



Universidad de Valladolid

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE
TELECOMUNICACIÓN**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN ARRAY MEMS
EN BANDA ULTRASÓNICA**

Autor: Alberto de la Peña de Alaiz

Tutor: Juan José Villacorta Calvo

RESUMEN DEL PROYECTO

El grupo de investigación reconocido GPA (Grupo de Procesado en Array) de la universidad de Valladolid ha desarrollado un sistema biométrico basado en sensores acústicos MEMS. El objetivo es la exploración de una persona mediante su respuesta acústica, obtenida del rebote de una serie de tonos a distintas frecuencias capturadas por un array de sensores MEMS. Este sistema emite tonos dentro de la banda audible (20 Hz - 20000 Hz).

En este proyecto se va a desarrollar un sistema que trabaje en la banda ultrasónica con el objetivo de mejorar la resolución del sistema existente. Para ello se busca adaptar el sistema para funcionar en el rango de frecuencias especificado. Se realiza una búsqueda de sensores MEMS ultrasónicos y el diseño específico de dos arrays para trabajar a frecuencias ultrasónicas. El sistema está compuesto por un único altavoz como sistema de emisión, un conjunto de sensores ultrasónicos como sistema de captura, un dispositivo NI myRIO de National Instruments que se encarga de realizar el procesamiento de los datos y un PC donde se almacenan y analizan los resultados obtenidos mediante su visualización en distintas gráficas.

ABSTRACT

The recognized research group GPA (Processing Array Group) from the university of Valladolid has developed a biometric system based on acoustic sensors MEMS. The aim is the exploration of a person through his acoustic response which is obtained from a set of tones at different frequencies captured by a sensors array MEMS. This system emit tones inside the audible band (20 Hz - 20000 Hz).

In this project will be developed a system that works in the ultrasonic band with the aim of improve the resolution of the existing system. For this we try to adapt the system to work in the specified band. A search for ultrasonic sensors is carried out and the specific design of two arrays to work at ultrasonic frequencies is performed. The system is composed by one speaker as emission system, a set of ultrasonic sensors as capture system, a NI myRIO device form National Instruments that performs the data processing and the PC where they are stored and analyzed.

PALABRAS CLAVE

Ultrasonidos, MEMS, LabVIEW, myRIO, array, piezoelectricidad

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVOS	7
3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE : Cámaras Acústicas	8
4. BANDAS DE FRECUENCIA: Los Ultrasonidos	37
5. LA PIEZOELECTRICIDAD	39
5.1. El altavoz piezoeléctrico	39
6. LOS SENSORES MEMS	42
6.1. Sensores acústicos y de ultrasonido MEMS	43
6.2. Micrófono MEMS MP34DT01	45
6.3. Micrófono MEMS SPH0641LU4H-1	46
7. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE	48
7.1. La plataforma NI MYRIO	48
7.2. Introducción al array de micrófonos	50
7.3. Diseño de las placas para sensores MEMS SPH0641LU4H-1	51
7.4. Distribución de funcionalidades del sistema de captura y procesado	53
8. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE	54
8.1. Lenguaje de programación: LabVIEW	54
8.2. Procesos asignados a la FPGA	54
8.2.1. Reloj de los MEMS	54
8.2.2. Sistema de captura en la FPGA	54
8.2.3. Sistema de emisión en la FPGA	56
8.3. Procesos asignados al procesador del dispositivo myRIO	56
8.3.1. Extracción y demultiplexación de los datos	56
8.3.2. Diezmado de la señal	57
8.3.3. Análisis espectral mediante la DFT	57
8.4. Procesos asignados al PC	57
9. PRUEBAS Y RESULTADOS	58
9.1. Pruebas realizadas con el sensor MP34DT01	58
9.1.1. Transductor de ultrasonidos resonante a 40KHz	58
9.1.2. Transductor piezoeléctrico	58
9.1.3. Sistema amplificado	59
9.1.4. Conclusiones de las medidas realizadas	59
9.2. Pruebas con distintos amplificadores TDA	60
9.3. Elección del altavoz piezoeléctrico	64
10. CONCLUSIONES	68
11. LÍNEAS FUTURAS	69
12. BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXO	72

1. INTRODUCCIÓN

Desde los tiempos antiguos, el hombre siempre ha sentido preocupación por entender el mundo que le rodea y caracterizarlo con teorías, hipótesis, fórmulas y postulados. Desde Tales de Mitelo, Pitágoras, Euclides hasta los más modernos matemáticos se han ido desarrollando teorías de deducción lógica ya sea partiendo de la experiencia para llegar a teorías generales o bien partiendo de una serie de axiomas e hipótesis razonables, por deducción, hasta su comprobación experimental.

A partir del siglo XVII, científicos como Isaac Newton, Robert Boyle, René Descartes, Galileo Galilei, provocan un avance importante en los ámbitos de la física, la química y las matemáticas. Por medio de formulaciones y experimentos se llega a teorías consistentes que revolucionan la física dando lugar a que posteriormente se descubra la electricidad y la teoría sobre los campos magnéticos, donde destacaron científicos como Lorentz, Hertz, Planck, Einstein, etc.

En cuanto al campo de las matemáticas cabe destacar en el siglo XVIII al matemático y físico francés Joseph Fourier, quien desarrollo una serie de herramientas que en el siglo XX y XXI han resultado muy útiles en la mayoría de los campos de estudio. Otros matemáticos destacados son Euler, LaGrange, Bernoulli, etc.

A finales del siglo XVIII el progreso tecnológico comienza a despegar. Desde la máquina de vapor de Watt, y durante todo el siglo XIX, las teorías de los científicos comienzan a aplicarse en el proceso técnico de fabricación de bienes de consumo y servicios, consiguiendo facilitar y abaratar el proceso de fabricación de nuevas tecnologías.

Por otra parte, en el siglo XX, con la primera y la segunda guerra mundial, se comienzan a aplicar estas tecnologías y descubrimientos en el ámbito militar para las comunicaciones vía radio, surgiendo los primeros sistemas de radiodeterminación analógicos, como por ejemplo, el radar. Posteriormente todos estos avances se comienzan a emplear en el ámbito civil.

El panorama en el siglo XX fue muy favorable, equilibrándose los avances tecnológicos con los nuevos descubrimiento y todas las teorías físicas, químicas y matemáticas formuladas hasta la fecha. Hasta este momento, las tecnologías se consideraban dentro del ámbito analógico, empleándose funciones continuas y ecuaciones diferenciales para el desarrollo de teorías matemáticas. Sin embargo todos estos procesos no hubieran progresado de no ser por la introducción de un nuevo tipo de diseño con la introducción de los ordenadores y el mundo digital. De este modo, los problemas del mundo real se comienzan a intentar resolver discretizando las funciones y pasando de las ecuaciones diferenciales a otras en diferencias. A pesar de esto, existía el gran inconveniente de que estas últimas requerían una capacidad de cálculo numérico muy grande. Es entonces donde entra el matemático Von Neuman y el desarrollo de la electrónica de conmutación, primero con válvulas de vacío y después con los transistores. Cabe destacar también al físico e inventor Nikola Tesla por sus numerosas invenciones dentro del campo electromagnético y por ser el descubridor de la corriente alterna y el motor de inducción. Hay quien considera a Tesla como el inventor del mundo

moderno. Es entonces cuando se empieza a utilizar dichas discretizaciones en superordenadores con programa almacenado dando lugar al comienzo de la era digital.

Gracias a estos avances y a la aparición de los microchips y las nuevas tecnologías de integración, se consiguió aumentar la velocidad de proceso, la reducción del tamaño y el consumo de los componentes empleados en las máquinas de procesamiento digital. De este modo, en el ámbito de procesamiento de señal, se comienza a transformar todos los procesos analógicos en digitales, desarrollando toda una teoría alternativa de procesamiento discreto. Es necesario destacar el desarrollo de los denominados conversores analógico/digitales pues todos los procesos presentes en la naturaleza son de carácter analógico. En la actualidad, mediante el uso de microchips, ordenadores y el conjunto de circuitos digitales se puede desarrollar una gran cantidad de dispositivos, desde la electrónica de consumo, las comunicaciones a distancia, hasta los sistemas radar y sonar digitales. A partir de este último campo partimos para explicar la teoría en la cual está centrado este proyecto.

El radar y el sonar son dispositivos capaces de detectar blancos fijos y móviles presentes en cualquier medio. El radar usa, ondas electromagnéticas en el aire mientras que el sonar emplea ondas acústicas en el agua. Ambos sistemas consisten en la emisión de un pulso, cuyo rebote en los distintos obstáculos es recogido por un array de micrófonos, esas señales se discretizan convirtiéndose en señales digitales, se procesan y mediante unos métodos de conformación y detección se visualizan los blancos encontrados. El sistema que se diseña en este trabajo es similar en cuanto a la mecánica de funcionamiento, sin embargo, el objetivo no es detectar blancos sino caracterizarlos en una imagen acústica 2D empleando frecuencias ultrasónicas y emplearlo en un sistema de identificación biométrica.

Este proyecto parte de un sistema existente. El grupo de investigación reconocido GPA (Grupo de Procesado en Array) de la universidad de Valladolid ha desarrollado un sistema biométrico basado en sensores acústicos [1]. Mediante un array de sensores acústicos se realiza la exploración de una persona obteniendo su respuesta acústica para un conjunto de frecuencias y posiciones específicas. Con esta información y empleando técnicas de clasificación avanzadas, se diseñan sistemas que permiten identificar a un conjunto extenso de personas y por tanto establecer un sistema biométrico de coste reducido y no intrusivo. Este sistema se compone de un único altavoz como sistema de emisión, un conjunto de sensores acústicos como sistema de captura, un dispositivo NI myRIO de National Instruments que se encarga de realizar el procesamiento de los datos y un PC donde se almacenan los resultados obtenidos. Este sistema utiliza el rango de frecuencias acústicas en la banda audible (20 - 20000 Hz). Utilizando este rango de frecuencias no se obtiene una resolución suficiente como para caracterizar una persona y por esta razón, en este proyecto se va a implementar el mismo sistema pero empleando el rango de frecuencias ultrasónicas.

La estructura del proyecto es la siguiente: para comenzar se describen los objetivos propuestos en el capítulo dos. En el capítulo tres se realiza una revisión del estado del arte de las cámaras acústicas presentes en el mercado así como el hardware y software que requieren, analizando los diferentes modelos que existen y sus características. En el capítulo cuatro se realiza una descripción teórica de los ultrasonidos, sus principales características, su comparación con la banda acústica y las razones por las que se emplean en este sistema. En el capítulo cinco se

describe el fenómeno de la piezoelectricidad así como su aplicación en los altavoces y su funcionamiento seguido de las características que destacan para su empleo en este sistema. En el capítulo seis se realiza un análisis y descripción de los MEMS seguido de una descripción detallada de los tipos y funcionamiento de los MEMS acústicos para posteriormente introducir los dos modelos con los que se ha trabajado en el sistema desarrollado exponiendo sus principales característica y su modo de empleo.

A continuación se procederá a describir el sistema desarrollado, en el capítulo siete se realiza una descripción del hardware, dividiendo el capítulo en varios apartados, cada uno de ellos centrándose en cada herramienta empleada en el sistema para su correcto funcionamiento. En el capítulo ocho se detalla la implementación del software así como el lenguaje de programación empleado detallando en diferentes secciones el funcionamiento de la adquisición de datos y el procesado de la señal. Una vez construido el sistema y explicado su funcionamiento, en el capítulo nueve se procede a realizar una serie de pruebas para comprobar y analizar los resultados obtenidos. Por último en el capítulo diez se redactan las conclusiones obtenidas de la realización del proyecto y en el capítulo once las posibles mejoras y pasos a seguir para completar e implementar el proyecto desarrollado.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal es aumentar la resolución de las imágenes acústicas obtenidas para permitir su utilización en un sistema de identificación biométrica más preciso. Para conseguir este fin, se definen una serie de objetivos secundarios para el diseño de este nuevo sistema:

- Comprobar si el sistema actual puede trabajar en la banda ultrasónica y el dispositivo NI myRIO es capaz de procesar los datos recibidos a altas velocidades de muestreo.
- Testear la viabilidad de los MEMS MP34DT01 para trabajar en banda ultrasónica, sabiendo que estos MEMS están diseñados para trabajar en la banda audible. Realizar y analizar pruebas con el array existente que emplea los MEMS MP34DT01 fuera del rango diseñado por el fabricante.
- Evaluar los sistemas de transmisión de los amplificadores del sistema anterior y buscar amplificadores que tengan un gran ancho de banda para poder cubrir frecuencias más altas que la banda audible, es decir, por encima de los 20 KHz.
- Diseñar un array de micrófonos adecuado a las frecuencias ultrasónicas. Buscar un micrófono MEMS que este diseñado para trabajar a frecuencias ultrasónicas y diseñar placas con un dimensionado adecuado para esas frecuencias.

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Análisis Comparativo de Cámaras Acústicas

Las cámaras acústicas son dispositivos que se encargan de visualizar las fuentes de sonido, localizan las diferentes fuentes en un entorno complejo e identifican las fugas de ruido en cualquier superficie. Estas cámaras se basan en la tecnología Beamforming, una técnica espacial de filtrado que se usa para distinguir entre las propiedades espaciales de una señal objetivo y el ruido de fondo. La distribución de los micrófonos en un array (matriz de micrófonos) permite obtener un plano sonoro a la distancia que colocamos dicha cámara. Existen tres tipos principales de array:

- Estrella (exteriores)
- Esféricas (interiores)
- Circulares (interiores)

<u>Fabricante</u>	<u>Enlace Web</u>
THP Systems	http://www.thp-systems.com/systems/acoustic-cameras/
Ngene	http://www.ngene.co/micarr
Norsonic	http://www.norsonic.com/en/products/acoustic_camera/Acoustic+Camera+Nor848A.b7C_wtnQYO.ips
Acoustic Camera	http://www.acoustic-camera.com/en/products/microphone-arrays.html
MICROFLOWN	http://www.microflown.com/products/arrays/hand-held-array.html
BRÜEL & KJÆR	https://www.bksv.com/en/products

THP SYSTEMS

1. Arquitectura
2. Software
3. Hardware

1. ARQUITECTURA

La arquitectura de este tipo de cámaras acústicas es muy sencillo debido a que la cámara se vende con un software basado en configuración para simplificar el proceso de registrar datos acústicos. Este sistema completo facilita crear videos mediante la cámara acústica o registrar datos de micrófono para procesamiento posterior.

2. SOFTWARE

Estos tipos de cámaras acústicas incluyen un simple y sencillo software de alto rendimiento con una interfaz sencilla e intuitiva:



Figura 1: Interfaz del software de THP System

ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO	
Tasa de muestreo	25.6 kS/s
Algoritmo de Imagen	Beamforming
Imagen acústica en tiempo real	
Promedio de imagen lineal/exponencial	
Ajuste de frecuencias en tiempo real	
Exporta en ficheros AVI & WAV	
25 FPS (frames per second)	
Análisis por octavas y mediante FFT	

3. HARDWARE

Este fabricante ofrece dos modelos de cámaras:

	SeeSV-S205	SeeSV-S200
		
Tipo de micrófono	Micrófonos Digitales MEMS	Micrófonos de Condensador 1/4"
Nº de micrófonos	30	30
Sensibilidad de los micrófonos	70 mV/Pa	50 mV/Pa
Diámetro del array	35 cm	85 cm
Rango de frecuencias	350 Hz - 12 KHz	0.8 KHz - 5 KHz
Distancias de Medición	0.2 - 5 m	0.5 - 10 m
Peso	2.5 Kg	6 Kg

NGENE

1. Arquitectura
2. Software
3. Hardware

1. ARQUITECTURA

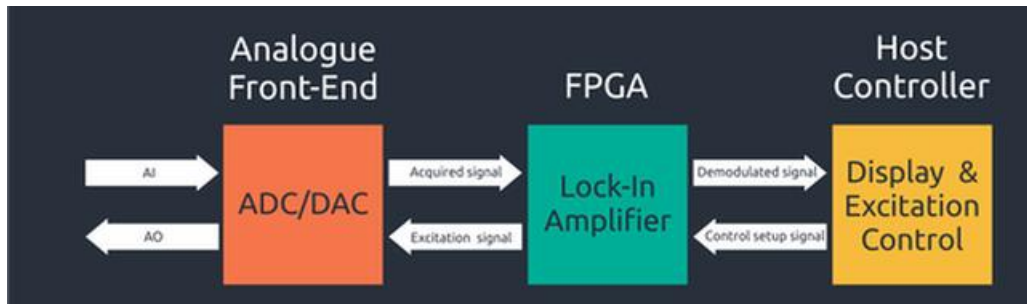


Figura 2: Esquema de la arquitectura NGENE

La operación del sistema completo depende de tres componentes:

- El hardware frontal analógico, el cual, convierte la señal analógica en digital y viceversa.
- El amplificador de señal, procesador y unidad de filtrado basado en FPGA.
- Software controlador basado en Windows para control y visualización de las señales.



Figura 3: Dispositivos Hardware NGENE

Hardware y requerimientos:

LIA-SPF trabaja con la adquisición de datos hardware basada en FPGA. En concreto soporta las siguientes configuraciones hardware:

- NI USB-7855R (USB R Series DAQ) and NI USB-7855R OEM
- NI USB-7856R (USB R Series DAQ) and NI USB-7855R OEM

Para más información acerca de estas tarjetas consultar los enlaces:

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/212017>

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/212023>

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/212018>

<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/212019>

Software y Requerimientos:

- Windows 7 (x86_32 or x64)
- LabVIEW Run-Time Engine (x86_32)

2. SOFTWARE

Lock-In Amplifier Soft front Panel (LIA-SPF) es un software autónomo para trabajar con el hardware de National Instruments basado en FPGA.

Características:

- Listo para emplear el software, enchufar el dispositivo, cargar el software y empezar la adquisición
- Labview drivers para más personalización.
- Multicanal simultáneo en un dispositivo (4x NI-785xR)

Host-Controller:

La interfaz del controlador LIA-SPF proporciona las siguientes características:

- Monitores simultáneos para varios canales
- Monitores diferenciados de las señales en fase y amplitud
- Control de la frecuencia de Excitación/demodulación

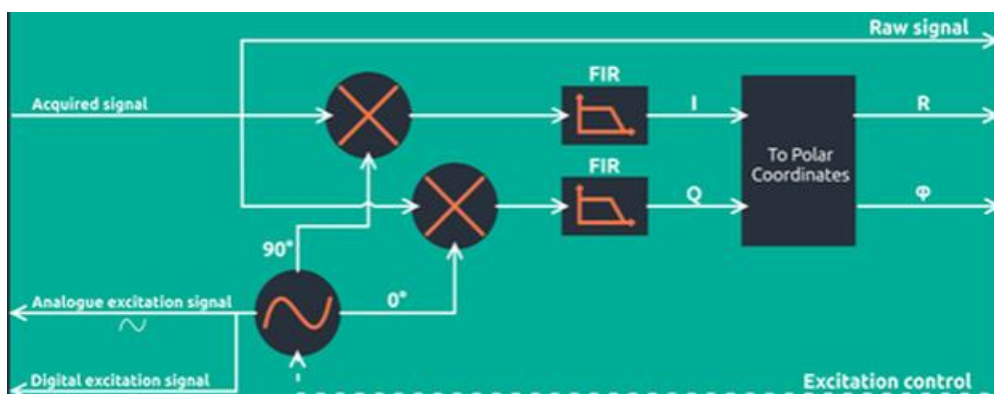


Figura 4: Esquema interno de la adquisición de los datos

Beamforming Toolkit for LabVIEW:

Proporciona mediante la herramienta LabVIEW la posibilidad de aplicar algoritmos de conformación de haz para adquirir o grabar datos procedentes del array de sensores:

- DAS --> delay and sum beamformer

La siguiente lista de algoritmos se encuentra en desarrollo:

- Bartlet Beamformer
- MUSIC (Multiple Signal Classification)
- MVDR (Minimum Variance Distorsion-less Response)

Este kit de herramientas viene como un instalador VIPM (VI package manager) el cual incluye VIs de Labview para la conformación de haz así como ejemplos de demostración: simulación de fuentes de sonido, conformación de imágenes 3D y clasificación de los diferentes algoritmos de conformación, arrays geométricos y generación de mapas de intensidad sonora.

3. HARDWARE



Figura 5: Tipos de Arrays NGENE

Según el diseño y el número de MEMS se dispone de tres modelos:

- Array rectangular uniforme: array 2D con 4x4 micrófonos a 4cm de distancia entre ellos o 8x8 a 2 cm de distancia.
- Array Circular: el número de micrófonos puede alcanzar los 60 con un diámetro de la circunferencia que puede ir de 4cm a 50cm.
- Array Espiral: desplazamiento logarítmico de los micrófonos con un número que varía entre 20 y 60, y un diámetro que puede ir de 20 a 50 cm.

NORSONIC

1. Arquitectura
2. Software
3. Hardware

1. ARQUITECTURA

En este caso se trata de una arquitectura muy sencilla pues se realiza la conexión directa entre el array y el PC mediante un cable LAN. Todas las partes de procesamiento están integradas en la parte trasera del dispositivo:



Figura 6: Arquitectura completa de un sistema NORSONIC

2. SOFTWARE

El paquete de software viene incluido con la compra del dispositivo, permite las funciones de grabación, medición y post-procesamiento de las señales. Suministran también unos cascos de cancelación de ruido para una escucha optima en directo.

