

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería de Tecnologías de
Telecomunicación

**Simulador de imágenes acústicas mediante
elementos finitos utilizando cámaras RGB
depth y sensores LiDAR 3D**

Autor: Sergio Canseco Lombraña

Tutor: Alberto Izquierdo Fuente

Julio 2022

RESUMEN DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es analizar y comparar las imágenes acústicas reales obtenidas con un sistema de adquisición acústico basado en un array extenso de micrófonos frente a las imágenes acústicas generadas por un simulador implementado en LabVIEW.

El simulador se basa en un modelo acústico pulso-eco, donde un transmisor genera una señal pulsada que se refleja en cada punto del objeto bajo estudio y es recogida por cada uno de los sensores del array de micrófonos. De este modo, el simulador genera como resultado señales 2D a partir de la nube de puntos que forman la superficie del objeto. Esta nube de puntos se obtiene mediante una cámara LiDAR o mediante un generador sintético de objetos.

Finalmente, con las señales 2D obtenidas y haciendo uso de la herramienta software ViSAM© desarrollada por el Grupo de Procesado en Array de la Universidad de Valladolid, se obtienen las imágenes acústicas sintetizadas mediante técnicas de conformación de haz.

ABSTRACT

The objective of this project is to analyze and compare the real acoustic images obtained with an acoustic acquisition system based on an extensive array of microphones against the acoustic images generated by a simulator implemented in LabVIEW.

The simulator is based on a pulse-echo acoustic model, where a transmitter generates a pulsed signal that is reflected at each point of the object under study and is collected by each of the sensors in the microphone array. This way, the simulator generates as a result 2D signals from the cloud of points that form the surface of the object. This point cloud is obtained by a LiDAR camera or by a synthetic object generator.

Finally, with the 2D signals obtained and making use of the ViSAM© software tool developed by the Array Processing Group of the University of Valladolid, the acoustic images synthesized by beamforming techniques are obtained.

PALABRAS CLAVE

Radar, LiDAR, SODAR, conformación de haz, imagen acústica.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y mi hermano, cuyo apoyo todos estos años ha sido fundamental.

A mis amigos y compañeros con los que he compartido esta etapa.

Índice General

1. Introducción	8
1.1 Introducción	8
1.2 Objetivos	8
1.3 Requisitos funcionales del proyecto	8
2. Radar	10
2.1 Introducción	10
2.2 Radar electromagnético	10
2.2.1 Historia	10
2.2.2 Funcionamiento	11
2.2.3 Ecuación radar	12
2.2.4 Medidas con radar	12
2.2.5 Interferencias	13
2.2.6 Tipos de radar	14
2.2.7 Ámbitos de aplicación	15
3. LiDAR	16
3.1 Introducción	16
3.2 Historia	16
3.3 Funcionamiento	16
3.4 Componentes	17
3.5 Tipos de LiDAR	18
3.6 Ámbitos de aplicación	18
4. SODAR	21
4.1 Introducción	21
4.2 Funcionamiento	21
4.3 Historia	21
4.4 Tipos de SODAR	22
4.5 Aplicaciones	22
5. Procesado espacial: <i>Beamforming</i>	24
5.1 Introducción	24
5.2 <i>Beamforming</i>	24
5.3 Algoritmo <i>Delay and Sum</i>	24
6. Recursos	26
6.1 Recursos hardware	26
6.1.1 Sistema de adquisición acústico SAM	26
6.1.2 Cámara Intel RealSense LiDAR L515	27
6.2 Recursos software	29
6.2.1 LabVIEW	29
6.2.2 ViSAM© - CaSAM©	30

