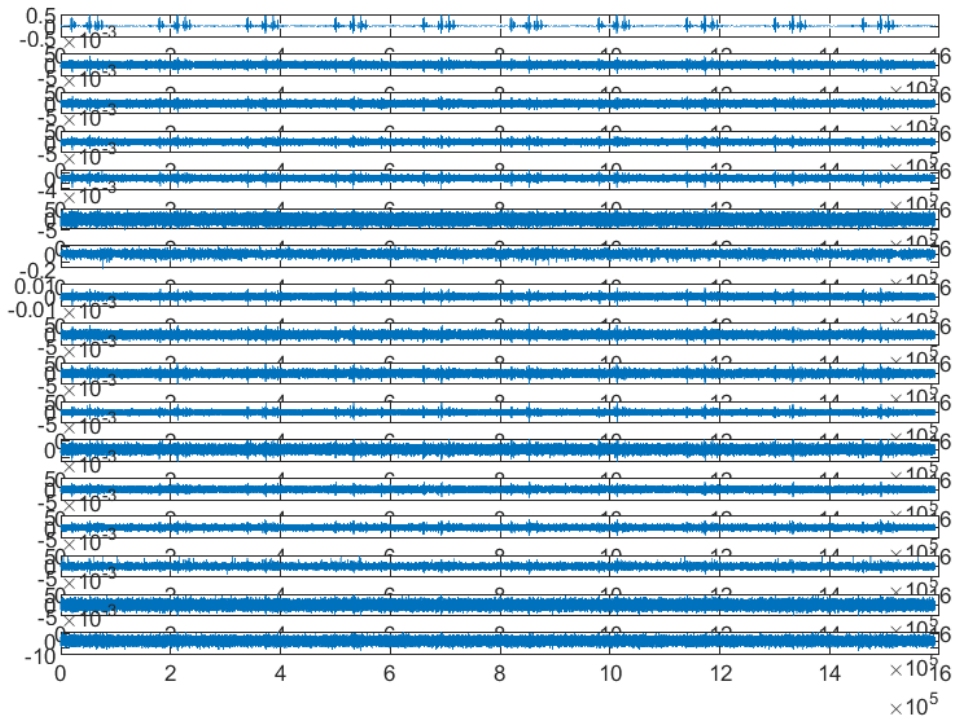


Fig. 95: Señales de los 16 micrófonos con potencia 3 con la cocina cerrada.

Potencia Extractor: 5

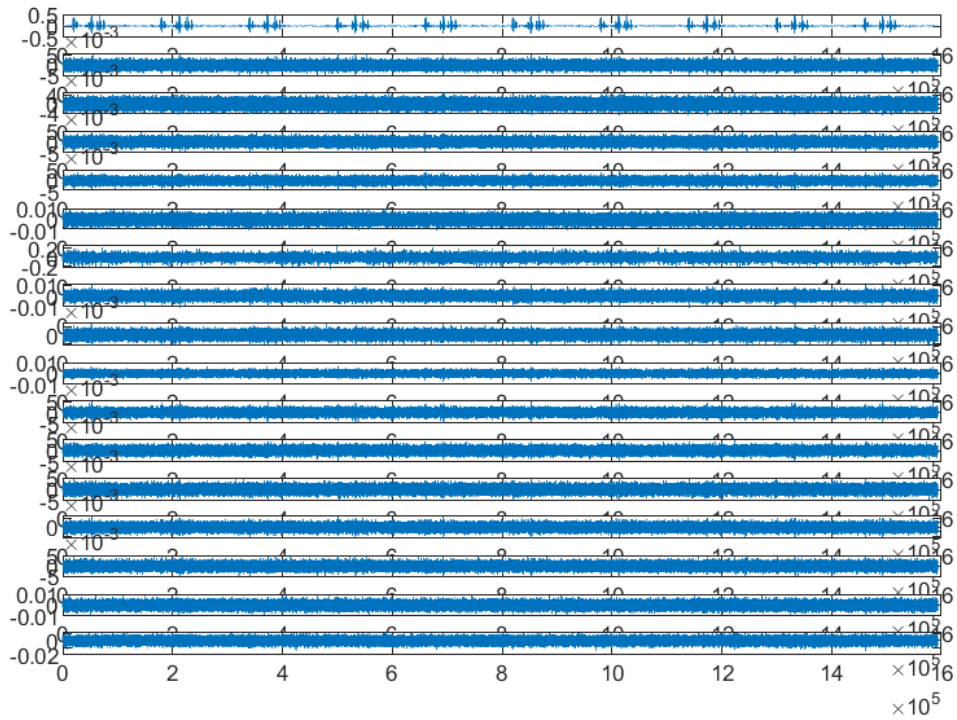


Fig. 96: Señales de los 16 micrófonos con potencia 5 con la cocina cerrada.

Potencia Extractor: 7

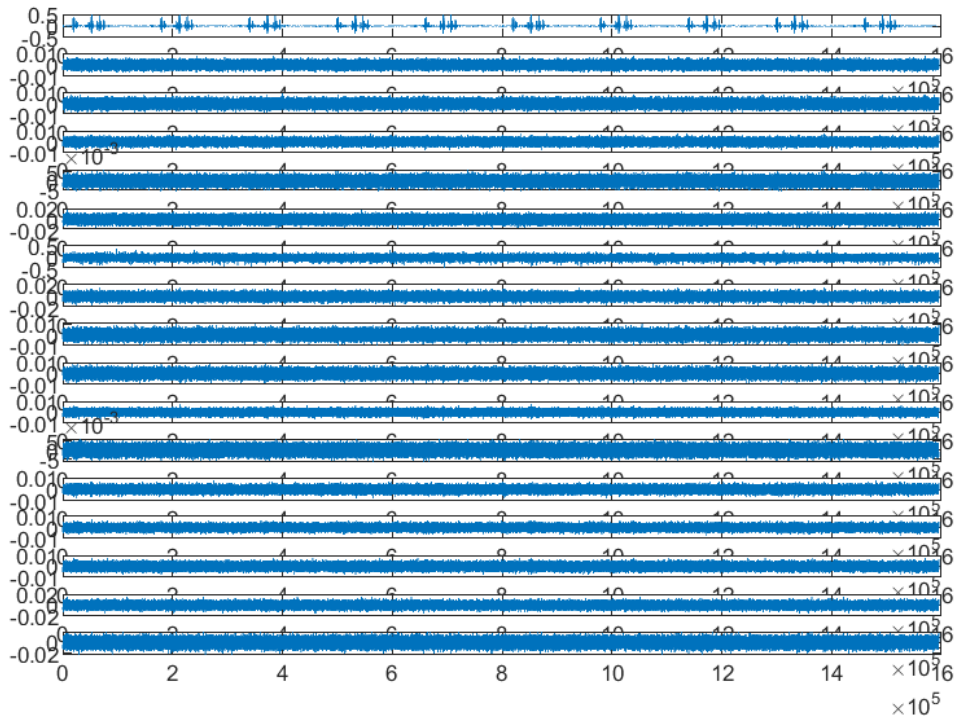


Fig. 97: Señales de los 16 micrófonos con potencia 7 con la cocina cerrada.