El video obtenido de la cámara óptica y la señal de todos los micrófonos es grabada en el disco duro del ordenador. El nombre del fichero se guarda con el día, la hora de la captura y una breve descripción.

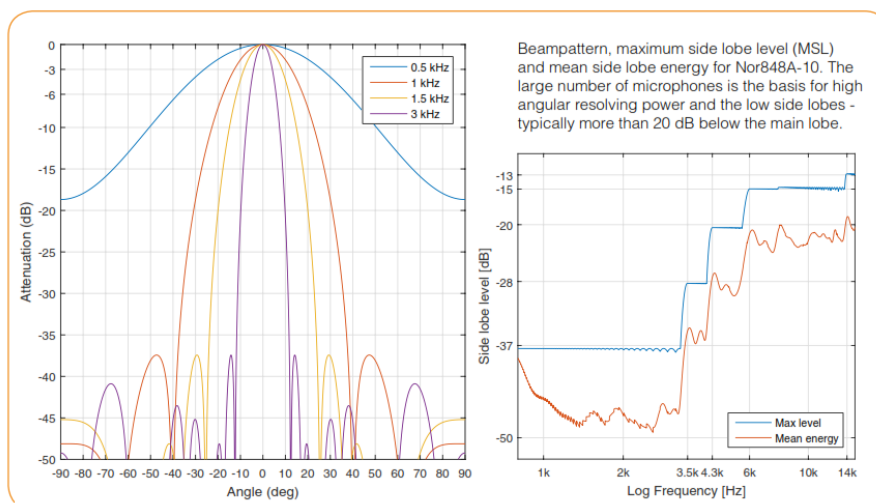


Figura 7: Patrón del Haz en función de la frecuencia

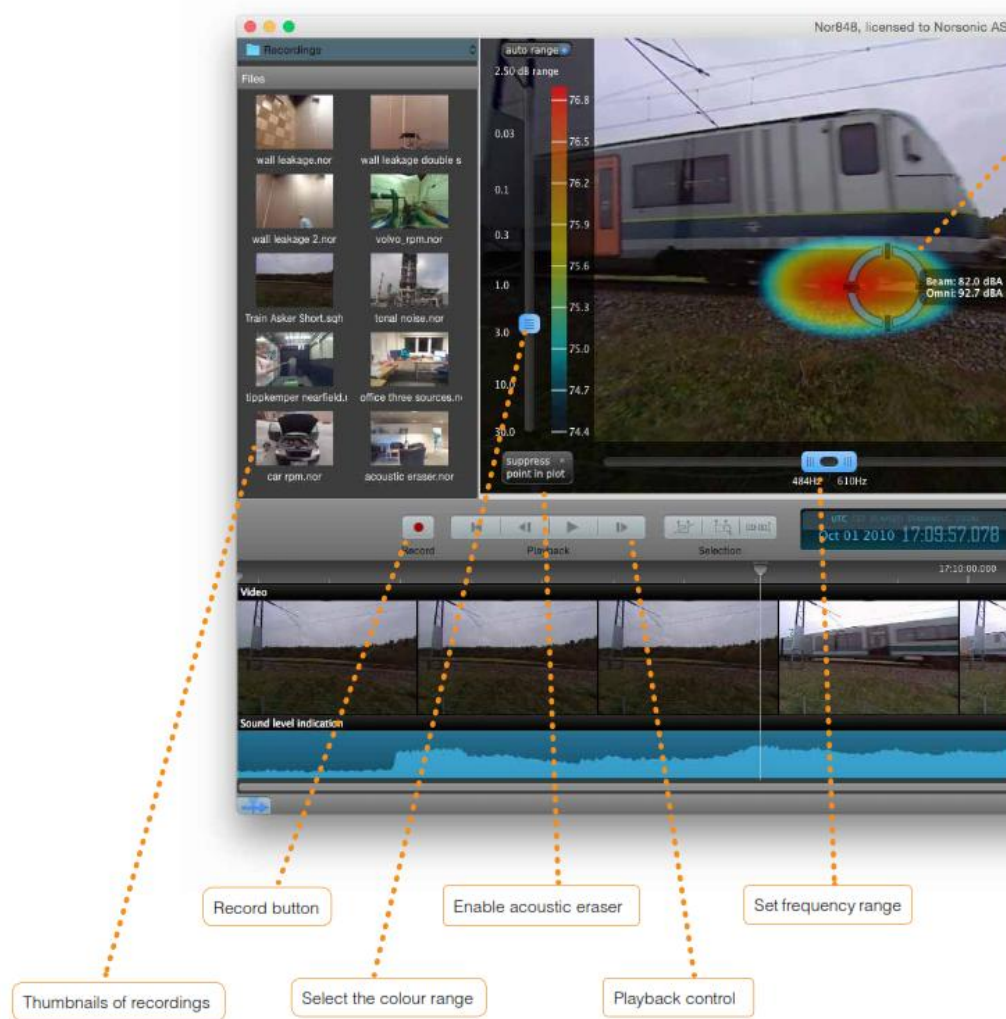


Figura 8: Interfaz del software empleado por NORSONIC

3. HARDWARE

Según el tamaño y el número de micrófonos existen tres modelos:

Acoustic Camera Nor848A	0.4 m array	1 m array	1.6 m array
Nº de micrófonos	128	256	384
Tipo	MEMS digitales		
Conversión AD	Delta-sigma de 4º Orden		
Resolución	16 bits/muestra		
Rango de frecuencia de los MEMS	20 Hz - 20 KHz		
Tasa de muestreo	44.1 KHz		
Análisis del espectro	Octava, 1/3 de octava o FFT		
Mapeo de frecuencias	316 Hz - 15 KHz	125 Hz - 15 KHz	80 Hz - 15 KHz
Auto Ruido, Ponderación - A	12 dBA	9 dBA	7 dBA

Distancia recomendada		0.5 m - 200 m	
Tramas por segundo (cámara)	15 FPS		
Ángulo Acústico/Óptico	± 48.5º Horizontal ± 35º Vertical		
Peso	2.4 Kg	11 Kg	16 Kg
Diámetro del disco	43 cm x 4.5 cm	103 cm x 4.5 cm	164 cm x 4.5 cm



Figura 9: Cámaras acústicas NORSONIC

ACOUSTIC CAMERA

1. Arquitectura
2. Software
3. Hardware

1. ARQUITECTURA



Figura 10: Arquitectura de Acoustic Camera

Las cámaras acústicas que se van a describir en el apartado del Hardware emplean el dispositivo DAQ data recorder (mcdRec), cuyas características son las siguientes:

- Bajo ruido
- Hasta 144 canales de micrófono diferenciales
- Alta tasa de muestreo 48 a 192 kS/s para los canales analógicos
- 12 canales de entrada digitales (tasa de muestreo hasta 6144 KS/s)
- Sistema de interfaz actualizable
- Ethernet-CPU
- 9 ranuras cPCI
- Transferencia de datos externos GBit LAN
- Tamaño: 41,7 cm ancho x 19,6 cm alto

Además se dispone de tarjetas de medida para completar las necesidades de beamforming. Las tarjetas de medición analógicas y digitales ofrecen una alta precisión de grabación de señales. Existen cuatro modelos:

ADC114, ADC102A10B, DDC_102RC, ICDC101

Para más información consultar el link:

<http://www.acoustic-camera.com/en/products/data-acquisition/extension-cards-for-mcdrec.html>

2. SOFTWARE

El software empleado se llama Noiselmag, con el cual, almacenamos datos, imágenes acústicas y video. Este programa posee una interfaz de matlab, una interfaz de grabadora, análisis espectral, visualizar fotos acústicas en 2D y 3D, visualizar videos acústicos, métodos de algoritmos avanzados, análisis para la calidad de sonido y más funciones. Entre los métodos de

algoritmos avanzados encontramos: Zero Padding, eliminar autocorrelación, RMS & Pico Máximo, acoustic eraser (permite eliminar o aislar fuentes de sonido), HDR (mejor contraste/resolución de la fuente mediante la supresión de los lóbulos laterales), Beamforming ortogonal.

3. HARDWARE

Modelos de cámaras acústicas:

Todos los modelos vienen con cámara de video incorporada (USB o Ethernet, diferentes tasas de tramas y resoluciones disponibles) y el rango dinámico de sus micrófonos abarca de los 28 a los 130 dB.

Estructura	Modelo	Diámetro	Peso	Nº de Micrófonos	Respuesta en frecuencia	Distancia de medida recomendada	Mapeo de frecuencias recomendado
Anillo	Ring 32-35 AC Pro	35 cm	1.2 Kg	32	100 Hz - 20KHz	0.3 - 5 m	800 Hz - 20 KHz
Anillo	Ring 48-75 AC Pro	75 cm	1.8 Kg	48	20 Hz - 20KHz	0.5 - 5 m	400 Hz - 20 KHz
Anillo	Ring 72-120 AC Pro	120 cm	4 Kg	72	20 Hz - 20KHz	1.5 - 20 m	200 Hz - 20 KHz
Esférica	Sphere 48-35 AC Pro	35 cm	0.9 Kg	47	20 Hz - 20KHz	0.3 - 5 m	400 Hz - 20 KHz
Esférica	Sphere 160-60 AC Pro	60 cm	2.1 Kg	120	20 Hz - 20KHz	0.5 - 25 m	300 Hz - 10 KHz
	Fibonacci 120 AC Pro	95 x 95 cm	10 Kg	120	20 Hz - 20KHz	*	*
Rectangular	Paddle 2x52 AC Pro	70,5 cm x 34,55 cm x 18,6 cm	1.6 Kg	104	20 Hz - 20KHz	9 cm	Diseñada para la medida a bajas frecuencias
Rectangular	Paddle 2x24 AC Pro	30 cm x 33cm	0.9 Kg	48	20 Hz - 20KHz	0.1 m - 0.15 m	Diseñada para la medida a bajas frecuencias
*	Custom Array	Depende del diseño	*	120	10 Hz - 20 KHz	Depende del diseño	100 Hz - 20KHz

* Fibonacci 120 AC Pro:

Este array puede emplearse tanto para beamforming como para aplicaciones holográficas (HELS y SONAH).

- Holography SONAH:
 - Distancia de medida recomendada: 10-20 cm
 - Mapeo de frecuencias recomendado 40Hz - 2KHz
- Holography HELS
 - Distancia de medida recomendada: 0-10 cm

- Mapeo de frecuencias recomendado 30 Hz - 400 Hz
- Beamforming
 - Distancia de medida recomendada: 80 cm- 10 m
 - Mapeo de frecuencias recomendado 300 Hz - 25 KHz

* Custom Array:

Este array de micrófonos es personalizable y puede tener diferentes configuraciones en un marco de aleación. El array de micrófonos recomendado para aplicaciones de "túnel de viento" incluye configuraciones en rueda o en espiral que se diferencian por sus características de resolución mapa dinámico:

- Espiral logarítmica del array de micrófonos: compromiso moderado entre la resolución espacial y el mapa dinámico para todas la frecuencias
- Rueda logarítmica del array de micrófonos (out<in): centrado para las bajas frecuencias
- Rueda logarítmica del array de micrófonos (in>out): centrado en las altas frecuencias y en mejorar los patrones de los lóbulos secundarios.



Ring 32-35



Ring 48-75



Ring 72-120



Sphere 48-35



Sphere 160-60



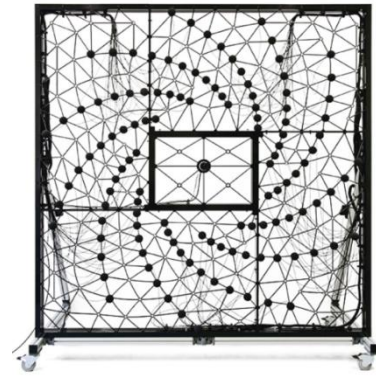
Fibonacci 120



Paddle 2x52



Paddle 2x24



Custom Array

Figura 11: Tipos de array de Acoustic Camera

MICROFLOWN

1. Arquitectura
2. Software
3. Hardware

1. ARQUITECTURA



Figura 12: Arquitectura MicroflowN

HEIM SYSTEMS - DIC24

Proporciona la interfaz para las diferentes señales medidas. Cada canal es completamente independiente y consiste en un sensor, su amplificación, conversión A/D, filtro antialiasing y un filtro opcional paso bajo o paso alto. El módulo digital, analógico y la alimentación son aislados galvánicamente para evitar el ruido introducido por las diferencias de potencial. Este módulo se conecta directamente al PC mediante una interfaz USB.

Nº de Canales	24
Frecuencia de muestreo	Hasta 50 KHz
Ancho de banda	20 KHz
Conversor A/D	24 bits
Resolución de datos	16 bits (DATaRec 3 Mode) 32 bits (DATaRec 4 Mode)
Impedancia de entrada	1 MΩ
Nivel de señal	±10 mVpp hasta ±10 Vpp
Peso	1100g
Dimensiones	48.1 x 184 x 124.5mm (w x h x d)



Figura 13: HEIM SYSTEMS-DIC24

HEIM SYSTEMS - PWAC

Se trata de un módulo de alimentación que puede soportar hasta 50 W. En cada cadena debe estar integrado al menos un módulo de alimentación, ya que el módulo de enlace no pasa la tensión de alimentación a sus otros conectores de enlace. Si una combinación de módulos de señal y módulos de enlace solicita un mayor consumo de energía, se requerirán más de un módulo de alimentación. Estos módulos se integran para evitar caídas de tensión típicas en instalaciones más grandes.



Figura 14: HEIM SYSTEMS-PWAC

HEIM SYSTEMS -LMFX

Si el sistema tiene más de un módulo de señal se necesita emplear un módulo de enlace. Este módulo es el procesador central y soporta un conjunto de subsistemas. Un subsistema consiste en un máximo de 8 módulos de señal. Los datos adquiridos de los módulos de señal puede ser transferidos vía IEEE 1394b, Gigabit Ethernet y USB 2.0 para su análisis en el PC. Además controla la calibración, el alineamiento de fase y el testeo del sistema si se requiere una nueva configuración.



Figura 15: HEIM SYSTEMS-LMFX

2. SOFTWARE

El software de cámaras acústicas está desarrollado para aplicaciones de arrays con múltiples sondas. Esta solución de múltiples sondas, llamada campo acústico cercano, hace posible medir condiciones no estacionarias y localizar picos de ruido, zumbidos y chirridos. El campo acústico cercano cubre frecuencias desde 20 Hz a 10 KHz . Este sistema te permite medir y visualizar la distribución de:

- Velocidad de la partícula
- Presión sonora
- Intensidad sonora
- Potencia sonora

Este software permite procesar los datos empleando dos técnicas de visualización del campo sonoro:

- Near field acoustic holography (NAH)
- Direct sound visualization (DSV)

DIRECT SOUND VISUALIZATION

Este método se basa en la medida directa de la presión sonora y la velocidad de la partícula en el campo acústico cercano. Este método no tiene limitaciones en frecuencia, siendo utilizable todo el ancho de banda disponible (20Hz- 10KHz)

NEAR-FIELD ACOUSTIC HOLOGRAPHY

Este método aplica un modelo de la propagación de la fuente para estimular su respuesta a una determinada distancia definida por el usuario. Esta distancia puede ser diferente del plano donde se tomaron las medidas reales. Además, el NAH proporciona una resolución espacial mucho mayor mientras se trabaja con la misma cantidad de transductores en comparación con el método directo y la posibilidad de pérdida de información debido al aliasing espacial se reduce en gran medida. Permite obtener una visión más clara de la relación entre la emisión de ruido y los estados de funcionamiento específicos de los objetos bajo prueba.

3. HARDWARE

Microflown ofrece varios modelos de micrófonos con los que posteriormente construye los arrays:

PU REGULAR: se trata de un micrófono de media pulgada que combina dos sensores, un micrófono tradicional y un microflown. En primer lugar miden la presión sonora y la velocidad de la partícula acústica. Cualquier campo es descrito por dos propiedades acústicas complementarias, el valor escalar de la presión sonora y el valor del vector de la velocidad de la partícula. A la hora de medir el campo acústico cercano, la propiedad que predomina el valor del vector de velocidad de la partícula. Además de medir la potencia sonora, picos de sonido, absorción acústica. El PU regular incluye un acondicionador de la señal con dos canales (MFPA-2). Este dispositivo se encarga de dos cosas: de alimentar el micrófono y de amplificar la señal recibida.

PU MINI: micrófono muy similar al anterior, media pulgada y combinación de dos micrófonos. Este tipo de micrófono se usa en arrays como el scattered array para el análisis de contribución de ruido, también determina la intensidad sonora, la potencia de sonido, la absorción acústica. Estos sensores no necesitan crear condiciones anecoicas y pueden ser usados dentro de cavidades cerradas. El PU mini incluye un acondicionador de la señal con dos canales (MFPA-2).

PU MATCH: este micrófono se emplea cuando el tamaño importa. Las propiedades como la intensidad del sonido, la potencia de sonido, la absorción acústica pueden medirse con una alta resolución espacial en objetos pequeños como teléfonos móviles. El PU mini incluye un acondicionador de la señal con dos canales (MFPA-2).

USP REGULAR: (Ultimate Sound Probe) este dispositivo tridimensional consiste en tres sensores de velocidad acústica microflown colocados ortogonalmente y un sensor de presión sonora. Este dispositivo se emplea como sensor de vector acústico (AVS) con enfoque en aplicaciones en el control de fronteras, protección de puertos o localización de armas de fuego. Como técnica de medición de campo lejano da un vector como resultado del punto de medición donde está ubicada la fuente dando información de su elevación y dirección. El USP regular incluye un acondicionador de la señal con cuatro canales (MFPA-4).

USP MINI: Básicamente es un dispositivo igual al descrito anteriormente, variando las propiedades del tamaño y poco más.

MICRÓFONO	DIÁMETRO	PESO	RANGO DEL MEDIDOR DE VELOCIDAD		RANGO DEL MEDIDOR DE PRESIÓN	
			Respuesta en frecuencia	Nivel Máximo PVL ref: 50nm/s	Respuesta en frecuencia	Nivel Máximo SPL ref: 20 e-5 Pa
PU REGULAR	0.5 (pulgadas)	38 g	0.1-10000 Hz	125	20-10000 Hz	110
PU MINI	0.5 (pulgadas)	18 g	0.1-10000 Hz	125	20-10000 Hz	110
PU MATCH	8.2 mm	5.5 g	0.1-10000 Hz	130	20-10000 Hz	131
USP REGULAR	0.5 (pulgadas)	45 g	0.1-10000 Hz	135	20-10000 Hz	110
USP MINI	0.5 (pulgadas)	13.4 g	0.1-10000 Hz	135	20-10000 Hz	110

Microflown ofrece varios modelos de array:

HANDHELD ARRAY: este array puede ser entregado con 12 PU mini array. La cámara acústica permite visualizar el sonido como una imagen acústica o un video, pudiendo analizar la presión sonora, la velocidad de partículas, la intensidad y la potencia sonora en tiempo real. Puede emplearse con Microflown Acoustic Camera Solution.

Sus dimensiones son 375 x 305 x 230 mm y tiene un peso de 0.9 Kg.



Figura 16: Handheld array

PU MATCH ARRAY: se usa en aplicaciones en las que la resolución espacial es lo más importante. Este array permite aprovechar las ventajas de los sensores de pequeño tamaño involucrados. Perfecto para medir objetos muy pequeños, puede emplearse con Microflown Acoustic Camera Solution. Emplea PU match probes (tipo de sondas).



Figura 17: PU Match array

ARRAY CONFIGURABLE: Permite la libre configuración, es decir, la posibilidad de colocar cualquier cantidad de micrófonos sobre la superficie a medir sin importar como de irregular sea el posicionamiento de los micrófonos. Sin embargo, la resolución espacial se verá afectada por el posicionamiento de estos.

Microflown puede diseñar y construir un array a medida para una aplicación particular.



Figura 18: Array configurable

SCATTERED ARRAY: se trata de un array muy similar al que se ha descrito anteriormente con la diferencia de que el sensor esta vez se adhiere a la superficie que se desea medir mediante pequeñas tiras de velcro. La superficie de montaje no afecta al rango de frecuencias que el sensor está midiendo.



Figura 19: Scattered array



Figura 20: Ejemplo de aplicación del scattered array

CAGE ARRAY: Este array puede emplearse con PU mini probes y USP mini probes. Una malla metálica especial cubre la sonda para su protección.

- PU mini probes: permite la medición de la intensidad del sonido. Las dimensiones y la densidad de la malla se pueden personalizar.
- USP mini probes: permite la medición del campo sonoro tridimensional proporcionando información de la directividad y fase que permite entre otras cosas la reconstrucción en azimut. Las dimensiones y densidad de la malla se pueden personalizar.