7. Diseño e implementación	32
7.1 Introducción	32
7.2 Metodología de trabajo	32
7.2.1 Adquisición de señales acústicas sintéticas y generación de imágenes 3D	32
7.2.2 Adquisición de señales acústicas reales y generación de imágenes 3D	33
7.3 Modelo acústico de reflexión	33
7.3.1 Generación de la señal original	34
7.3.2 Generación de los objetos	35
7.3.3 Cálculo de distancias	36
7.3.4 Señal reflejada	41
7.4 Diseño de escenarios	42
7.4.1 Objeto puntual – VI_BlancoPuntual.vi	42
7.4.2 Plano – Generador_fichero_Plano.vi	44
7.4.3 Semicilindro – Generador_fichero_Cilindro.vi	46
7.4.4 Semiesfera – Generador_fichero_Esfera.vi	47
8. Resultados	49
8.1 Objetos simples	49
8.1.1 Semicilindro	49
8.1.2 Semiesfera	50
8.2 Objetos complejos – Personas	53
8.2.1 Modelado de una persona mediante esferas	53
8.2.2 Persona real	55
9. Conclusiones	59
10. Referencias	60

Índice de figuras

Figura 1: Esquema de funcionamiento del radar.	11
Figura 2: Funcionamiento de un sistema Lidar.	16
Figura 3: Ejemplo de aplicación de un sistema Lidar.	17
Figura 4: Uso de lidar en topografía.	19
Figura 5: Modelado 3D de un yacimiento arqueológico mediante lidar.	20
Figura 6: Funcionamiento de un radar acústico.	21
Figura 7: ART Model VT-1.	22
Figura 8: Funcionamiento de un sodar monoestático.	23
Figura 9: Delay & Sum Beamforming.	24
Figura 10: Componentes del sistema de adquisición acústico basado en MEMS (SAM).	26
Figura 11: Cámara LiDAR, Array de micrófonos y tweeter empleados en el proyecto	26
Figura 12: NI myRIO.	27
Figura 13: Intel RealSense LiDAR Camera L515.	27
Figura 14: Cámara utilizada en el proyecto.	28
Figura 15: Comparativa entre imagen cromática e imagen de profundidad.	28
Figura 16: Ejemplo de Panel frontal.	30
Figura 17: Ejemplo de Diagrama de bloques.	30
Figura 18: Entorno gráfico de la herramienta software ViSAM.	31
Figura 19: Esquema de la adquisición de señales acústicas sintéticas y generación de imágenes 3D.	32
Figura 20: Esquema de la adquisición de señales acústicas reales y generación de imágenes 3D.	33
Figura 21: Esquema del modelo acústico de reflexión.	33
Figura 22: Sistema de coordenadas empleado en el simulador.	34
Figura 23: Señal emitida.	35
Figura 24: Cluster con las coordenadas del altavoz.	35
Figura 25: (a) Controles para la generación de un plano. (b) Puntos que forman el plano.	36
Figura 26: (a) Controles para la generación de un semicilindro. (b) Puntos que forman el semicilindro.	37
Figura 27: Visualización del semicilindro generado.	38
Figura 28: (a) Controles para la generación de una semiesfera. (b) Puntos que forman la semiesfera.	39
Figura 29: Visualización de la semiesfera generada.	40
Figura 30: Diagrama de bloques del VI d_total.vi	40
Figura 31: Diagrama de bloques del VI media_distancia.vi	41
Figura 32: Diagrama de bloques del VI Generador_Array.vi	42