Figura 21: Cage array

BRÜEL & KJÆR

1. Arquitectura
2. Software
3. Hardware

1. ARQUITECTURA

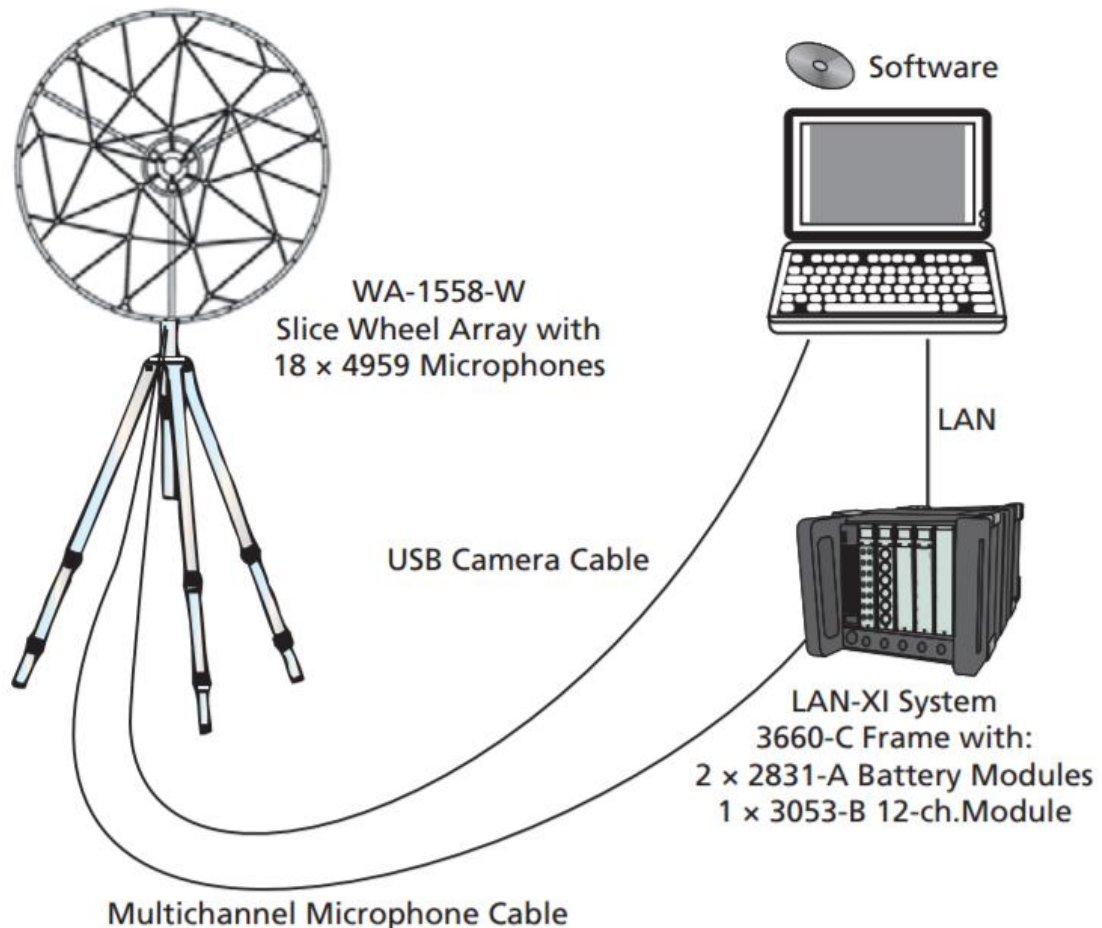


Figura 22: Arquitectura BRÜEL & KJÆR

2. SOFTWARE

ACOUSTIC BEAMFORMING SOFTWARE

- TYPE 7761 -> BASIS NOISE MAPPING ACQUISITION SOFTWARE
- TYPE 8607 -> ACOUSTIC HOLOGRAPHY SOFTWARE
- TYPE 8608 -> ACOUSTIC BEAMFORMING SOFTWARE
- TYPE 8606 -> SPHERICAL BEAMFORMING SOFTWARE

El tipo de medidas realizadas con un array pueden ser clasificadas como:

- Fijas: el array está fijo y no se mueve durante las mediciones.

- Parcheado: un array de rejilla se va moviendo de una posición a otra manualmente o mediante un robot.
- Escaneado: Se escanea uno solo, una fila o una cuadrícula completa de micrófonos sobre una fuente de ruido mediante un robot, ejemplo, se utiliza para mediciones en fuentes estacionarias de ruido como transformadores.

El cálculo y reporte de datos se realiza mediante los tipos 8606, 8607, 8608. En cada aplicación puedes elegir entre una serie de algoritmos para optimizar los cálculos:

- SONAH: Statistically Optimized Near-field Acoustic Holography (8607)
- ESM: Equivalent Source Method (tipo 8607)
- NNLS: Non-negative Least Squares (tipo 8608)

Para incrementar las posibilidades se puede añadir aún más opciones: transitoriedad, cuasi-estacionario, conformal o cálculos de las mediciones de la calidad del sonido. Existen opciones que son diseñadas específicamente para aplicaciones particulares.

Cálculos en el rango de frecuencia:

Los métodos de holografía acústica como SONAH y ESM requieren arrays con un espaciado medio entre ellos menor que la mitad de la longitud de onda empleada. Esta restricción marca el límite de la frecuencia máxima utilizable. Para cubrir el rango de frecuencias completo es necesario emplear dos métodos: para las frecuencias bajas y a una distancia cercana se emplea el SONAH y para altas frecuencias Beamforming. El método patentado "Holografía de Ancho de Banda" puede combinar ambos métodos en una única medida a una distancia intermedia.

Near-field Acoustic Holography:

Este método construye un modelo matemático describiendo el campo sonoro basado en un conjunto de medidas de presión sonora tomadas en un plano cercano a la fuente. El modelo puede también emplearse para calcular la respuesta en campo lejano, estimando la distribución de la presión sonora basándose en la ecuación integral de Helmholtz. Se dispone de dos algoritmos: SONAH y ESM.

El algoritmo SONAH supera las limitaciones de los métodos de cálculo NAH:

- El área de medida puede cubrir las fuentes de ruido más un área adicional para evitar los efectos de la ventana espacial.
- Las medidas con un array deben ser con un rectángulo regular para soportar los cálculos mediante una FFT espacial.

SONAH puede operar con arrays irregulares y permitir medidas con arrays más pequeños que la fuente sin efectos de enventanado espacial severos.

El algoritmo ESM se emplea para superficies muy curvadas.

Realización

- Resolución: definido como la distancia mínima en la cual dos fuentes pueden estar separadas. $R \approx \min(L, \lambda/2)$ donde L es la distancia del array a la fuente.
- Rango frecuencial determinado por:
 - $f_{\max} = c/2dx$
 - $f_{\min} = c/8D$
 - donde c es la velocidad del sonido, dx es el espaciado medio entre los puntos de medida y D es el diámetro del array.

El uso del método NAH se emplea típicamente entre 50 y 3000 Hz.

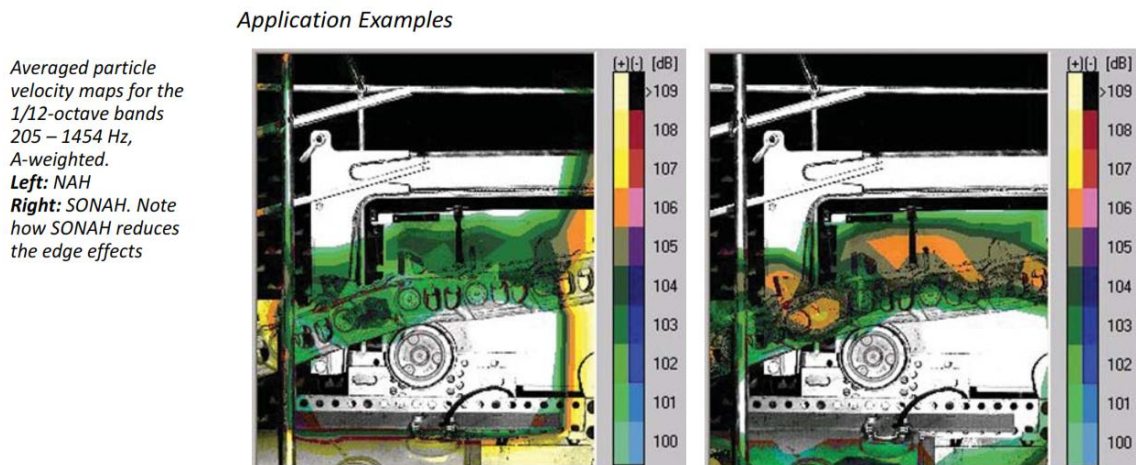


Figura 23: Ejemplo de aplicación del NAH

Beamforming Plano:

Se trata de un método para mapear fuentes de ruido a diferentes niveles sonoros basados en la dirección en la que se originan. Es un método muy rápido, permitiendo un mapeo completo para ser calculado en una simple y breve medida. Permite trabajar a altas frecuencias.

Medición y Análisis

El campo sonoro radiado es medido mediante un array de micrófonos posicionados a cierta distancia del objeto. Introduciendo un retardo específico para cada micrófono y sumando los resultado es posible crear una antena acústica equivalente a un reflector parabólico con un lóbulo principal de alta sensibilidad a lo largo de un ángulo de incidencia. Repitiendo este proceso de cálculo para un conjunto de medidas a lo largo de un determinado número de ángulos, se puede generar un mapa completo de la contribución de la presión sonora. Con beamforming, los resultados se pueden calcular dentro de un ángulo de hasta 30° del eje central.

Diseño del array

El rango dinámico (también conocido como el nivel máximo del lóbulo secundario) está típicamente entre los 8 y 15 dB dependiendo del diseño del array. Por lo general los arrays irregulares superan a los tradicionales diseños de arrays regulares, pero incluso los arrays

irregulares con el mismo número de micrófonos tienen resultados muy diferentes dependiendo de la posición exacta de los micrófonos. Brüel usa un método de optimización numérico patentado para diseñar arrays con un desarrollo óptimo para el rango de frecuencias y el número de micrófonos empleado.

Realización

- Resolución: $R \approx L/D \cdot \lambda$ donde L es la distancia del array a la fuente, D es el tamaño del array y λ la longitud de onda.

El uso del algoritmo Delay and Sum está limitado a bajas frecuencias por la resolución. El Beamforming puede ser usado entre los 500 Hz y los 20 KHz. Sin embargo, la resolución espacial puede mejorarse usando los métodos NNLS y CLEAN-SC.

Application Example

*Beamforming result
on a car engine*

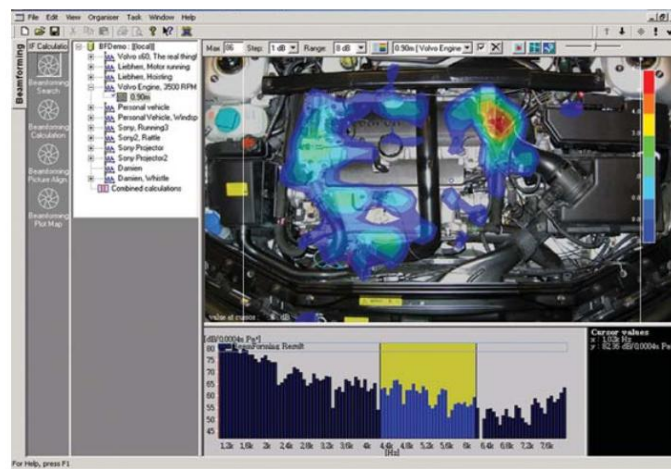


Figura 24: Ejemplo de aplicación del beamforming plano

Maapeo Conformal:

Se puede crear un mapa conformal completo basándose en un conjunto de medidas de parche conociendo las posiciones y la geometría del objeto. La geometría del objeto se puede importar desde varios formatos estándar o utilizando el sistema de detección de posición integrado en el array portable.

Geometría del objeto

Reemplazando el array de micrófonos por un puntero, el sistema de posicionamiento en el array puede registrar las coordenadas 3D de los puntos más significantes de la geometría del objeto. Alternativamente, la geometría del objeto puede se importada de un modelo CAD o CAE existente.

Medidas y Análisis

Las medidas se hacen de las partes más accesibles del objeto, típicamente de 36 a 128 puntos de medida simultáneos. Habitualmente el número de puntos de medida debe corresponder a la frecuencia máxima.

Este método permite mapeos precisos de objetos irregulares, una alta resolución incluso a bajas frecuencias, el array no necesita un soporte estructural complicado.

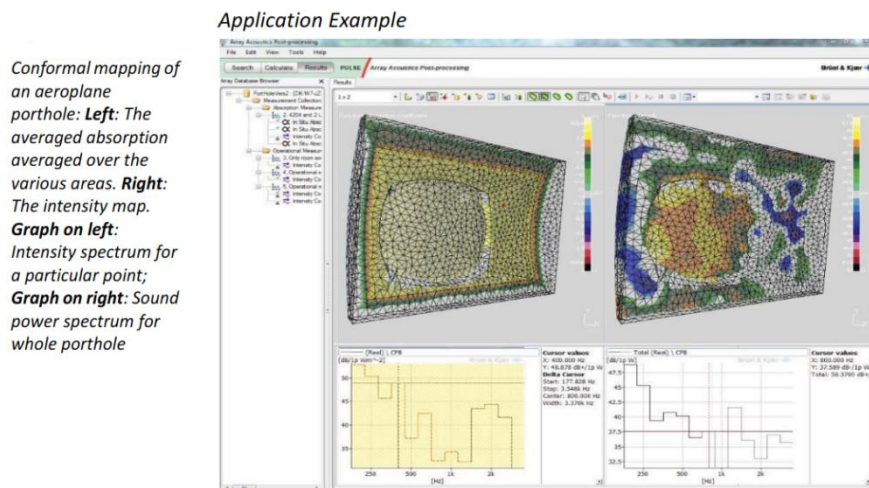


Figura 25: Ejemplo de aplicación del mapeo conformal

Beamforming Esférico:

Este método ofrece dos algoritmos de cálculo: Spherical Harmonics Angularly Represented Pressure (SHARP) y Filter and Sum (FAS). Ambas proporcionan un mapa de ruido omnidireccional completo en cualquier ambiente acústico en una simple medida. Emplea un array esférico para capturar el ruido en todas direcciones mientras 12 cámaras montadas en el array van tomando imágenes.

Medidas y Cálculos:

El cálculo SHARP descompone el campo sonoro observado en sus componentes armónicos y luego estima las contribuciones direccionales recombinaando estos armónicos.

El cálculo FAS toma las salidas de cada micrófono y aplica un filtro de respuesta al impulso finita (FIR) el cual es optimizado para cada ángulo de incidencia para minimizar el efecto de los lóbulos secundarios. Los resultados son sumados para producir el mapa acústico.

Realización:

La resolución angular de los algoritmos SHARP Y FAS es aproximadamente la misma. Sin embargo, FAS proporciona una mejora considerable en MSL. El nivel MSL, decrece con la frecuencia.

Con SHARP, para un array de 50 canales, el MSL es mejor que 6 dB hasta los 8 KHz y para un array de 36 canales, mejor de 6 dB hasta los 5 KHz. Con FAS la mejora es notable pues es mejor de 6 dB hasta los 12 KHz para 50 canales y mejor de 7 dB hasta los 6.4 KHz para 36 canales.

El rango de frecuencias para el beamforming esférico abarca de los 250 Hz hasta los 12 KHz. Para una información más detallada, particularmente a bajas frecuencias, se suele combinar con la holografía conformal acústica.

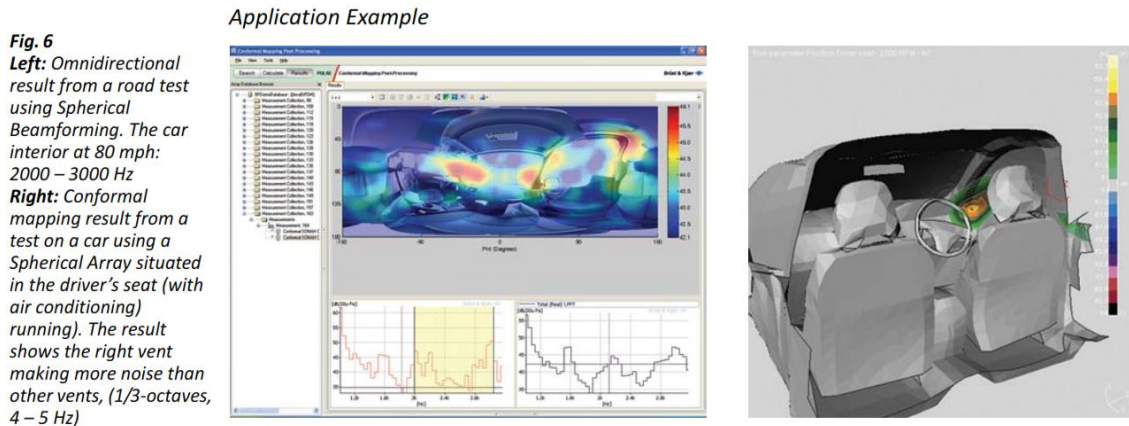


Figura 26: Ejemplo de aplicación del beamforming esférico

TYPE 7761 BASIS NOISE MAPPING ACQUISITION SOFTWARE

USOS

- Presión sonora y mapeo de intensidad sonora
- Adquisición de datos acústicos para aplicaciones de holografía acústica, Beamforming, Beamforming esférico para sonidos estacionarios y transitorios.
- Determinación de la potencia sonora

CARACTERÍSTICAS

- Secuencia de medidas automáticas
- Generador de geometrías fácil de usar
- Almacenamiento de datos automático
- Garantiza la adquisición eficiente y fiable de sistemas complejos
- Opción de robot para pruebas
- Sistema de adquisición de datos controlado por geometría para micrófonos múltiples o sondas de intensidad
- Este software se puede completar con los tipos 8606, 8607, 8608 que se describen a continuación

TYPE 8606/8607/8608

Beamforming esférico tipo 8606: proporciona un mapa del campo acústico en 360°.

Holografía acústica tipo 8607: un método para describir matemáticamente el campo sonoro basado en un conjunto de medidas.

Beamforming tipo 8608: un método de mapeo de fuentes sonoras diferenciando los niveles sonoros basados en la dirección en la que se originan.

	ACOUSTIC HOLOGRAPHY TYPE 8607	BEAMFORMING TYPE 8608	ACOUSTIC BEAMFORMING TYPE 8606
MEDICIONES			
PROCESO	SIMPLE, PARCHEADO, ESCANEADO	SIMPLE	SIMPLE
IMAGEN ÓPTICA	N/A	TOMAR O REUTILIZAR	TOMAR O REUTILIZAR
PROCESAMIENTO AUTOMÁTICO	ALMACENA Y CALCULA AUTOMÁTICAMENTE, CÁLCULO SELECCIONABLE	ALMACENA Y CALCULA AUTOMÁTICAMENTE, CALCULO SELECCIONABLE	ALMACENA Y CALCULA AUTOMÁTICAMENTE, CÁLCULO SELECCIONABLE
GESTIÓN DE DATOS			
BASES DE DATOS	MULTIPLES SIMULTÁNEAS		
INSPECCIONAR METADATOS	SI		
BUSQUEDA EN METADATOS	SI		
CAMBIAR METADATOS	SI		
CÁLCULO			
SOPORTE MULTI-NÚCLEOS	SI		
TIPO DE ESTRUCTURA DESTINO	PLANAR, CONFORMAL	PLANAR, CONFORMAL	ESFÉRICA, CONFORMAL
REFERENCIAS	FÍSICA Y VIRTUAL	FÍSICA	FÍSICA
MÉTODOS	NAH, SONAH, ESM	Delay and Sum, NNLS,CLEAN-SC	SHARP, FAS, CLEAN-SC
FILTRADO	FRECUENCIA, ORDEN	FRECUENCIA, ORDEN	FRECUENCIA, ORDEN
DOMINIO	ESTACIONARIO, CUASI-ESTACIONARIO, TRANSITORIO		
FUNCIONES	PRESIÓN, INTENSIDAD, INTENSIDAD REACTIVA, VELOCIDAD DE PARTÍCULA, INTENSIDAD DE FUENTE FRONTAL Y TRASERA, INTENSIDAD RADIADA, COEFICIENTE DE ABSORCIÓN	CONTRIBUCIÓN A LA PRESIÓN, PRESIÓN, INTENSIDAD	CONTRIBUCIÓN A LA PRESIÓN, PRESIÓN, INTENSIDAD
CAPACIDAD			
CÁLCULOS	ESTACIONARIO: igual que el tipo 8608 MEDIDAS ESCANEADAS CON ROBOT: <ul style="list-style-type: none">5000 puntos de medida con SONAH10000 puntos de medida con NAH Y 400 líneas FFT	ESTACIONARIOS: <ul style="list-style-type: none">300 s a 12.8 KHz60 puntos de medida8000 puntos objetivo800 líneas FFT	ESTACIONARIO: <ul style="list-style-type: none">300 s a 6.4 KHz800 líneas FFT2592 puntos objetivo (espaciados 5º en azimut y elevación)
CÁLCULO	TRANSITORIOS: <ul style="list-style-type: none">La máxima longitud de la señal para cálculos transitorios es 1/15 del máximo de longitud de la señal medida en la frecuencia de muestreo elegida60 puntos de medida400 puntos objetivo300 tramas800 líneas FFT	TRANSITORIOS: <ul style="list-style-type: none">La máxima longitud de la señal para cálculos transitorios es 1/4 del máximo de longitud de la señal medida en la frecuencia de muestreo elegida60 puntos de medida400 puntos objetivo300 tramas800 líneas FFT	TRANSITORIOS: <ul style="list-style-type: none">La máxima longitud de la señal para cálculos transitorios es 1/15 del máximo de longitud de la señal medida en la frecuencia de muestreo elegida60 puntos de medida400 puntos objetivo300 tramas800 líneas FFT

3. HARDWARE

ARRAY	APLICACIONES	MÉTODO	Nº DE CANALES	TAMAÑO	MÁXIMA FRECUENCIA	ACCESORIOS
SPHERICAL ARRAY	INTERIOR DE VEHÍCULOS Y AERONAVES, EDIFICIOS Y PLANTAS INDUSTRIALES	BEAMFORMING ESFÉRICO	36 o 50	DIÁMETRO 20 cm	12 KHz	TRÍPODE WQ-2691
WHEEL ARRAY (cámara incluida)	APLICACIONES DE PROPÓSITO GENERAL	BEAMFORMING	≥42	DIÁMETRO DE 0.65 m a 4 m	20 KHz	TRÍPODE WQ-2691
HALF-WHEEL ARRAY	FUENTES SONORAS EN MOVIMIENTO	BEAMFORMING	≥42	DIÁMETRO DE 1.5 m a 4 m	10 KHz	WA-0893
GRID ARRAY	APLICACIONES DE PROPÓSITO GENERAL, FUENTES DE SONIDO	HOLOGRAFÍA ACÚSTICA Y CÁLCULO DE	≥6	0.125 m x 0.125 m	6 KHz	SOPORTE WA-0810 o SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

	ESTACIONARIAS	TRANSITORIOS				DE ARRAY
SLICED WHEEL ARRAY	PROPÓSITO GENERAL, MÁQUINAS, COMPONENTES E INTERIORES EN AUTOMÓVILES	BEAMFORMING Y HOLOGRAFÍA ACÚSTICA	18, 36, 60 Y 84	DIÁMETRO DE 0.35 m a 2 m	Beamforming 36-ch.: 6.0 kHz; 60-ch.: 8.0 kHz Acoustic Holography 36-ch.: 1.5 kHz; 60-ch.: 1.2 kHz	TRÍPODE WQ-2691
HAND-HELD ARRAY (capa simple o doble)	COMPONENTES E INTERIORES	HOLOGRAFÍA EN TIEMPO REAL, MAPEO, CÁLCULOS DE CONFORMACIÓN	MIN 6 X 6 X 1 MAX 8 X 8 X 2	ESPACIADO ENTRE SENSORES 25/30/35/40/50 mm	6 KHz	SISTEMA DE POSICIONAMIENTO DEL SENSOR, CREADOR ÓPTICO 3D WU-0695-W-001
2D ROBOT	RUIDOS GRANDES Y ESTACIONARIOS COMO MOTORES DE VEHÍCULOS	HOLOGRAFÍA ACÚSTICA	2 A 96	1 m x 1 m HASTA 10 m x 3 m	12 KHz	CONEXIÓN INTEGRAL: WA-0806 CONEXIÓN FLEXIBLE: WA-0807 ROBOT CONTROLADOR: WB-1477
PENTANGULAR ARRAY	FUENTES DE RUIDO EXTERNAS, TURBINAS DE AIRE, FACTORÍAS	BEAMFORMING	30	DIÁMETRO 3.5 m	5 KHz	TRÍPODE WQ-2691



Figura 27: Tipos de array BRÜEL & KJÆR

TABLA COMPARATIVA DE ARRAYS

ARRAY	Nº de micrófonos	Mapeo de frecuencias	Distancia de Medición	Peso	Tamaño del Array	Tipo de micrófonos
SeeSV-S205	30	350 Hz - 12 KHz	0.2 - 5 m	2.5 Kg	Diámetro 35 cm	Micrófonos digitales MEMS
SeeSV-S205	30	0.8 KHz - 5 KHz	0.5 - 10 m	6 Kg	Diámetro 85 cm	Micrófonos de Condensador 1/4"
Array rectangular uniforme	16	-----	-----	-----	13 cm x 13 cm	MEMS
	64					
Array circular	Hasta 60 micrófonos	-----	-----	-----	Diámetro de 4 cm hasta 50 cm	MEMS
Array Espiral	Entre 20 y 60	-----	-----	-----	Diámetro de 20 cm hasta 50 cm	MEMS
Acoustic Camera Nor848A	256	125 Hz - 15 KHz	0.5 - 200 m	11 Kg	Diámetro 1 m	Micrófonos digitales MEMS
Ring 32-35 AC Pro	32	800 Hz - 20 KHz	0.3 - 5 m	1.2 Kg	Diámetro 35 cm	Micrófonos de Condensador
Ring 48-75 AC Pro	48	400 Hz - 20 KHz	0.5 - 5 m	1.8 Kg	Diámetro 75 cm	Micrófonos de Condensador
Ring 72-120 AC Pro	72	200 Hz - 20 KHz	1.5 - 20 m	4 Kg	Diámetro 120 cm	Micrófonos de Condensador
Sphere 48-35 AC Pro	47	400 Hz - 20 KHz	0.3 - 5 m	0.9 Kg	35 cm	Micrófonos de Condensador
Sphere 160-60 AC Pro	120	300 Hz - 10 KHz	0.5 - 25 m	2.1 Kg	60 cm	Micrófonos de Condensador
Fibonacci 120 AC Pro	120	*	*	10 Kg	95 x 95 cm	Micrófonos de Condensador
Paddle 2x52 AC Pro	104	Diseñada para la medida a bajas frecuencias	9 cm	1.6 Kg	70,5 cm x 34,55 cm x 18,6 cm	Micrófonos de Condensador
Paddle 2x24 AC Pro	48	Diseñada para la medida a bajas frecuencias	0.1 - 0.15 m	0.9 Kg	30 cm x 33cm	Micrófonos de Condensador
Custom Array	120	100 Hz - 20KHz	Depende del diseño	*	Depende del diseño	Micrófonos de Condensador

4. BANDAS DE FRECUENCIA: LOS ULTRASONIDOS

Las ondas sonoras son ondas longitudinales que se propagan en un medio elástico generando una variación de presión o densidad que pueden ser detectadas por el oído humano. Para que dicha variación pueda ser detectada por el oído humano estas ondas deben estar comprendidas en un rango de frecuencias que abarca de los 20 Hz a los 20000 Hz dependiendo del rango de audición de cada persona.

El sistema previo en el que se apoya este proyecto emplea frecuencias dentro de la banda audible. Una onda acústica es la propagación de una vibración en un determinado material y el sonido es una onda acústica capaz de provocar una sensación auditiva, por lo tanto existen ondas acústicas que no son sonidos. Estos son los infrasonidos y los ultrasonidos.

En el año 1883, Galton investigó los límites de la audición humana, fijando la frecuencia máxima a la que puede oír una persona. Este límite no es exacto ya que depende de cada persona y se va reduciendo con la edad. Galton descubrió que estas frecuencias presentaban fenómenos de propagación muy similares al resto de las ondas sonoras, aunque con una absorción mucho mayor por parte del aire. Por otra parte, los hermanos Curie descubrieron la pizeoelectricidad en 1880 y en el siglo XIX, Lippman y Voigt experimentaron con el efecto pizeoeléctrico aplicable a la generación de frecuencias ultrasónicas. Pero ha sido en el siglo XX cuando se han producido los grandes avances en el estudio de los ultrasonidos, especialmente en lo relacionado con las aplicaciones: acústica, subacústica, medicina e industria [2].

Algunos ejemplos serían: las aplicaciones de guiado y sondeo en el fondo del mar, navegación de submarinos, detección de bancos de pescado, etc. En el ámbito de la medicina uno de sus usos más comunes se da en la ecografía para obtener imágenes en el interior del cuerpo humano. Los ultrasonidos también poseen propiedades terapéuticas. Científicos británicos sugieren que la energía de estas ondas se pueda usar para que aumente la cantidad de medicamento que puede entrar en las células. En el campo de la química, se ha creado una nueva rama de estudio, la sonoquímica, que trata de emplear los ultrasonidos para activar ciertos compuestos con el fin de acelerar las reacciones químicas en los procesos de fabricación de materiales organometálicos. En el campo de la industria una de sus aplicaciones más destacada es su empleo como soldador de plásticos con ventajas importantes: no requiere calentamiento, es rápido y no contamina y la unión es, en general, mejor que con otros métodos [3].

Para el desarrollo de las pruebas de este trabajo se van a emplear tonos que se encuentran en una banda de frecuencias conocida como los ultrasonidos. Los ultrasonidos son ondas mecánicas, no ionizantes, cuya frecuencia está por encima de la capacidad auditiva del ser humano (20 KHz). Algunas especies como ciertos insectos y mamíferos lo emplean de forma parecida a un radar para su orientación. Las frecuencias de las ondas emitidas por estos animales rebotan con facilidad en los objetos que se encuentran alrededor permitiendo crear una "imagen" que facilite su orientación.

La transmisión de estas ondas depende en gran medida, del medio. Cada medio tiene una impedancia distinta, lo que hace variar la velocidad de propagación entre otras variables. En

general, este tipo de ondas pueden considerarse como planas, con propagación rectilínea debido al pequeño valor de su longitud de onda. Un haz de ultrasonidos va perdiendo intensidad a medida que se propaga, a este efecto se le conoce como atenuación. La atenuación es directamente proporcional a la frecuencia del ultrasonido utilizado en el aire, por lo que se debe esperar una mayor pérdida de intensidad del haz con ultrasonidos de mayor frecuencia.

Debido al pequeño valor de su longitud de onda los ultrasonidos son ondas mucho más directivas que las ondas sonoras, es decir, representando esto en un diagrama de radiación, el ancho del lóbulo principal será más estrecho cuanto más grande sea la frecuencia de la onda y gracias a esto se puede obtener una resolución mayor en el sistema biométrico a la hora de caracterizar a una persona, no obstante, esto también genera inconvenientes que deben ser resueltos, como la aparición de lóbulos secundarios con una amplitud grande que puedan interferir a la hora de generar la imagen acústica [4].

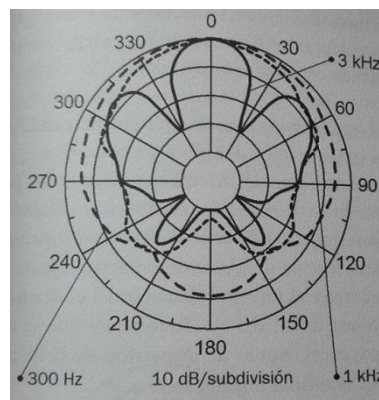


Figura 28: Curva polar de un altavoz

En la figura 1 se muestra la variación de la presión sonora en función de la frecuencia en un diagrama de radiación emitida por un altavoz. Se observa como a frecuencias bajas las ondas emitidas son omnidireccionales y a medida que aumenta la frecuencia estas tienden a presentar un lóbulo principal con mayor energía que los lóbulos secundarios debido al aumento de la direccionalidad de la onda. Se observa como a 1 KHz el nivel de sonido en un ángulo de 60° desde el eje horizontal es 8dB inferior al nivel del eje. A 3 KHz hay un mínimo a aproximadamente 30° donde el nivel cae aproximadamente 25 dB sobre el nivel del eje y puede verse claramente dos lóbulos secundarios en 45° y 315° cuyo nivel es aproximadamente 8 dB por debajo del nivel del eje.

5. LA PIEZOELECTRICIDAD

La piezoelectricidad es un fenómeno presentado por determinados cristales que, al ser sometidos a tensiones mecánicas, adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también puede producirse a la inversa, es decir, se deforma bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. Estos cristales recuperan su forma una vez el campo eléctrico ha desaparecido.

Los materiales piezoeléctricos son sustancias cristalinas naturales o sintéticas caracterizadas por no poseer un centro de simetría, al comprimir este tipo de materiales el efecto que se produce consiste en disociar los centros de gravedad de las cargas negativas y las positivas. Aparecen de este modo dipolos elementales en la masa y cargas de signo opuesto en las superficies enfrentadas. Existen 21 tipos de clases cristalinas que no tienen centro de simetría por lo que presentan en mayor o menor medida la propiedad de la piezoelectricidad [5]. Los cristales pueden ser monomórficos constituidos por un solo cristal o cerámica o bimórficos constituidos por dos placas cerámicas de comportamiento opuesto de modo que cuando una se dilata la otra se contrae.

El empleo de la piezoelectricidad en los altavoces, es un método innovador en el uso de la oscilación natural de los elementos cerámicos piezoeléctricos. En la actualidad, los altavoces piezoeléctricos se utilizan de muchas formas, timbres, alarmas, transmisores, receptores entre otros.

5.1 El altavoz piezoeléctrico

Dentro de los distintos tipos de altavoces existentes están los tweeters, altavoces diseñados para la reproducción de altas frecuencias, normalmente a partir de los 3 o 4 KHz. Y dentro de los tweeter vamos a destacar el altavoz piezoeléctrico. Este tipo de tweeter se basa en las propiedades de los materiales piezoeléctricos para generar ondas sonoras. Si se une a un cono abocinado, este sufrirá desplazamientos capaces de producir una presión oscilante dentro de un rango de frecuencias audibles.

Debido al alto valor de impedancia mecánica de estas sustancias minerales se restringe su uso a la banda de altas frecuencias, es decir, actúa como una carga capacitiva por lo que su impedancia disminuirá con el aumento de la frecuencia emitida. Estos altavoces son sencillos, baratos y capaces de radiar con muy poca potencia eléctrica.

Debido a estas características, han sido elegidos para realizar las pruebas con ultrasonidos que serán descritas más adelante.

La fuente que produce el sonido se denomina diafragma piezoeléctrico. Este consiste en una placa de cerámica piezoeléctrica que tiene electrodos en ambos lados y una placa de metal (acero inoxidable, latón, etc) como podemos observar en la siguiente figura:

Por último destacar la necesidad de un amplificador de audio para emitir sonido con una potencia adecuada. La mayoría de circuitos de audio están desarrollados para altavoces electrodinámicos, es decir, entregan grandes variaciones de corriente y están limitados en tensión. Los altavoces piezoeléctricos consumen poca corriente pero requieren mayores variaciones de tensión.

6. LOS SENSORES MEMS

Gracias al nivel de madurez alcanzado en microelectrónica, la investigación se ha centrado al "mundo pequeño" esta última década, es decir, a las nuevas micro y nano tecnologías. Debido al progreso paralelo de la electrónica y la mecánica ha surgido una nueva tecnología bajo el nombre de sistemas microelectromecánicos (MEMS MicroElectroMechanical Systems).

Los sistemas microelectromecánicos se refieren a la tecnología electromecánica, micrométrica y sus productos, y a escalas relativamente más pequeñas se fusionan en sistemas nanoelectromecánicos y nanotecnología. Gracias a los avances en el campo de los semiconductores se está dando a lugar a circuitos integrados con características tridimensionales e incluso con piezas móviles. La tecnología MEMS puede emplearse utilizando diferentes materiales y técnicas de fabricación, la elección dependerá del tipo de dispositivo que se está creando y el sector comercial en el que tiene que operar.

Los MEMS se pueden clasificar en distintos tipos:

- Sensores: químicos, de movimiento, inerciales, térmicos, ópticos, etc.
- Actuadores: dispositivos diseñados para proporcionar un estímulo a otros componentes o MEMS.
- MEMS RF: dispositivos empleados para transmitir señales de radiofrecuencia.
- MOEMS: dispositivos diseñados para dirigir, reflejar, filtrar y/o amplificar la luz.
- BIOMEMS: dispositivos diseñados para interactuar específicamente con muestras biológicas.

Estos pequeños dispositivos presentan numerosas ventajas entre las cuales están:

- Posibilidad de fabricación a bajo costo.
- Componentes más sensibles.
- Tamaño y peso reducidos.
- Menor consumo de energía.
- Alta precisión.
- Desarrollo de componentes electrónicos más rápido.
- Materiales con propiedades que les permiten ser más fuertes y ligeros.
- Nuevos dispositivo opto-electrónicos.

Esta tecnología se ha convertido en una de las más importantes en la actualidad y posee un potencial aparentemente ilimitado para habilitar desarrollos tecnológicos futuros. Durante las últimas décadas los investigadores y desarrolladores de MEMS han fabricado una gran cantidad de microsensores capaces de medir un gran número de magnitudes diferentes. Muchos de estos sensores han demostrado actuar mejor que sus homólogos a macroescala. En esta sociedad en que vivimos la tecnología MEMS se encuentra en prácticamente todos los dispositivos de uso en la vida cotidiana (móviles, tablets, juegos de consola, sistemas de navegación, libros electrónicos, etc) [6].

6.1 Sensores acústicos y de ultrasonido MEMS

Vamos a emplear este último tipo de micrófonos ya que simplifica y facilita el montaje del sistema ahorrando el tener que incorporar un conversor A/D externo. Las interfaces más comunes para transportar estas señales son I²S (Inter-IC Sound), TDM (Time Division Multiplexing) y PDM (Pulse Density Modulation).

En la modulación PDM, la más habitual en este tipo de micrófonos, la amplitud de la señal de audio se codifica en la densidad o número de impulsos en función del tiempo donde cada muestra ocupa un solo bit empleando una conversión A/D sigma-delta. En la siguiente imagen vemos un ejemplo de modulación PDM:



El principio de funcionamiento se basa en el sobremuestreo, que consiste en muestrear por encima de la frecuencia de Nyquist. Con este método se mejora la relación señal a ruido por lo que aumenta la resolución y el ruido se traslada fuera de la banda de Nyquist concentrándose la mayor parte en las frecuencias altas.



43

(bottom). El camino desde el orificio de entrada del sonido hasta el punto de ingreso a la membrana del micrófono conforma un circuito acústico que puede modificar la respuesta en frecuencia del micrófono, efecto conocido como resonador de Helmholtz.

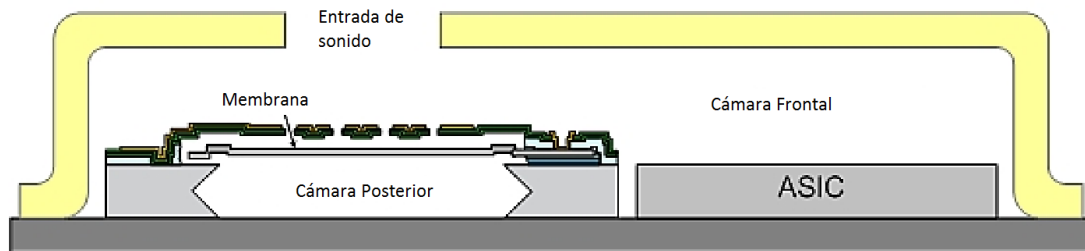


Figura 34: Sección Transversal de un MEMS Top tradicional

La mayoría de micrófonos MEMS tienen una respuesta de frecuencia plana en el rango de frecuencias audibles y un tamaño reducido, por lo que en general, la geometría de este camino acústico no va a afectar demasiado su respuesta. De $\lambda = c/f$ se obtiene que para 20 KHz la longitud de onda es de 17 mm, una longitud mucho mayor que las dimensiones de los MEMS. El pequeño volumen de aire en la cámara posterior provoca dificultades de movimiento a la membrana, lo cual afecta a la sensibilidad del sensor a altas y bajas frecuencias y a la SNR (Signal to Noise Ratio).

Para mejorar la sensibilidad y la SNR de los MEMS se modifica la estructura, el sensor capacitivo que recibe el sonido se coloca directamente sobre la entrada de sonido. En los micrófonos tipo bottom y en los top de alto rendimiento, como el MP34DT01, se produce el efecto de un resonador de Helmholtz en la cámara posterior y, aunque en algunas aplicaciones este efecto puede resultar útil, por lo general se buscará evitarlo [7]. Un resonador de Helmholtz consiste en una cavidad que resuena a una determinada frecuencia, si la señal que llega a la cavidad posee la misma frecuencia se produce una amplificación mucho mayor en comparación con el resto de frecuencias. En los micrófonos tradicionales tipo top esta frecuencia se presenta en torno a los 15 KHz limitando su ancho de banda de trabajo, con este rediseño se consigue subir la frecuencia de resonancia mejorando el ancho de banda utilizable.

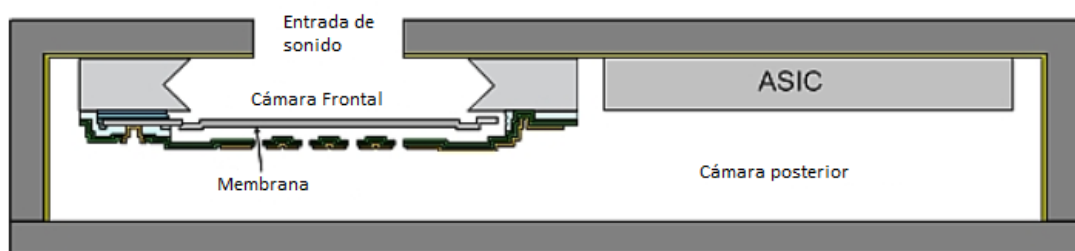


Figura 35: Sección transversal de un MEMS Bottom o Top de alto rendimiento

En conclusión, estos sensores de pequeño tamaño poseen características muy ventajosas: posibilidad de integrar tecnología analógica y digital en el mismo dispositivo, respuesta plana en un determinado rango de frecuencias, alta sensibilidad, bajo nivel de ruido, bajo consumo de energía y además se dispone de una amplia variedad de modelos dentro del rango acústico.

6.2 Micrófono MEMS MP34DT01

El micrófono MEMS con el que se va a trabajar es el modelo MP34DT01 fabricado por ST Microelectronics. Este micrófono es ultra compacto, omnidireccional y digital construido con un sensor capacitivo y una interfaz IC. El sensor, capaz de detectar ondas acústicas, se ha fabricado usando un proceso especializado de micromecanizado de silicio empleado para producir sensores de audio. La interfaz IC se realiza usando procesos CMOS que permiten diseñar circuitos que proporcionen una señal externa digital mediante PDM (Pulse Density Modulation) [8].