Figura 33: Señal recibida	42
Figura 34: Diagrama de bloques de VI_BlancoPuntual.vi	43
Figura 35: Panel frontal de VI_BlancoPuntual.vi	43
Figura 36: Diagrama de bloques del VI Generador_fichero_Plano.vi	44
Figura 37: Panel frontal de Generador_fichero_Plano.vi	45
Figura 38: Diagrama de bloques del VI Generador_fichero_Cilindro.vi	46
Figura 39: Panel frontal de Generador_fichero_Cilindro.vi	46
Figura 40: Diagrama de bloques del VI Generador_fichero_Esfera.vi	47
Figura 41: Panel frontal de Generador_fichero_Esfera.vi	48
Figura 42: Imágenes acústicas obtenidas a partir de: (a) Cilindro real. (b) Semicilindro sintético. (c) Puntos LiDAR de un cilindro real.	49
Figura 43: Imágenes acústicas obtenidas a partir de: (a) Esfera real. (b) Semiesfera sintética. (c) Puntos LiDAR de una esfera real.	50
Figura 44: Imágenes acústicas obtenidas a partir de esferas sintéticas de radio: (a) Radio = 18 cm. (b) Radio = 23 cm. (c) Radio = 27 cm (d) Radio = 36 cm.	51
Figura 45: Imágenes acústicas de una esfera sintética de 9 cm de radio situada a 1,9 m y a una altura: (a) 0 cm sobre el origen. (b) 20 cm sobre el origen. (c) 40 cm sobre el origen. (d) 60 cm sobre el origen. (e) 80 cm sobre el origen. (f) 30 cm sobre el origen y 50 cm en la coordenada x.	52
Figura 46: Tabla con las coordenadas de las 7 esferas que modelan una persona.	53
Figura 47: (a) Visualización de las 7 esferas reales. (b) Visualización de las esferas 7 esferas sintéticas.	53
Figura 48: Imágenes acústicas obtenidas a partir de: (a) 7 esferas reales. (b) 7 esferas sintéticas. (c) Puntos LiDAR de 7 esferas.	54
Figura 49: (a) Vista lateral de las 7 esferas sintéticas. (b) Vista de los puntos LiDAR de las 7 esferas.	54
Figura 50: Comparativa entre: (a) Imagen acústica obtenida a partir de 7 esferas reales. (b) Imagen acústica obtenida a partir de 7 puntos colocados en las posiciones de las esferas.	55
Figura 51: Nube de puntos LiDAR de una persona con los brazos extendidos.	56
Figura 52: (a) Imagen acústica real de una persona con los brazos extendidos. (b) Imagen acústica sintética generada a partir de la nube de puntos LiDAR de una persona con los brazos extendidos.	56
Figura 53: Nube de puntos LiDAR de la persona con los brazos no extendidos.	57
Figura 54: (a) Imagen acústica real de una persona con los brazos no extendidos. (b) Imagen acústica sintética generada a partir de la nube de puntos LiDAR de una persona con los brazos no extendidos.	57

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La presente memoria pretende detallar el diseño y desarrollo de un proyecto software mediante la herramienta LabVIEW que permite obtener imágenes acústicas a partir de imágenes 3D capturadas con una cámara LiDAR y la posterior comparación de estas imágenes con las imágenes acústicas reales.

Este proyecto está enmarcado dentro de los trabajos de fin de carrera que oferta el Grupo de Procesado en Array de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación.

En los siguientes capítulos se explicarán los siguientes conceptos:

- Un sistema radar (*Radio Detection And Ranging*) es un equipo que emplea ondas electromagnéticas para la detección y medición de distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos como aeronaves, barcos o vehículos. Su funcionamiento se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos y la reflexión de estos sobre los objetos físicos. De este modo, al recibir la onda reflejada en el objeto obtenemos diversa información sobre el mismo, como la distancia a la que se encuentra, a la velocidad a la que se mueve, su posición relativa respecto al sistema de radar, así como su forma física.
- Un sistema lidar (*Light Detection and Ranging*) es un dispositivo que permite determinar la distancia a la que se encuentra un objeto utilizando la emisión de pulsos de láser y midiendo el tiempo que transcurre hasta que se recibe la señal reflejada. Las principales aplicaciones de la tecnología lidar están en geología y sismología.
- Para el procesamiento de las señales se empleó la técnica de conformado de haz o beamforming basada en el algoritmo delay and sum con el que las señales recibidas por cada micrófono del array son retardadas un tiempo concreto con el objetivo de determinar la posición del emisor.

1.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es el diseño de un simulador que permita la obtención de imágenes acústicas a partir de la nube de puntos 3D capturada con la cámara LiDAR o generada de forma artificial con el simulador desarrollado en LabVIEW. Posteriormente, se analizarán y compararán las imágenes acústicas generadas por el simulador con las imágenes acústicas reales obtenidas mediante un sistema de adquisición acústico basado en MEMS (SAM) junto con los programas CaSAM© y ViSAM© de procesamiento espacial desarrollados por el Grupo de Procesado en Array de la Universidad de Valladolid.

1.3 Requisitos funcionales del proyecto

En este proyecto, el usuario interactúa con el simulador a través del Panel de Control del propio LabVIEW desde el cual podrá modificar los distintos parámetros, así como visualizar los resultados que proporcione la ejecución del programa.