Sus características más destacadas son:

- 63 dB signal-to-noise ratio
- Alta sensibilidad (-26 dBFS)
- Respuesta en frecuencia:

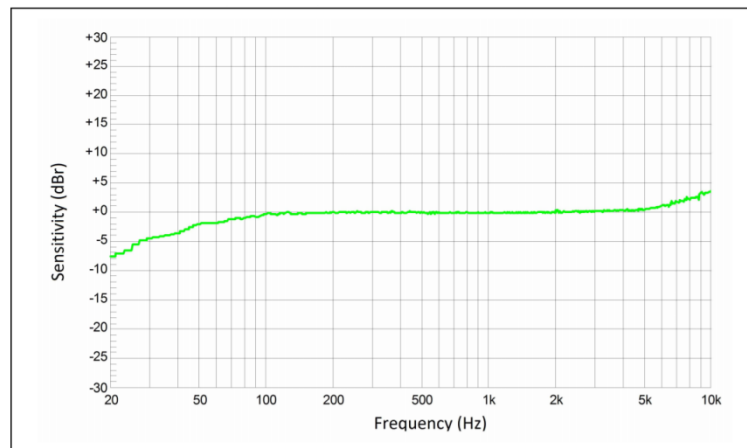


Figura 36: Respuesta en Frecuencia

Este sensor muestra una respuesta plana en el rango de frecuencias acústicas que abarca de los 50 Hz hasta los 10 KHz, en apartados posteriores se describen las pruebas realizadas con ultrasonidos para ver su respuesta en este rango de frecuencias y así comprobar si el sensor es adecuado para trabajar con ellas.

El diseño de este micrófono permite emplear una sola línea de datos por cada dos micrófonos recogiendo los datos de uno de ellos en el flanco de subida del reloj y el otro en el flanco de bajada.

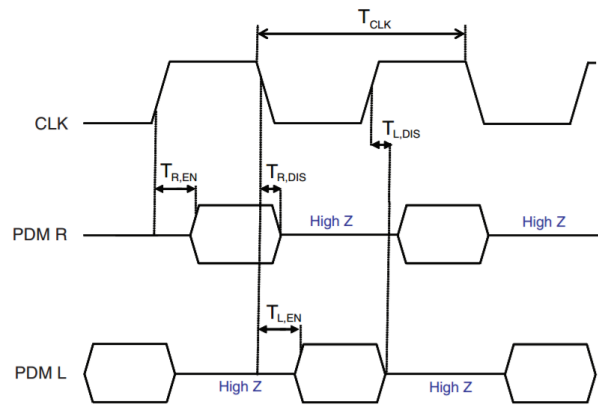


Figura 37: Adquisición de datos de dos micrófonos

De este modo el esquema de su implementación en una array de micrófonos sería de la siguiente forma:

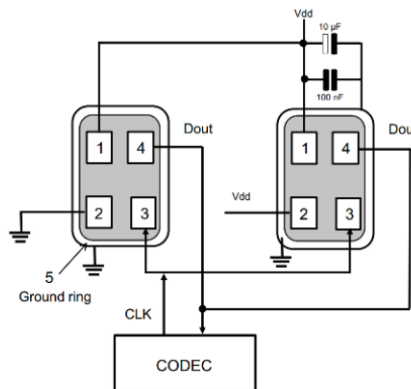


Figura 38: Esquema de la implementación de dos micrófonos en un array

Este tipo de micrófono tiene el orificio por el que entra la señal recibida encima del encapsulado (top). Dado que está diseñado para recibir frecuencias en la banda audible la respuesta en frecuencia no se verá afectada por un posible circuito acústico. Sin embargo a frecuencias ultrasónicas se podría ver afectadas por la resonancia de Helmholtz.

6.3. Micrófono MEMS SPH0641LU4H-1

El sensor anterior está diseñado específicamente para trabajar en la banda audible, por lo tanto, se buscó otro sensor que estuviese diseñado para poder trabajar también en la banda ultrasónica. Este sensor, diseñado por Knowles, puede funcionar en ambas bandas dependiendo de la frecuencia de reloj a la que trabaje [9]. Posee las mismas características de fabricación que el sensor anterior, salida digital y modulación PDM empleando la conversión sigma-delta.

Sus características más destacadas son:

- 64.3 dB signal-to-noise ratio
- Alta sensibilidad (-26 dBFS)

Este sensor tiene diferentes modos de funcionamiento dependiendo de la frecuencia de reloj a la que funcione el sensor:

	Frecuencia de Reloj	
Modo de funcionamiento	Frecuencia Mínima	Frecuencia Máxima
Sleep Mode	0 Hz	250 KHz
Low-Power Mode	351 KHz	815 KHz
Standard Performance Mode	1.024 MHz	2.475 MHz
Ultrasonic Mode	3.072 MHz	4.8 MHz

La respuesta en frecuencia según la hoja de especificaciones en el modo ultrasónico es la siguiente:

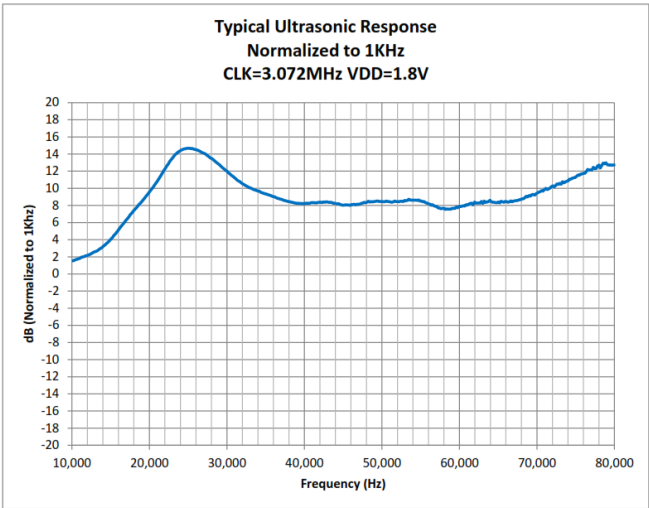


Figura 39: Respuesta en Frecuencia

Este micrófono tiene el orificio por el que entra la señal recibida en la parte trasera del encapsulado por lo que se formara una cavidad resonante. Observando la gráfica nos percatamos de que el MEMS resuena a una frecuencia de aproximadamente 25 KHz.

Al igual que el micrófono anterior, su diseño permite emplear una sola línea de datos por cada dos micrófonos.

Con este sensor se procederá a diseñar dos arrays de 16 micrófonos que describiremos más adelante en la descripción del hardware de este documento.

7. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

7.1. La plataforma NI MYRIO

El elemento principal del sistema es el dispositivo NI myRIO. Se trata de un dispositivo portable y reconfigurable que es capaz de gestionar una serie de entradas y salidas tanto digitales como analógicas, además de ser capaz de realizar un procesamiento de las señales recibidas en tiempo real. Se trata de un dispositivo de diseño embebido que posee 10 entradas analógicas, 6 salidas analógicas y 40 líneas E/S digitales [10].

Este dispositivo está dividido en dos secciones dentro del mismo integrado. Por una parte las entradas y salidas están controladas por una FPGA Xilinx (Field Programmable Gate Array). Por otro lado, el dispositivo cuenta con un procesador dual-core ARM Cortex-A9. Soporta el lenguaje de programación LabVIEW, C y C++ ejecutando los programas de procesamiento a tiempo real que se introduzcan y es capaz de establecer una conexión inalámbrica con una máquina externa.

Una FPGA es un dispositivo programable que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada 'in situ' mediante un lenguaje de descripción especializado. La principal ventaja que tienen respecto a los ASICs es que son reprogramables, por tanto añade una enorme flexibilidad al flujo de diseño, sus costes de desarrollo y adquisición son mucho menores para pequeñas cantidades de dispositivos y el tiempo de desarrollo es también menor. El circuito debe ser reprogramado para que la FPGA realice un proceso concreto.

El procesador dual-core ARM Cortex-A9 posee dos núcleos y una velocidad de procesador de 667 MHz, ejecuta un sistema operativo Linux en tiempo real que permite controlar los tiempos de ejecución. Además se encarga de gestionar una pequeña memoria no volátil de 256 MB en la que se puede almacenar programas para poder ser utilizado como una unidad independiente y una memoria volátil DDR3 de 512 MB.

El dispositivo NI myRIO dispone también de un acelerómetro de tres ejes. El acelerómetro muestrea cada eje continuamente y actualiza un registro con el resultado, posee una resolución de 12 bits y una tasa de muestreo de 800 S/s.

Figure 1. NI myRIO-1900 Hardware Block Diagram

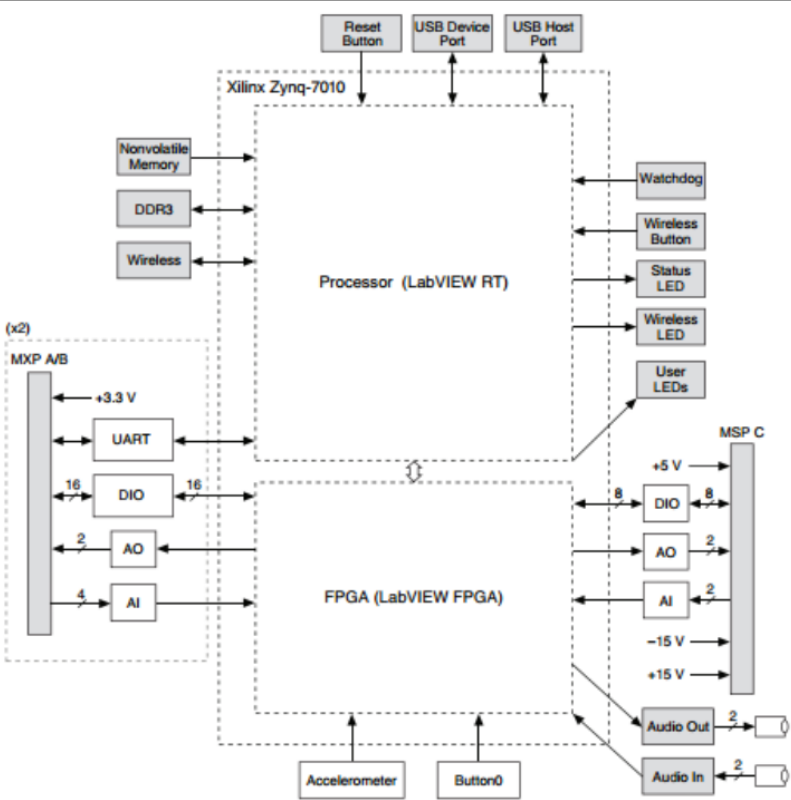


Figura 40:Diagrama de Bloques del myRIO

NI myRIO posee unos conectores Expansion Port (MXP) A y B que poseen un idéntico set de salidas/entradas. Las señales son distinguidas en el software por el nombre del conector, conocidos como ConnectorA y ConnectorB. En la siguiente imagen podemos ver la información acerca de la configuración de estos conectores. Se observa que algunos conectores tienen funciones secundarias.

Primary/Secondary Signals on MXP Connectors A and B

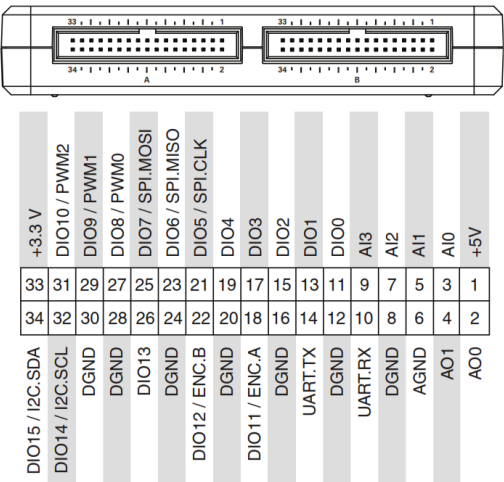


Figura 41: Puertos A y B

En nuestra aplicación emplearemos los pins digitales de los puertos A y B para extraer las señales recibidas en los micrófonos.

En la siguiente imagen podemos observar los conectores del Mini System Port (MSP), conector C. Como sucedía en las conexiones anteriores algunos pines tiene funciones secundarias.

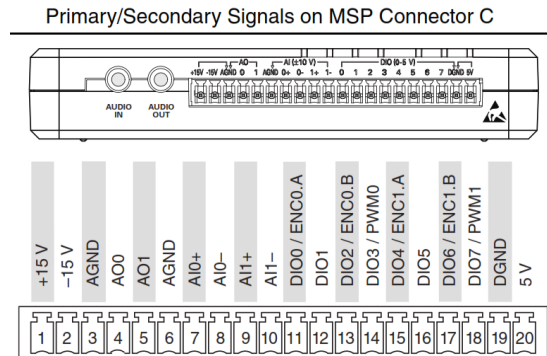


Figura 42: Puerto C

De los pines digitales de esta sección extraeremos nuestra señal de reloj que llegará a los micrófonos.

Este dispositivo tiene una entrada y una salida analógica en estéreo. Emplearemos esta última para sacar los tonos deseados a través de un amplificador y su correspondiente altavoz.

En definitiva este dispositivo es una buena herramienta para realizar una gran variedad de aplicaciones académicas para mejorar el aprendizaje de los estudiantes así como para aplicarlo en una gran variedad de proyectos de ingeniería, como aplicaciones de control, robótica, etc.

7.2 Introducción al array de sensores

El elemento empleado para la captura de datos es un array (matriz de micrófonos equiespaciados) rectangular 8x4 de sensores tipo MEMS, en concreto el modelo MP34DT01.

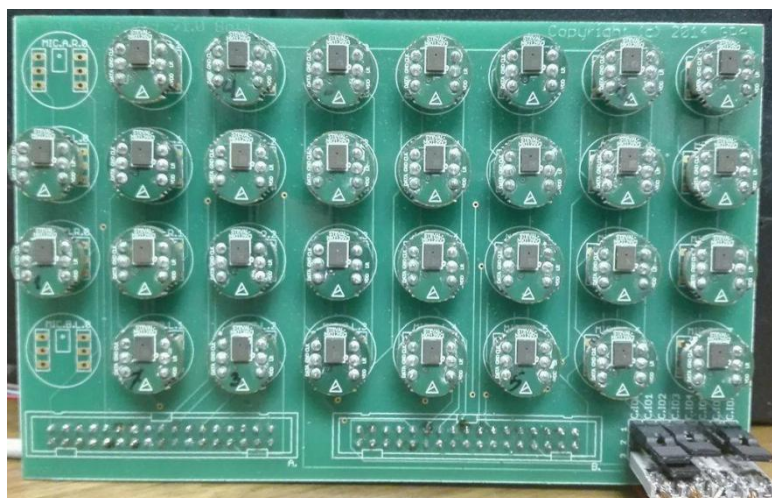


Figura 43: Array rectangular de sensores 8x4

Este array fue diseñado para realizar pruebas en el sistema anterior, el cual empleaba tonos en la banda audible por lo que está diseñado específicamente para esa banda de frecuencias. Cuando se quiere recibir una señal cuya longitud de onda sea $\lambda = c/f$, la teoría de antenas nos dice que para obtener una alta direccionalidad es necesario que las dimensiones físicas de la antena sean grandes comparadas con la longitud de onda. Es decir, que la antena tenga una gran apertura espacial. Pero dado que el array está compuesto de un conjunto de micrófonos resulta que para distancias superiores a $\lambda/2$ el array comienza a ser ambiguo, es decir, los lóbulos secundarios presentan un nivel de energía similar al lóbulo principal, a esto se le denomina grating lobes [11]. Además a medida que se aumenta la frecuencia, el ancho del lóbulo principal se estrecha con lo que los grating lobes se van acercando a 0° siendo necesario corregir este problema pues afectará a la resolución del sistema.

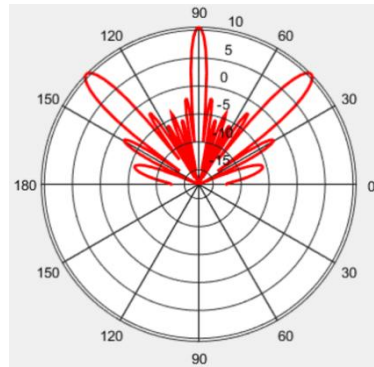


Figura 44: Diagrama de radiación con grating lobes

Sabemos por el teorema de Nyquist que se debe tomar de la señal dos muestras como mínimo por cada periodo de la señal. Es decir:

$$2d \leq \lambda \rightarrow d \leq \frac{\lambda}{2}$$

Donde λ corresponde con la longitud de onda de la frecuencia más alta. Por último comentar que si d se hace más pequeña se pierde apertura espacial, por lo que aumenta el ancho del lóbulo principal. Antes hemos mencionado que a medida que los tonos aumentan en frecuencia se reduce el ancho de su lóbulo principal de modo que empleando ultrasonidos corregimos este inconveniente.

Con este array la separación entre estos micrófonos es superior a $\frac{\lambda}{2}$ a frecuencias ultrasónicas por lo que tendremos problemas debido a los lóbulos secundarios.

7.3 Diseño de las placas para sensores MEMS SPH0641LU4H-1

Para poder realizar las pruebas de caracterización biométrica mediante ultrasonidos se decidió diseñar dos arrays con las características adecuadas para trabajar con ese rango de frecuencias. Ambos arrays constan de 16 micrófonos distribuidos uniformemente, el primero es un cuadrado de 4x4 micrófonos mientras que el segundo es un array circular estando los micrófonos situados en su perímetro.

En este proyecto se toma la frecuencia de 40 KHz como la frecuencia máxima utilizable para emitir tonos, por lo tanto, $d_{MAX} = 4.25$ mm.

El diseño de las placas se realizó mediante el programa EAGLE 7.5.0. y los resultados fueron los siguientes, para el diseño de la placa rectangular:

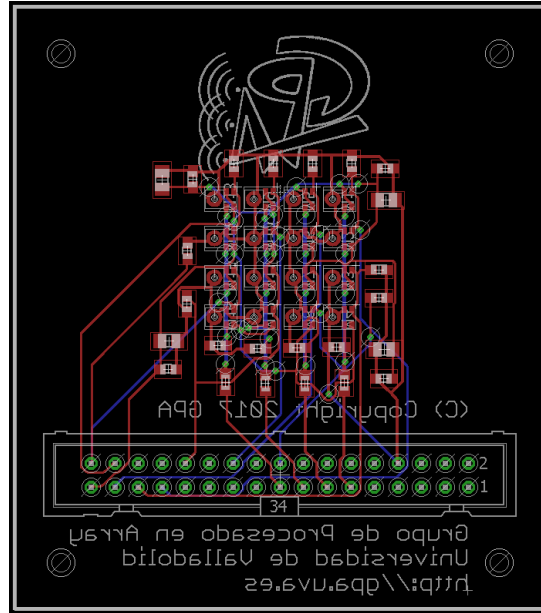


Figura 45: Diseño de la placa de sensores cuadrada 4x4

La separación entre los micrófonos es de 4.25 mm, este array está diseñado para ocupar uno de los puertos del dispositivo NI myRIO (A o B), permitiendo la opción de colocar un segundo array en el puerto restante.

En el caso del array circular se tuvo que aumentar la separación entre los micrófonos a una distancia de 4.75 mm, ya que, debido al inconveniente de trabajar con dimensiones tan pequeñas, los micrófonos no guardaban apenas separación entre ellos imposibilitando la fabricación de la placa. El resultado final fue el siguiente:

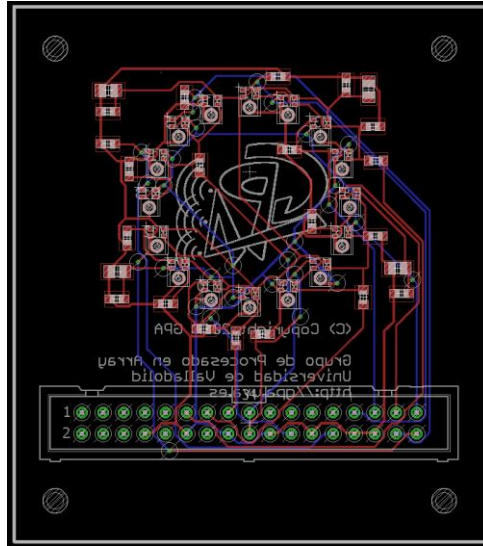


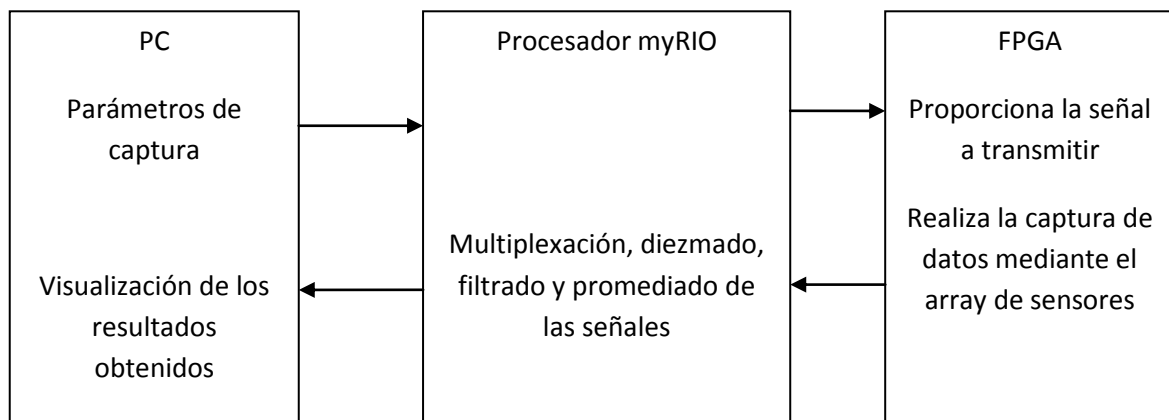
Figura 46: Diseño de la placa circular de 16 micrófonos

Al igual que la placa anterior el diseño se ha realizado para ocupar uno de los puertos, A o B, del dispositivo NI myRIO.