VARIABLES DE CONTROL QUE SE PUEDEN MODIFICAR:

- Generación de señales:
 - Amplitud de la señal generada
 - Frecuencia de la señal

- Duración del pulso
- Tiempo de captura
- Frecuencia de muestreo
- Posición de los objetos:
 - Coordenadas del emisor del pulso
 - Coordenadas del objeto de interés
 - Coordenadas del array que recibe la señal reflejada
- Control de flujo del programa:
 - Comienzo y parada de las ejecuciones

Los siguientes indicadores permiten una mejor visualización de los resultados obtenidos:

- Distancia a la que se encuentra el objeto. En caso de que el objeto de interés esté formado por más de un punto, podemos saber la distancia a la que se encuentra cada uno de los puntos.
- Señal reflejada

Se añade también información adicional que facilita la comprensión del funcionamiento del programa y la obtención de los resultados:

- Señal generada por el emisor: representación gráfica de un pulso con una frecuencia, duración y amplitud determinadas.
- Señal adquirida por el micrófono: en caso de tener más de un micrófono tendremos también más de una señal recibida con su correspondiente representación gráfica.
- Errores, interrupciones e incidencias de ejecución.

2 RADAR

2.1 Introducción

Dado que en este proyecto se hace uso de técnicas de procesamiento de señales presentes en aplicaciones de radar se procederá a introducir el funcionamiento de esta tecnología junto con otros conceptos importantes.

2.2 Radar electromagnético

Un sistema radar consiste en un dispositivo electrónico que emplea ondas electromagnéticas para determinar distancias, velocidad, dirección y altitud de objetos. El funcionamiento se basa en la emisión de pulsos de radio que se reflejan en el objeto de interés y en la posterior recepción del eco. [1]

2.2.1 Historia

Como bien es sabido, gran parte del desarrollo tecnológico a lo largo de la historia ha estado motivado por conflictos bélicos y el caso del radar es un ejemplo de ello. También cabe destacar algunos estudios anteriores sobre electromagnetismo que permitieron el desarrollo de esta herramienta.

James Clerk Maxwell (Edimburgo, Escocia, 13 de junio de 1831 – Cambridge, Inglaterra, 5 de noviembre de 1879) publica en 1865 *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* sentando las bases del electromagnetismo.

Otro hito relevante que permitió la aparición del radar se produjo en 1886 cuando el físico alemán **Heinrich Rudolf Hertz** (Hamburgo, Confederación Germánica, 22 de enero de 1857 – Bonn, Imperio Alemán, 1 de enero de 1894) demostró que las ondas electromagnéticas se reflejan en superficies metálicas.

El descubrimiento de Hertz sirvió al alemán **Christian Huelsmeyer** para patentar en 1904 un sistema anticolidión de buques denominado “telemobilescope”.

Una aportación importante fue la de **Nikola Tesla** (1856-1943) que en 1917 estableció los principios teóricos acerca de la frecuencia y los niveles de potencia de las señales.

Como ya se comentó anteriormente, la década de 1930 y la Segunda Guerra Mundial fue un periodo de gran avance tecnológico.

En Alemania, la GEMA (Gesellschaft für Elektroakustische und Mechanische Apparate) crea en 1934 un magnetrón capaz de trabajar a 650 MHz y que posteriormente daría lugar al radar de vigilancia aérea Freya que solamente podía trabajar en superficie debido a sus grandes dimensiones por lo que se desarrolló otra versión llamada Seetakt que podía ser incorporado a los buques. Con el estallido de la guerra, la industria alemana comenzó a centrarse en el sector armamentístico. De este modo, la empresa Telefunken lanza en 1941 el radar Würzburg que incorporaba una antena parabólica giratoria. Así, el Freya, el Würzburg y el Seetakt fueron la base de la defensa de Alemania durante el conflicto.

En cuanto a Estados Unidos, en el NRL (Naval Research Laboratory) se comenzó a diseñar a principio de los años 30 el primer radar de impulsos, el cual seguirían perfeccionando hasta obtener la versión definitiva en 1936 que era capaz de detectar un bombardero a 40 km. Otro logro del NRL fue la posibilidad de utilizar la misma antena para emisión y recepción.