7.4. Distribución de funcionalidades del sistema de captura y procesado

Para aprovechar todas las posibles ventajas que ofrece este dispositivo myRIO, se plantea un sistema de procesamiento distribuido con la siguiente repartición de tareas:

- El array de micrófonos se conecta con la FPGA a través de los puertos de entrada A/B del dispositivo myRIO y el altavoz a través de la salida analógica estéreo del mismo de manera que la FPGA será la encargada de proporcionar la señal a transmitir y de obtener los datos de cada uno de los micrófonos MEMS.
- El procesador del dispositivo myRIO se encarga de controlar las acciones de la FPGA, iniciando el proceso de emisión y de captura: establece y gestiona la conexión con el PC. Además se encarga también de realizar todo el procesamiento de la señal.
- Por último el PC servirá de interfaz con el usuario para establecer los parámetros de captura y para visualizar los datos y gráficas de los resultados obtenidos.



8. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

8.1 Lenguaje de programación: LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas con un lenguaje de programación gráfico. Utiliza un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto. Este software fue creado por National Instruments en 1976, y las razones por las que se va a utilizar en este sistema son las siguientes:

- Permite programar todas las partes del myRIO con un único lenguaje de programación, tanto en la FPGA, como en el procesador, como en el PC.
- El código ejecutado en el myRIO se puede ejecutar desde el PC, por lo que se puede elegir si ciertas tareas se ejecutan en el myRIO o en el PC. No hay que hacer cambios en el software empleando labVIEW.
- Lenguaje de programación usado por el GPA.

8.2. Procesos asignados a la FPGA

Dentro de la FPGA se van a programar tres subprocesos. El primer subsistema se encarga de proporcionar la señal de reloj para ser utilizada por el array de sensores MEMS y por los demás bloques, el segundo se encarga de obtener los datos capturados por dicho array y el tercero se encarga de realizar el envío de los tonos de frecuencia deseados hacia el altavoz.

8.2.1. Reloj de los MEMS

La FPGA tiene una señal de reloj interna de 40 MHz, a un periodo de este reloj interno se le denomina un tick y se utiliza como unidad de medida para los tiempos de cada subproceso dentro de la FPGA. Esta frecuencia es demasiado alta para poder ser utilizada en este sistema.

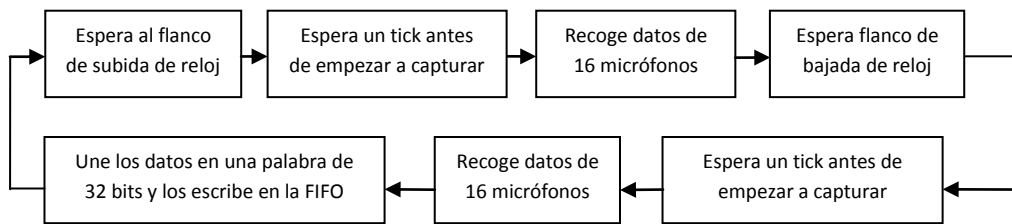
Este es el motivo por el cual se emplea este bloque con el cual, generamos una señal de reloj de 4 MHz, es decir, un periodo de reloj son 10 ticks, con lo cual se producirá un cambio al flanco de subida o al flanco de bajada cada 5 ticks. Esta señal se envía a través del puerto C hacia el array de sensores.

Este bucle se mantiene en funcionamiento en todo momento desde que se inicia la FPGA. La implementación de este apartado puede verse en el bloque 1 del anexo.

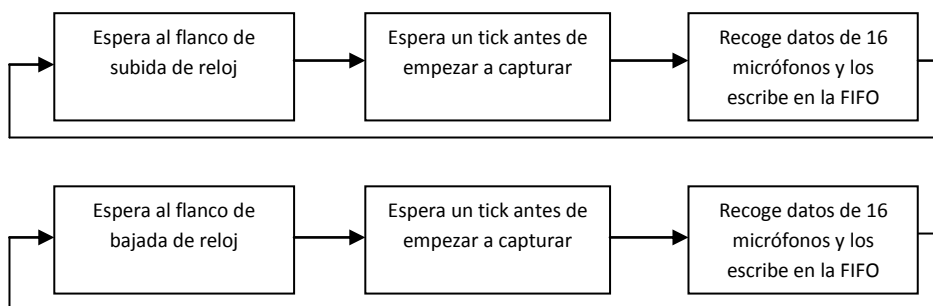
8.2.2. Sistema de captura en la FPGA

El array de micrófonos se conecta a la FPGA mediante los puertos digitales A y B, cada uno de ellos dispone de 16 líneas de entrada o salida, en este caso actuarán de entrada al sistema. Entre los dos conectores se dispone de 32 líneas de entrada digitales.

El esquema inicial del que partimos para realizar la captura era el siguiente:



Una vez iniciada la captura el sistema espera a que llegue el flanco de subida del reloj y cuando este llegue espera un tick de reloj para empezar a capturar, esto se hace para evitar una posible pérdida de datos. En el flanco de subida se recogen 8 bits por el puerto A y otros 8 bits en el puerto B y se unen en una palabra de 16 bits, del mismo modo actúa cuando llega el flanco de bajada. Estas dos palabras obtenidas se unen en una sola de 32 bits y la escribe en la FIFO (First In First Out). La FIFO es una estructura que permite almacenar y recuperar datos que funciona como una cola: el primer dato en entrar es el primero en salir. Una vez iniciada la captura todos los pasos deben realizarse en un solo ciclo de reloj de 4 MHz, es decir, en 10 ticks. Este esquema estaba diseñado para trabajar a una frecuencia de reloj de 1 MHz, es decir, un ciclo de reloj eran 40 ticks. Debido a que no era posible reducir el ciclo de reloj a 10 ticks siguiendo este modelo, se planteó el siguiente esquema:



El subproceso anterior se divide en dos subprocesos, por un lado los datos que se capturan en el flanco de subida y por otro los datos que se capturan en el flanco de bajada. Esto provoca que sea necesario el uso de dos FIFOs (FIFO Right y FIFO Left) para almacenar los datos. La implementación de este esquema puede verse en el bloque 2 del anexo.

De este modo podemos realizar la captura de datos en un ciclo de reloj. En el flanco de subida lee los datos del puerto A de 0 a 7, del mismo modo lo hace el puerto B, estos datos se unen formando una palabra de 16 bits que se almacenan en la FIFO correspondiente (FIFO Right). Del mismo modo sucede en el otro subproceso, leyendo los datos en el flanco de bajada del ciclo de reloj y formando una palabra de 16 bits que se almacenará en la otra FIFO (FIFO Left).

Posteriormente en el demultiplexor se unirán los datos formando una palabra de 32 bits donde cada palabra corresponde a una muestra y cada bit corresponde a un canal.

8.2.3. Sistema de emisión en la FPGA

La función principal de este bloque es enviar a través de un canal analógico de salida del dispositivo myRIO la señal frecuencial diseñada para este sistema. Este subproceso se compone de tres bloques:



Cuando el usuario inicia la captura se activa la señal de trigger que inicia el proceso de emisión y captura de los tonos. De este modo, se encarga de sincronizar la salida de los tonos del conversor D/A con la captura de los datos emitidos.

Las muestras de la señal a transmitir están previamente almacenadas en una zona de memoria de la FPGA que se denomina look up table lo que permite evitar calcular la señal en tiempo real ahorrando tiempo de procesamiento y además permite transmitir señales más complejas como una combinación de tonos. Una look up table es una estructura de datos, normalmente un vector. En el tiempo de ejecución hay que ir leyendo secuencialmente de esta zona de memoria y sacando las muestras por el conversor D/A, con esto se consigue una frecuencia de muestreo de 330KHz debido al retardo de ejecución del conversor D/A.

La implementación de este esquema puede verse en el bloque 3 del anexo.

8.3. Procesos asignados al procesador del dispositivo myRIO

El procesador del dispositivo myRIO tiene la función principal de actuar como intermediario entre la FPGA y el PC y de realizar todo el procesamiento de la señal.

Por un lado, la conexión al PC se realiza creando un flujo de datos a través del cual se transmiten las órdenes y parámetros de captura desde el PC hacia la FPGA. Este flujo de datos se establece al iniciar el software en ambos extremos y se mantiene conectado mientras ambos extremos se mantengan activos.

Por otro lado, las interacciones con la FPGA se realizan mediante sesiones. Estas sesiones se establecen con un propósito concreto y se cierran una vez finalizada la tarea para la cual se establece dicha sesión. Durante estas sesiones el procesador puede pasar parámetros a la FPGA, incluyendo las órdenes de iniciar emisión y captura. El intercambio de datos se realiza mediante las pilas FIFO.

8.3.1. Extracción y demultiplexación de los datos

Como hemos mencionado antes los datos capturados se almacenan en dos pilas FIFO. Estas pilas no son infinitas, tienen una capacidad limitada, por lo tanto, es necesario que el proceso de extracción de datos de las pilas comience inmediatamente después de iniciarse el proceso de emisión y captura. Así evitamos un posible caso de desbordamiento y pérdida de datos.

Estos datos se extraen por bloques de muestras siendo el tamaño del bloque asignado por el usuario. Los datos extraídos en cada una de las FIFO se unen en un demultiplexor para formar la palabra de 32 bits y se dividen en 32 números para procesar cada canal por separado .

Cuando todos los datos de la pila han pasado al flujo de datos este sistema vuelve a un estado de espera.

La implementación de este apartado puede verse en el bloque 4 del anexo

8.3.2. Diezmado de la señal

La señal obtenida del dispositivo myRIO ha sido muestreada a una frecuencia de 4 MHz. Vamos a trabajar con ultrasonidos, la frecuencia de trabajo máxima estará en torno a los 80 KHz, por lo tanto, según el teorema de Nyquist, se dispone de un número de muestras muy superior al necesario, lo que implica una carga computacional innecesaria.

El diezmado de la señal se realiza previamente a cualquier otro procesamiento de la señal. Se realiza un diezmado y filtrado paso-bajo por etapas de factor 20, logrando una señal cuya frecuencia de muestreo es ahora de 200 KHz con lo cual seguimos teniendo cierto margen para evitar que se produzca aliasing si trabajamos con frecuencias más altas del rango establecido. De este modo también eliminamos el ruido que aparece a altas frecuencias debido a la modulación PDM que emplean los MEMS como interfaz de salida para los datos.

Los datos diezmados se almacenan en un array 2D donde las columnas representan cada canal y las filas son las muestras capturadas.

8.3.3. Análisis espectral mediante la DFT

Por último se realiza un promediado por cada canal y se aplica un filtro paso banda ajustado a la frecuencia de cada tono que se desea capturar eliminando así el ruido alrededor del tono deseado. Por último obtenemos su respuesta espectral realizando la DFT a cada canal y posteriormente se promedian todos los canales y se expresan los resultados en decibelios.

La implementación de este apartado puede verse en el bloque 5 del anexo.

8.4. Procesos asignados al PC

La parte del sistema ejecutada en el PC sirve de punto de acceso para que el operador interactúe con el sistema. El usuario puede configurar los parámetros de captura e iniciar el proceso y posteriormente visualizar los resultados obtenidos y almacenarlos.

El PC nos sirve como herramienta de programación además todos los procesos de la FPGA se podrían trasladar al PC, puesto que el procesador del PC es más potente, el tiempo de procesamiento sería menor, no obstante habría que tener en cuenta el tiempo de transferencia de datos de la myRIO hacia el PC con lo que aumentaría el tiempo de procesamiento.

9. PRUEBAS Y RESULTADOS

9.1. Pruebas realizadas con el sensor MP34DT01

Dado que el micrófono empleado MP34DT01 no está diseñado para recibir ultrasonidos, se han realizado una serie de pruebas con distintos transductores con el fin de observar su respuesta frecuencial y comprobar si puede ser utilizado para tal fin. Lo que se busca es que este micrófono tenga una respuesta en frecuencia lo más plana posible en el rango de ultrasonidos que abarcan de los 20 KHz hasta los 80 KHz.

Las pruebas se realizan dentro de una cámara anecoica para evitar reflexiones indeseadas y obtener una respuesta lo más precisa posible. Se realiza un barrido en frecuencia que consiste en la emisión de tonos sucesivos cada 10 ms y con una duración del tono emitido de 2 ms comenzando en 10 KHz y llegando hasta 80 KHz en saltos de 100 Hz.

Es importante promediar los canales, pues los micrófonos captan de distinta forma obteniéndose ligeras variaciones en la ganancia de cada sensor.

9.1.1. Transductor de ultrasonidos resonante a 40KHz

Para comenzar se prueba con un pequeño transductor obtenido de un sensor medidor de distancias que emplea ultrasonidos llamado HC-SR04. Se visualizo la respuesta frecuencial en dB y normalizando.

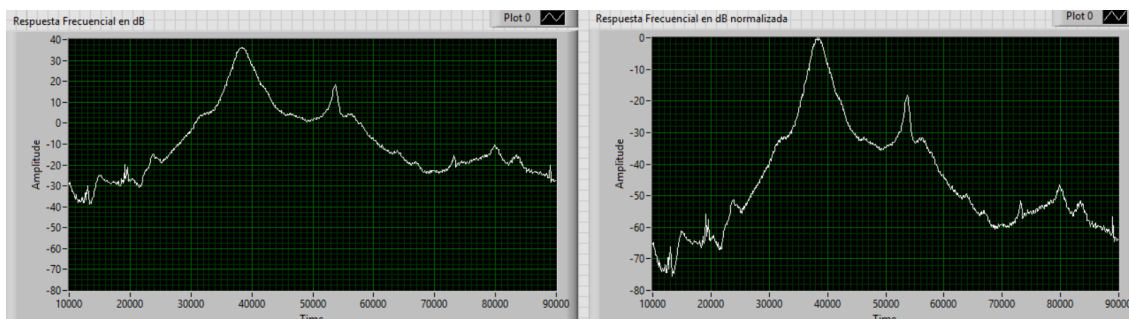


Figura 47: Respuesta frecuencial del Transductor Resonante a 40 KHz

En este caso podemos observar que el transductor empleado está diseñado para resonar en torno a 40 KHz y fuera de ese pequeño rango la respuesta sufre una fuerte caída en dB.

9.1.2. Transductor piezoeléctrico

Realizamos la misma prueba con un pequeño transductor piezoeléctrico diseñado para emitir tonos de alta frecuencia.



Figura 48: Respuesta Frecuencial del Transductor Piezoeléctrico

En este caso se observa una respuesta mucho más plana, es de notar que los micrófonos empleados en la captura resuenan a una frecuencia en torno a los 30 KHz. Esto se debe al circuito acústico que se forma en el micrófono.

9.1.3. Sistema amplificado

Ahora vamos a probar el sistema con un amplificador de potencia profesional modelo S75 de dos canales de 75W que suministra la señal al altavoz.

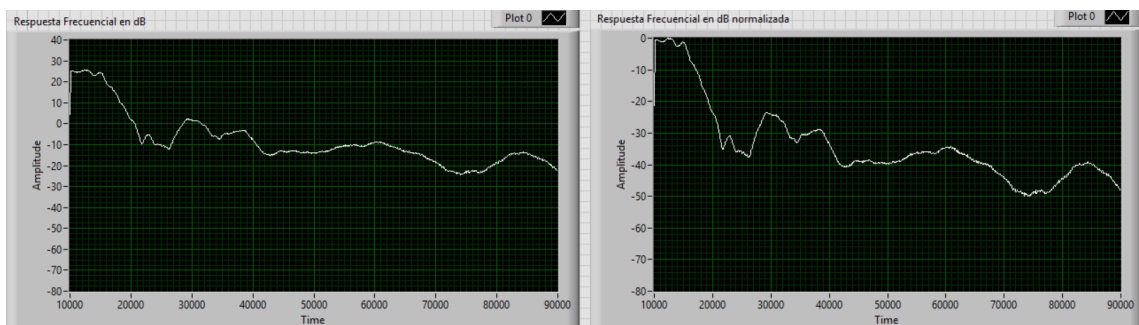


Figura 49: Respuesta Frecuencial del Sistema Amplificado

Este amplificador está diseñado para suministrar ganancia a una señal en el rango de las frecuencias sonoras para el ser humano y como se observa la señal sufre una fuerte caída en torno a los 18 KHz.

9.1.4. Conclusiones de las Medidas Realizadas

Las medidas realizadas permiten observar que ante un transductor cuya respuesta en frecuencias ultrasónicas sea más o menos plana como el caso del transductor piezoeléctrico, el micrófono MP34DT01 tiene una respuesta más o menos plana en un margen de 10 dB en el rango que abarca de los 35 KHz a los 75 KHz, no obstante el MEMS resuena a 30 KHz lo que podría ser un inconveniente a la hora de equilibrar las ganancias de los MEMS cuando se emitan distintos tonos de frecuencia. En el caso del sistema de amplificación profesional el problema radica en el diseño de dicho amplificador pues no está diseñado para amplificar frecuencias por encima del rango audible, por lo tanto la solución sería buscar un buen amplificador de alta calidad que tenga un rango que alcance las frecuencias ultrasónicas acompañado de un buen tweeter que pueda emitir tonos de dichas frecuencias.

9.2. Pruebas con distintos amplificadores

En esta sección se va a probar con distintos amplificadores que emplean integrados TDA de ST Microelectronics con el objetivo de encontrar uno que tenga una respuesta plana a la hora de amplificar frecuencias por encima de la banda audible.

Los integrados analizados son los siguientes:

- TDA2030A
- TDA7492
- TDA7297

En primer lugar se descartó el TDA2030A, ya que, observando su hoja de especificaciones [12] se puede comprobar que el rango de frecuencias amplificadas apenas llegaba a los 20 KHz sin sufrir una caída en la ganancia.

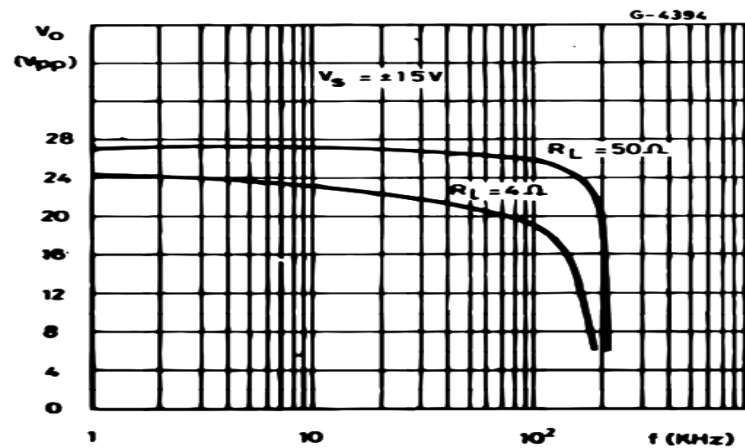


Figura 50: Respuesta Frecuencial del TDA 2030a

Lo mismo sucedió con el integrado TDA7492:

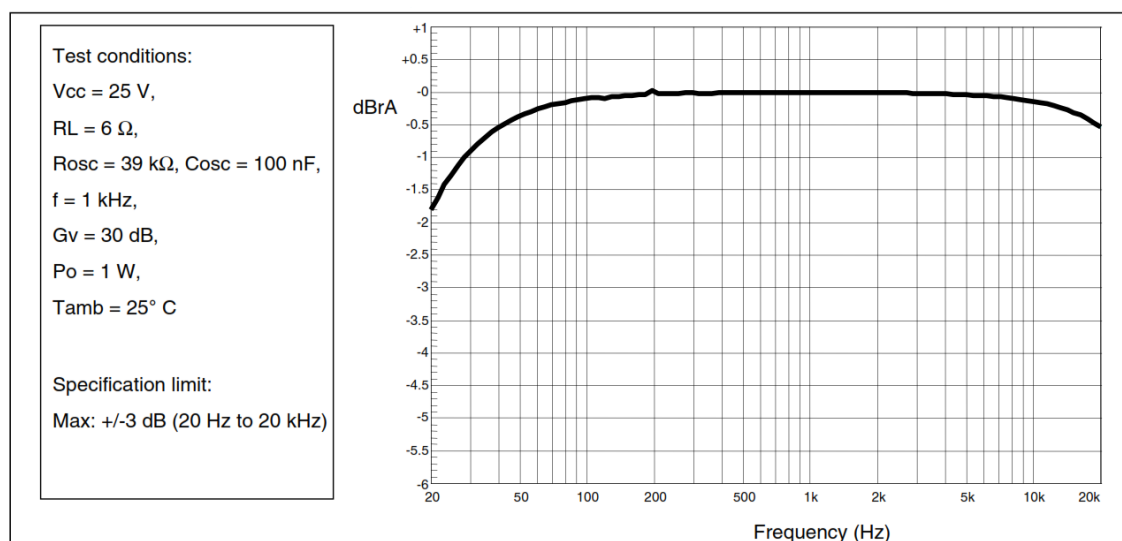


Figura 51: Respuesta Frecuencial Teórica del TDA 7492

Aunque este circuito amplificador responde mejor que el anterior sigue teniendo una fuerte caída al superar los 20 KHz debido al filtro paso-bajo que lleva a la salida de la señal amplificada [13]. Sin embargo al observar la hoja de características del integrado TDA 7297 [14] se observa una respuesta plana hasta los 100 KHz aproximadamente, por lo que se procedió a realizar las pruebas que lo verificasen. Para ello se realizó un barrido en frecuencia mediante un generador de funciones y se observó su respuesta en frecuencia mediante el osciloscopio colocando una resistencia de carga al amplificador de 9,75 Ω .

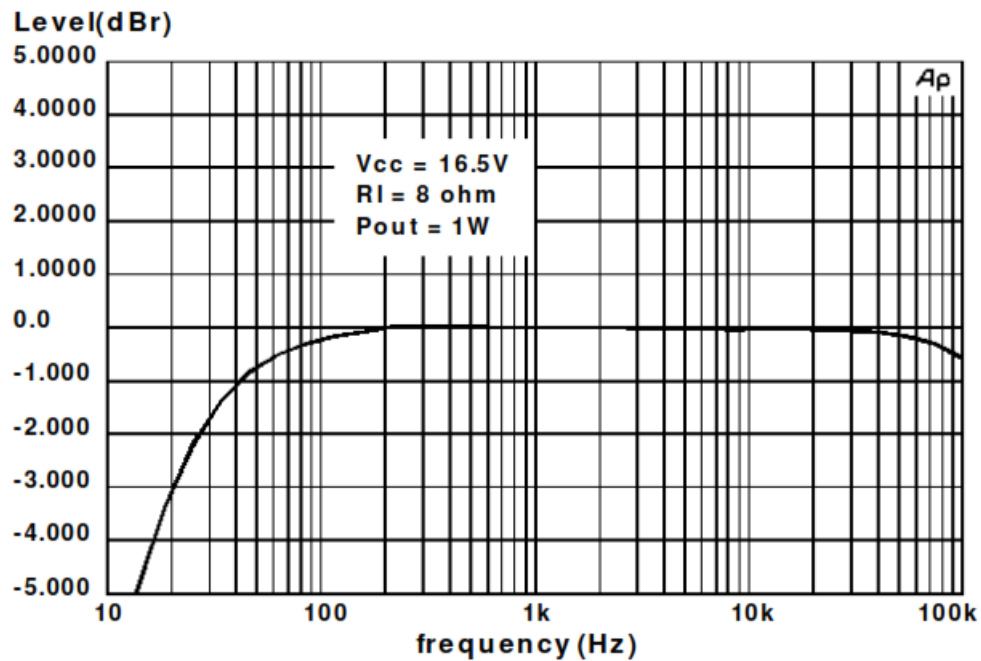


Figura 52: Respuesta Frecuencial Teórica del TDA 7297

Los resultados prácticos obtenidos fueron los siguientes:

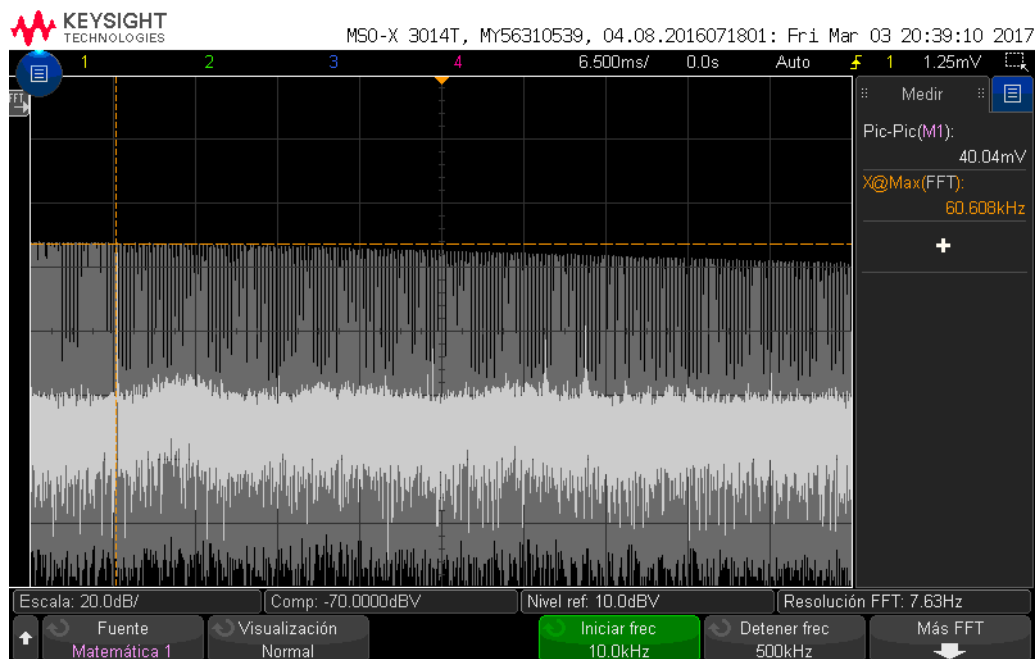


Figura 53: Respuesta Frecuencial Real del TDA 7297

En esta primera gráfica observamos la DFT de un barrido en frecuencia de 10 KHz hasta 500 KHz, a primera vista se observa un comportamiento bastante bueno para los requerimientos que necesitamos del amplificador, a continuación vamos a afinar un poco más las pruebas midiendo donde se produce la caída de 3 dB en ganancia y la relación entre la señal enviada y su primer armónico.

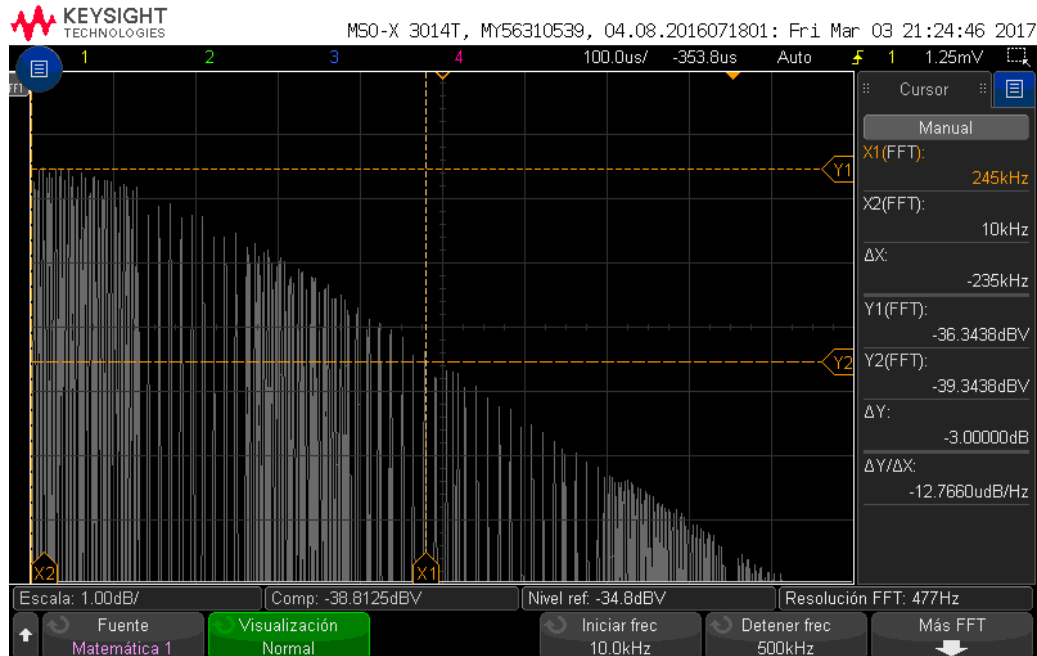


Figura 54: Caída de la Ganancia de 3 dB

Como se puede observar en la gráfica la caída de 3 dB se produce a la frecuencia de 245 KHz, por lo que tenemos un amplificador con una respuesta suficientemente plana en el rango de los ultrasonidos y las señales que queremos emitir no van a superar los 40 KHz.

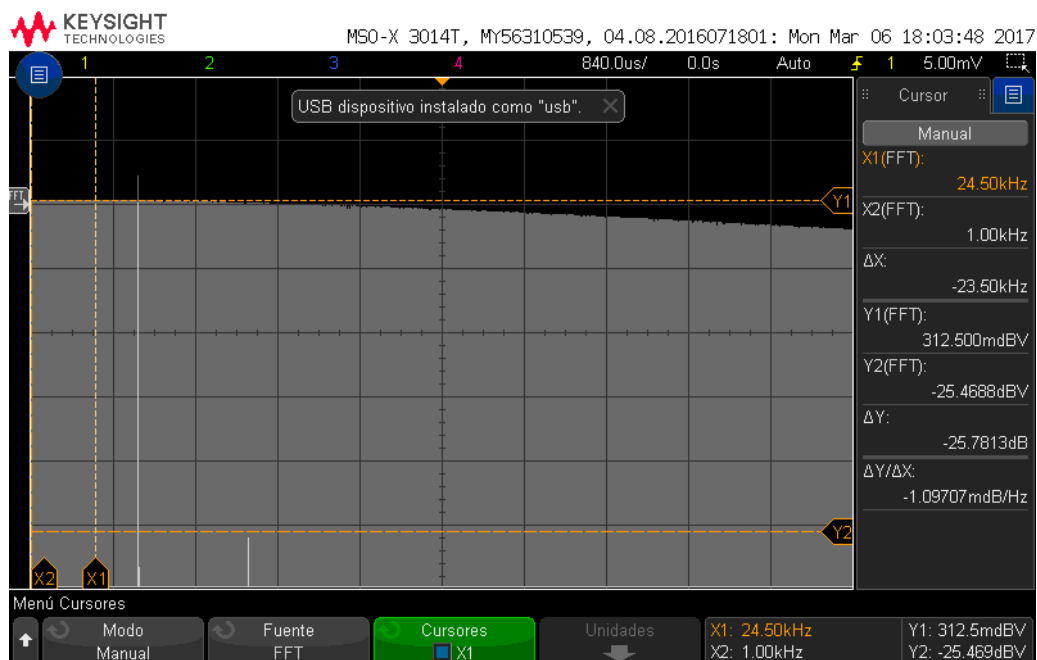


Figura 55: Relación entre el tono enviado y su primer armónico

En esta gráfica capturamos un tono de 40 KHz emitido por nuestro generador de funciones y se observa la aparición de un primer armónico generado por el amplificador en 80 KHz, la separación en amplitud entre ambos es de 25.46 dB, por lo que presenta una buena distorsión armónica.

A continuación se procede a medir la ganancia que proporciona el integrado y su potencia máxima, para ello introducimos una señal de 1 KHz con 100 mV de amplitud pico a pico y se va aumentando hasta observar en el osciloscopio como la señal se satura, lo cual nos indicará el límite de ganancia que puede aportar el integrado:

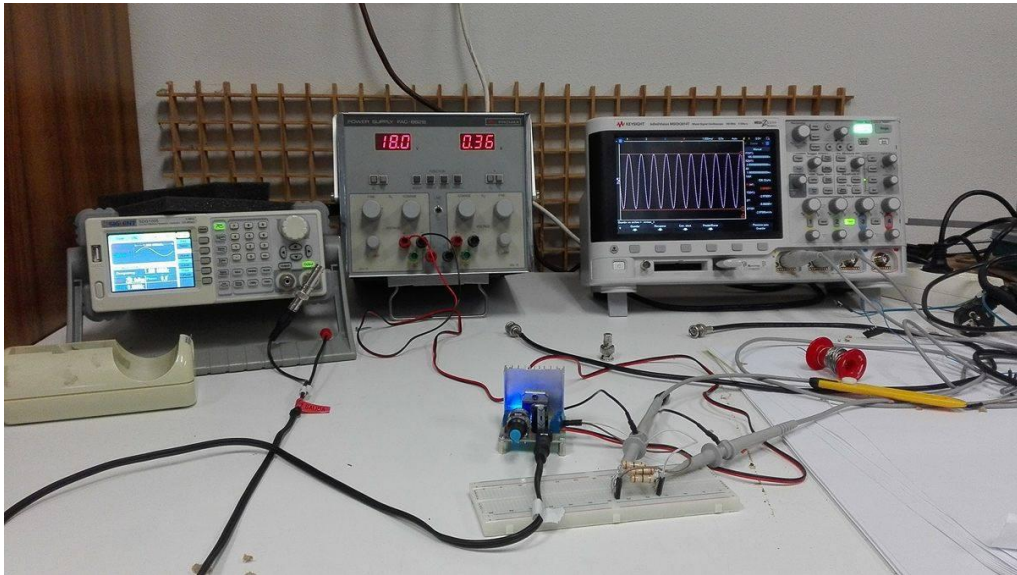


Figura 56: Medida de la ganancia del amplificador TDA 7297

El circuito se alimenta con 18 voltios y consume 0,36 amperios a máxima ganancia. El resultado obtenido fue el siguiente:

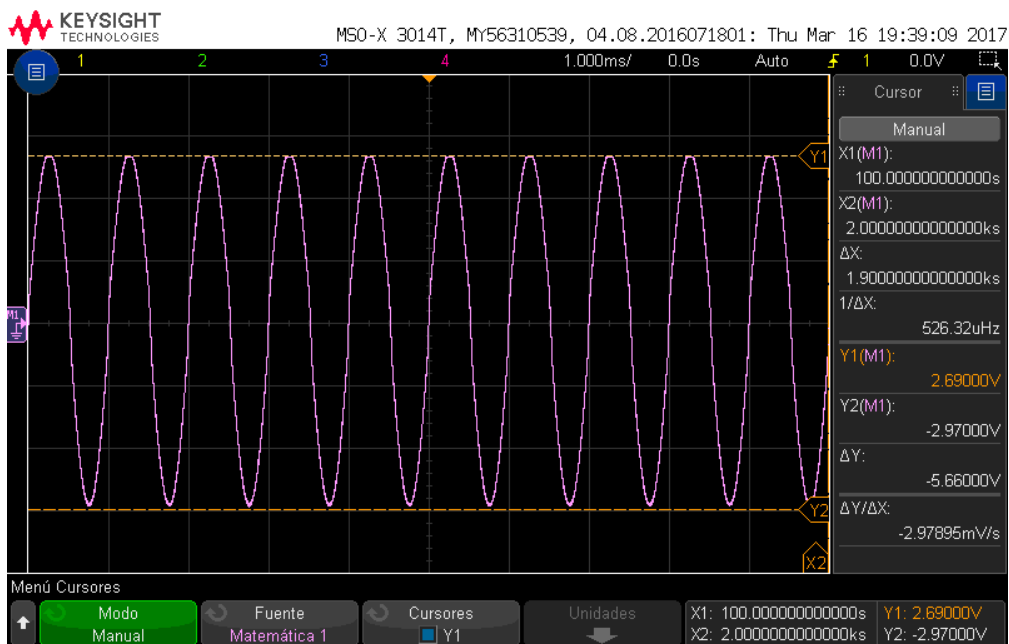


Figura 57: Señal de salida del amplificador a máxima ganancia

La señal introducida en el generador de funciones es una onda sinusoidal de 290 mV de pico a pico y un 1 KHz, por lo que la ganancia que proporciona este circuito es de 20.

$$P_{\text{pico}} = \frac{(V_{\text{pico}})^2}{R} = \frac{2.83^2}{8} = 1 \text{ W}$$

$$P_{\text{media}} = \frac{1}{2} * P_{\text{pico}} = 0.5 \text{ W}$$

El inconveniente que presenta este amplificador es la falta de potencia necesaria para emitir los tonos.

9.3. Elección del altavoz piezoeléctrico

Para la elección de un buen altavoz de ultrasonidos se adquirieron tres modelos de altavoces piezoeléctricos cuyas características podían encajar con los requisitos de nuestro sistema. Los modelos elegidos fueron los siguientes:

Tweeter Piezo 75 W 2.5-25KHz

No se necesita un filtro de separación de frecuencias. La excelente respuesta transitoria genera un sonido puro y claro con una distorsión armónica muy baja. Es posible mejorar la estabilidad del altavoz conectando una resistencia de 33 ohm 10W en serie al tweeter.

- Impedancia: 4 - 8 Ohm
- Potencia Nominal 75 W
- Potencia máxima 150 W
- Respuesta en frecuencia 2.5 - 25 KHz
- Sensibilidad 95 dB
- Dimensiones 95 x 95 mm



Figura 58: Tweeter Piezo

QTX SOUND Tweeter Piezo Bocina

- Potencia Máxima 150 W
- Respuesta de frecuencia 4 KHz - 30 KHz
- Impedancia 1 KHz - 1KΩ
- Impedancia 25 KHz - 60, 80 Ω

- Dimensiones 67 x 145 x 20
- Peso 44 g



Figura 59: QTX Sound Tweeter

QTX SOUND Tweeter Doble Piezo

- Potencia Máxima 150 W
- Respuesta en frecuencia 3 KHz - 32 KHz
- Impedancia 1 KHz - 1K Ω
- Impedancia 30 KHz - 40 Ω
- Dimensiones 95 x 162 x 105 mm



Figura 60: QTX Sound Tweeter Piezo

La característica más importante de estos altavoces para nuestro sistema es su respuesta en frecuencia. Para lograr nuestro objetivo buscamos una respuesta en frecuencia plana que alcance hasta los 40 KHz. El siguiente paso fue analizar su respuesta en frecuencia con nuestro array de micrófonos y el amplificador TDA 7297.

De nuevo, como hicimos anteriormente, las pruebas se realizan dentro de una cámara anecoica para evitar reflexiones indeseadas y obtener una respuesta lo más precisa posible. Se realiza un barrido en frecuencia que consiste en la emisión de tonos sucesivos cada 10 ms y con una duración del tono emitido de 2 ms comenzando en 10 KHz y llegando hasta 90 KHz en saltos de 100 Hz.

Tweeter piezo 75W:

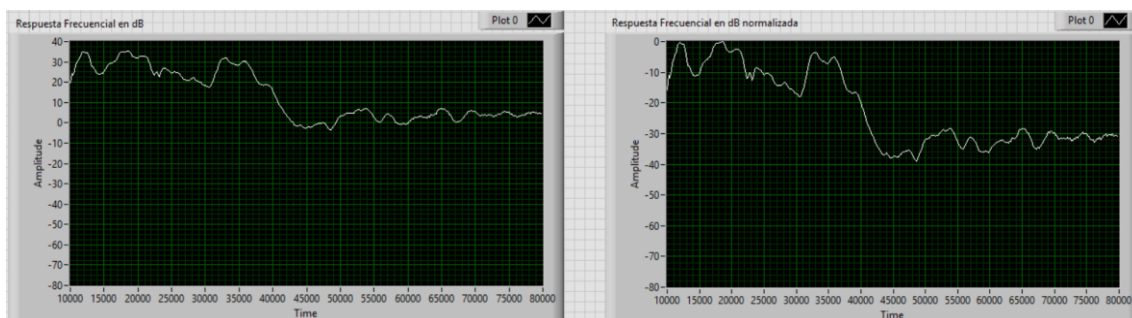


Figura 61: Respuesta Frecuencial del Tweeter piezo 75W

QTX Sound Tweeter Piezo Bocina:

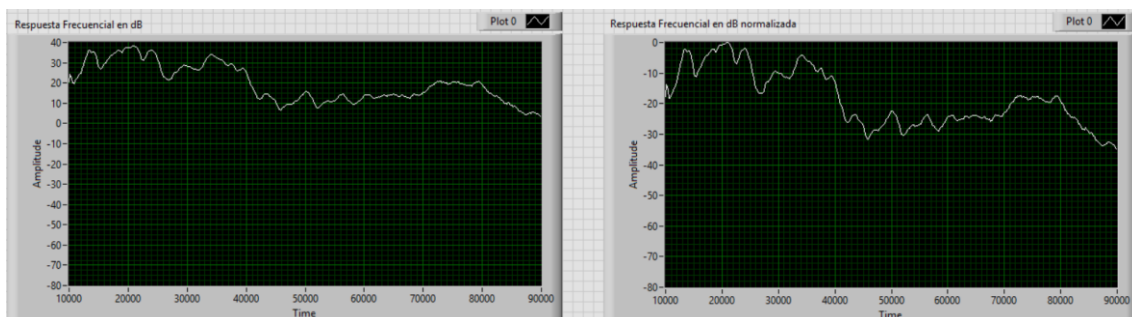


Figura 62: Respuesta Frecuencial QTX Sound Tweeter

QTX Sound Tweeter Doble Piezo:

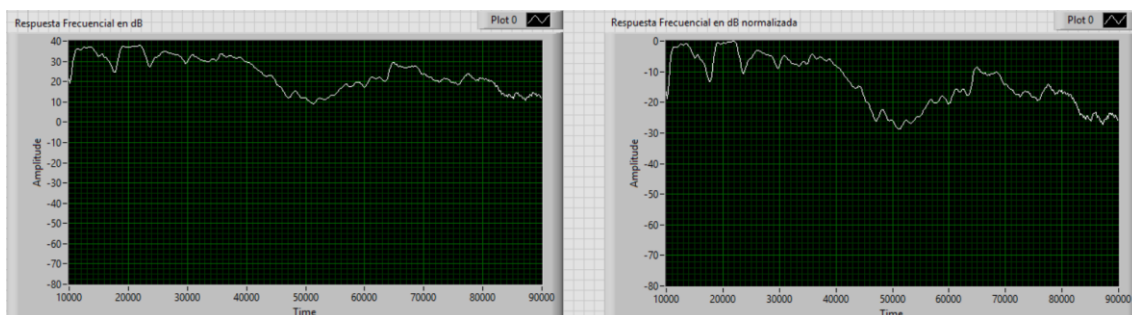


Figura 63: Respuesta Frecuencial QTX Sound Tweeter Doble

Comparando los resultados de las gráficas podemos observar que el tweeter que mejor respuesta nos ofrece es el QTX Sound Tweeter Doble Piezo que tiene una respuesta "plana" hasta los 40 KHz. Por lo tanto, este será el altavoz con el cual trabajaremos para realizar las pruebas posteriores.

10. CONCLUSIONES

En primer lugar se ha verificado que el sistema puede funcionar en la banda ultrasónica hasta frecuencias de 80 KHz. El dispositivo NI myRIO ha sido capaz de sincronizar el reloj de la FPGA con el de los MEMS para proporcionarles una frecuencia de reloj de 4MHz y de procesar correctamente los datos recibidos.

Se testeó la viabilidad de los MEMS MP34DT01 para funcionar en la banda ultrasónica. Estos MEMS resuenan a 30 KHz por lo que es un inconveniente importante a la hora de buscar una respuesta plana en el rango que abarca de los 20 KHz a los 80 KHz. Sin embargo presenta una respuesta "plana" de los 35 KHz a los 75 KHz, con variaciones en un rango acotado de 10 dB. Aunque estos MEMS no estén diseñados para recibir tonos a tan altas frecuencias se ha demostrado que son capaces de recibir y procesar estos tonos.

A la hora de emitir tonos de alta frecuencia es necesario un amplificador cuyo ancho de banda se extienda hacia estas frecuencias para mantener una ganancia constante a lo largo del rango en el que se va a trabajar. Normalmente los amplificadores de audio están diseñados para amplificar únicamente en la banda audible por lo que suelen llevar un filtro paso-bajo con una frecuencia de corte en torno a los 20 KHz. Tras las pruebas realizadas con distintos amplificadores que emplean integrados TDA de ST Microelectronics se comprobó que el TDA 7292 es capaz de amplificar en el rango de los ultrasonidos, no obstante, presenta el inconveniente de ser un amplificador pequeño que no es capaz de suministrar una potencia de salida suficiente.

Tras las pruebas realizadas con el array de MEMS MP34DT01, se diseñaron dos arrays de micrófonos con las dimensiones adecuadas para recibir ultrasonidos y evitar el problema de los lóbulos secundarios a la hora de realizar la conformación, empleando micrófonos diseñados específicamente para recibir tonos a estas frecuencias con el fin de obtener en las pruebas una respuesta lo más plana posible. Debido al retraso en la fabricación de las placas no han llegado a tiempo, por lo que no se han podido realizar las pruebas correspondientes.

11. LÍNEAS FUTURAS

Como hemos visto en el desarrollo de este proyecto, la implementación de este sistema para su funcionamiento en la banda de ultrasonidos es posible y partiendo de las pruebas realizadas se llega a la conclusión de que lo primero que se necesita para avanzar en el desarrollo del sistema es encontrar o diseñar un amplificador de ultrasonidos que no solo tenga un ancho de banda que abarque en el rango ultrasónico sino que además pueda emitir con una potencia mayor. En el mercado, únicamente los amplificadores de alta fidelidad poseen estas características.

Una vez adquiridos los arrays MEMS diseñados en este proyecto el siguiente paso a realizar consiste en comprobar su respuesta en frecuencia realizando un barrido en el rango ultrasónico de los 20 KHz a los 80 KHz con el fin de obtener una respuesta plana, sabiendo ya que el tweeter y el amplificador poseen ambos una respuesta plana para ese rango de frecuencias.

Y por último analizar los distintos algoritmos de conformación existentes para emplear el que más se adecúe a las características del sistema diseñado y realizar las pruebas correspondientes para formar la imagen 2D y probar la caracterización biométrica con diferentes personas para posteriormente comprobar si se ha conseguido un aumento de la resolución del sistema en comparación con el sistema anterior que empleaba el rango de frecuencias en la banda audible.

12. BIBLIOGRAFÍA

[1] Grupo de investigación reconocido: Grupo de procesado en array

<http://gpa.uva.es/>

[2] Proyecto de ingeniería de las ondas I

Autores: Luis Miguel Vega Fidalgo, David Zorita Téllez

https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/infra_y_ultra/historia_ultrasonidos.htm

[3] Proyecto de ingeniería de las ondas I

Autores: Luis Miguel Vega Fidalgo, David Zorita Téllez

https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/infra_y_ultra/aplicaciones_ultrasonidos.htm

[4] Electroacústica Practica

Autores: Jan Voetmann y Eddy Bogh Brixen

[5] Altavoz Piezoeléctrico. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Argentina

Autores: Guillermo Colombero y Guillermo Sosa

<http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticayelectroacustica/public/file/FAyE0312E2-Colombrero-Sosa.pdf>

[6] Proyecto fin de carrera: Diseño, fabricación y caracterización de un sensor de caudal para aplicaciones PCB-MEMS

Autor: Francisco Perdigones Sánchez

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4966/fichero/e.+Tecnologia+MEMS.pdf>

[7] Micrófonos MEMS: Análisis y caracterización acústicas. XIII Congreso Argentino de Acústica.

Autores: Fernando M. González, Juan A. Rosales, Rodrigo Pérez, Valentín I. Lunati, Aldo H. Ortiz

[http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/adaa2015/A019%20\(Gonz%20E1lez\)%20Micr%20F3fonos%20MEMS%20an%20E1lisis%20y%20caracterizaci%20n%20ac%20Fastica.pdf](http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/adaa2015/A019%20(Gonz%20E1lez)%20Micr%20F3fonos%20MEMS%20an%20E1lisis%20y%20caracterizaci%20n%20ac%20Fastica.pdf)

[8] Hoja de Especificaciones del micrófono MEMS: MP34DT01-M

<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/47/bd/d2/13/8d/fd/48/26/DM00121815.pdf/files/DM00121815.pdf/jcr:content/translations/en.DM00121815.pdf>

[9] Hoja de especificaciones del micrófono MEMS: SPH0641LU4H-1

<http://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/791052/KNOWLES/SPH0641LU4H-1.html>

[10] User Guide and Especifications: NI myRIO 1900

<http://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf>

[11] Proyecto Fin de Carrera: Diseño e Implementación Hardware y Software de un Conformador de Haz Digital con Sensores Acústicos

Autor: Federico-Carlos López-Villalta Barberán

[12]Hoja de especificaciones del integrado TDA2030a

<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/0f/a7/9c/08/83/f5/4d/6c/CD00000129.pdf/files/CD00000129.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000129.pdf>

[13]Hoja de especificaciones del integrado TDA7492

<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/f4/3e/da/a3/97/e7/4f/8d/CD00205863.pdf/files/CD00205863.pdf/jcr:content/translations/en.CD00205863.pdf>

[14]Hoja de especificaciones del integrado TDA7297

<http://www.radiovilag.hu/images/TDA7297.pdf>

ANEXO

BLOQUE 1: Reloj de los MEMS

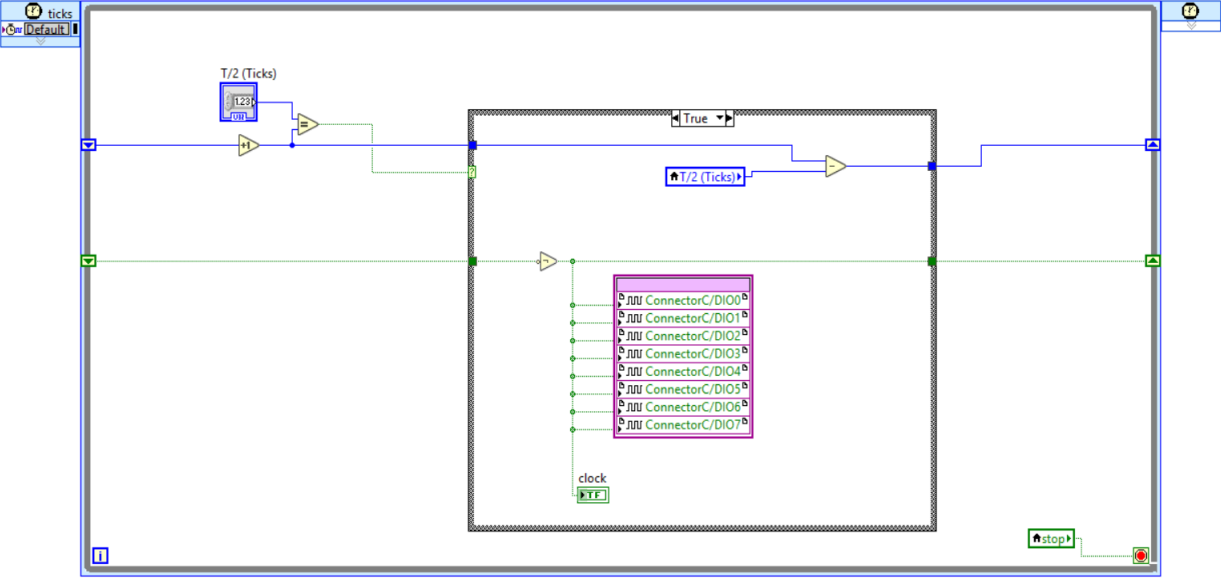
BLOQUE 2: Captura en la FPGA

BLOQUE 3: Sistema de Emisión en la FPGA

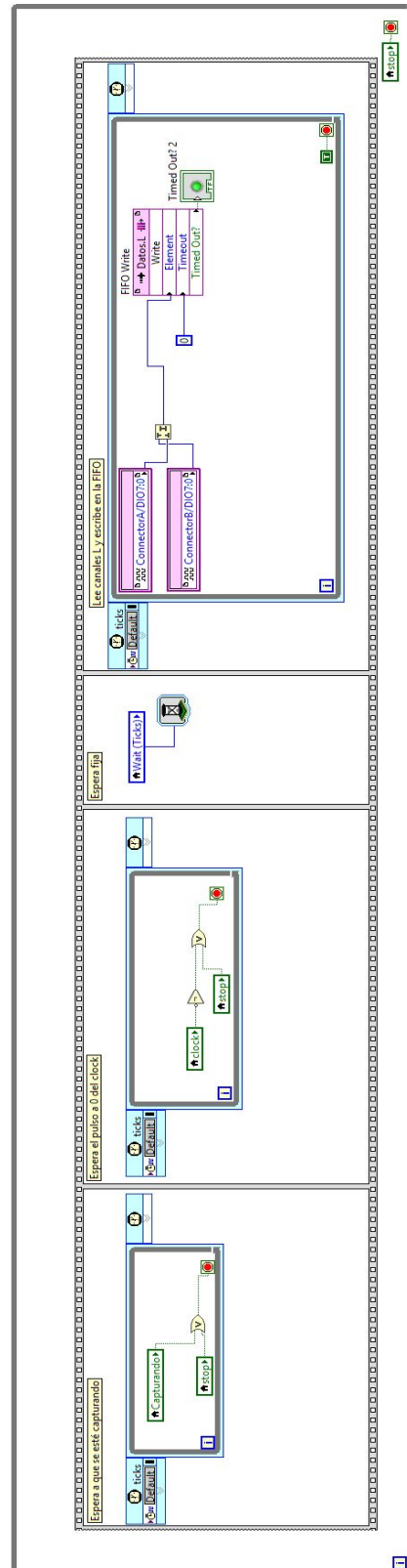
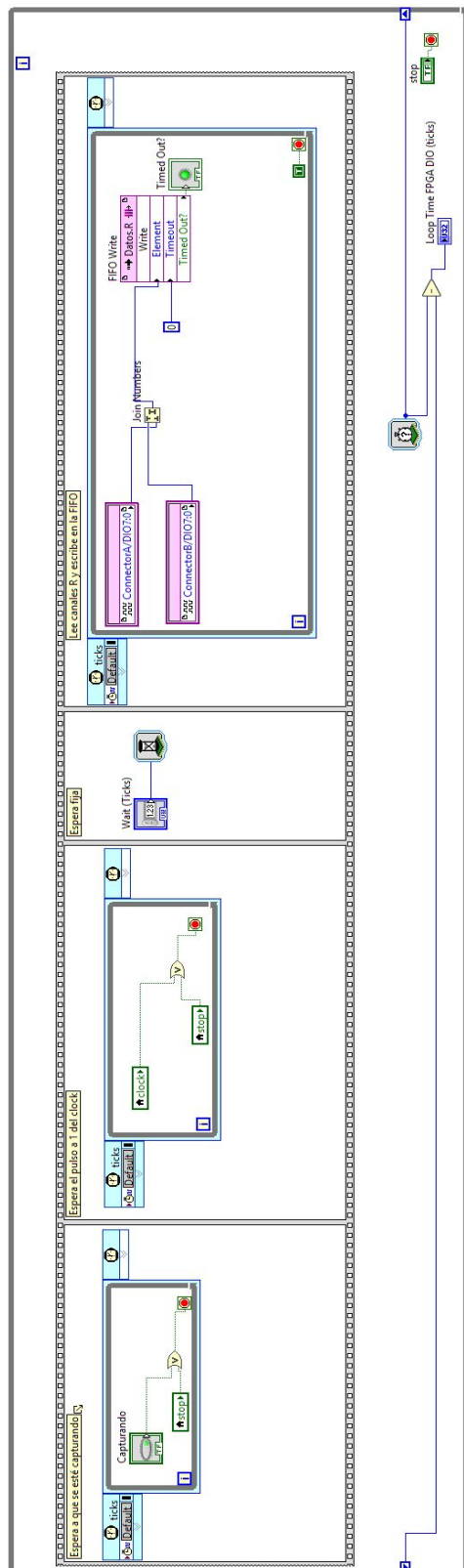
BLOQUE 4: Lectura de Datos de la FIFO y Diezmado

BLOQUE 5: Análisis Espectral mediante la DFT

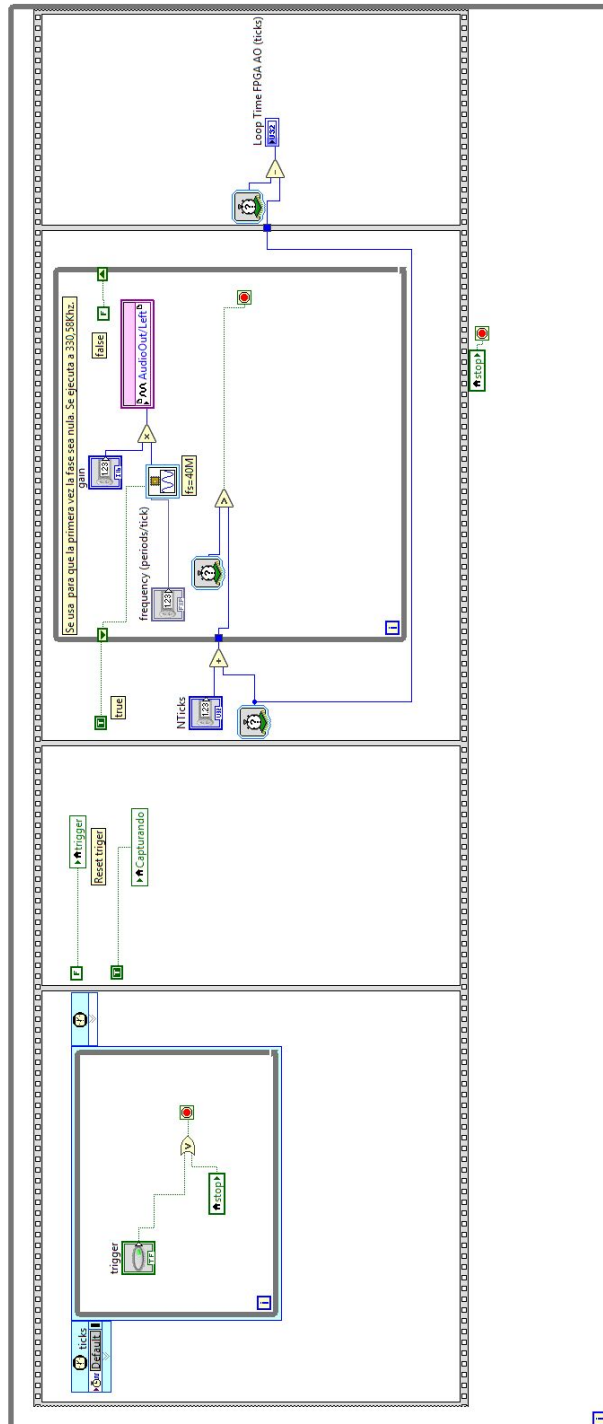
BLOQUE 1: RELOJ DE LOS MEMS



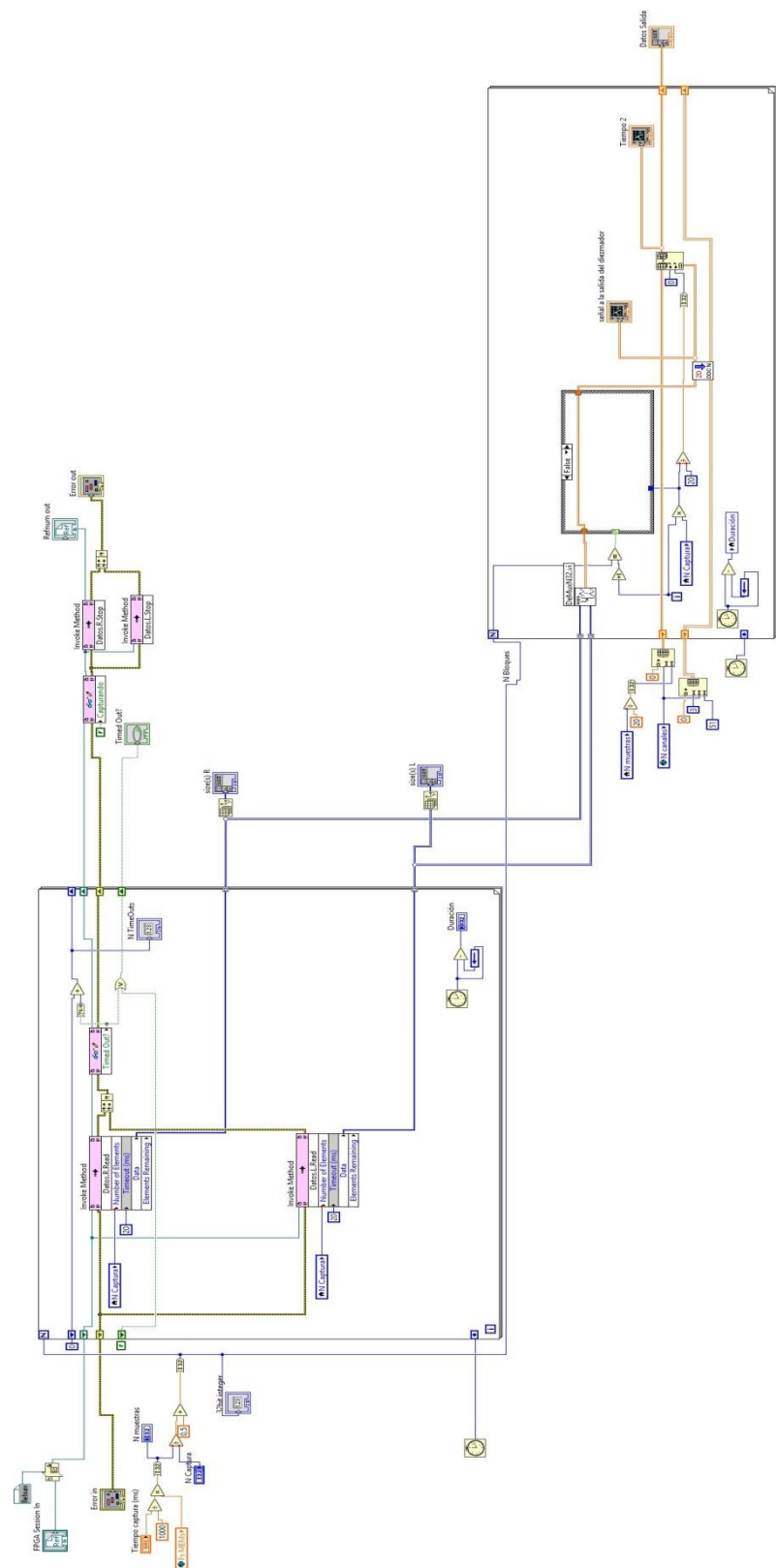
BLOQUE 2: CAPTURA EN LA FPGA



BLOQUE 3: SISTEMA DE EMISIÓN EN LA FPGA



BLOQUE 4: LECTURA DE DATOS DE LA FIFO Y DIEZMADO



BLOQUE 5: ANALISIS ESPECTRAL MEDIANTE LA DFT