Reino Unido fundó en 1927 la RSS (*Radio Research Station*) la cual centró sus primeras investigaciones en la creación de un “rayo de la muerte” con el que pretendían atacar a los aviones

enemigos y elevar la temperatura del piloto hasta provocarle fiebre. Observaron que la fabricación de esta arma no sería posible pero las investigaciones realizadas sirvieron para el desarrollo de la tecnología radar.

El modelo actual de radar fue desarrollado en 1935 por el ingeniero y físico escocés **Robert Watson-Watt** (Brechin, Escocia, 13 de abril de 1892 – Inverness, Reino Unido, 5 de diciembre de 1973). La demostración de su funcionamiento recibió el nombre de Experimento Daventry y tuvo lugar en febrero de 1935 en Northamptonshire. Para la prueba hicieron volar un avión de combate entre una línea de estaciones de la BBC y las ondas reflejadas en el avión fueron recibidas por un dispositivo situado a 13 km. El hecho de que esta tecnología se desarrollase unos años antes de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) supuso una importante ventaja para las fuerzas aéreas británicas.

La aparición del radar también dio lugar a técnicas cuyo objetivo era contrarrestarlo. Un ejemplo son los señuelos radar o *chaff* que consiste en la propagación de pequeñas piezas de aluminio o fibra de vidrio metalizada desde aeronaves con el objetivo de provocar *clutter* en el radar y evitar ser detectado.

2.2.2 Funcionamiento

El funcionamiento de un sistema radar se basa en la emisión de pulsos electromagnéticos y en la reflexión de estos sobre la superficie de los objetos.

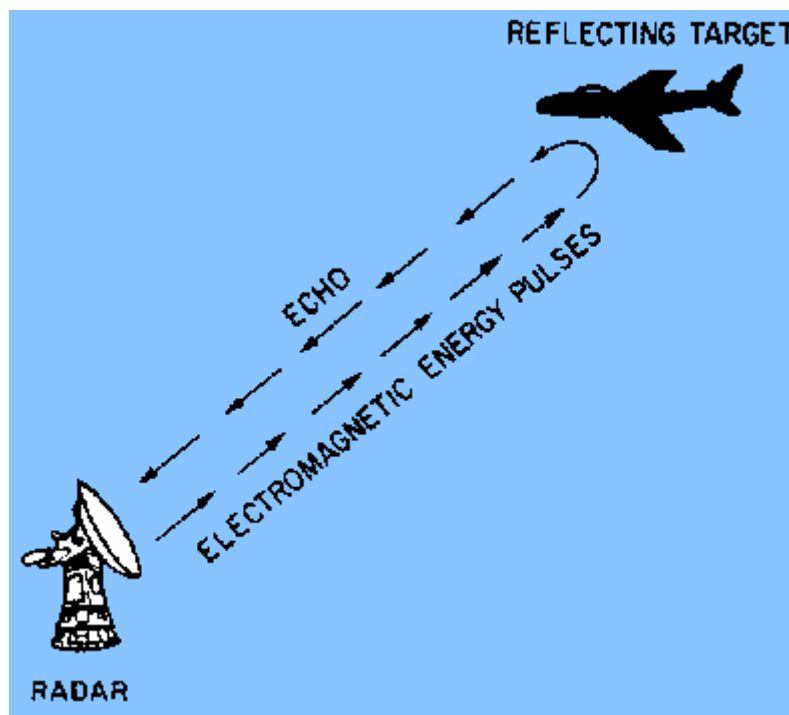


Figura 2: Esquema de funcionamiento del radar.

La reflexión se produce cuando existen cambios significativos en las constantes dieléctricas o diamagnéticas y depende de los siguientes aspectos:

- Longitud de onda de la señal emitida: con una longitud de onda mucho menor que las dimensiones del blanco, la onda rebota como hace la luz sobre un espejo.

- Forma física del objeto: la forma que tenga la superficie sobre la que se refleja la onda determina el ángulo de incidencia de la señal emitida. El comportamiento será distinto si la superficie de reflexión es lisa, curva o tiene esquinas. Por este motivo, para evitar ser detectados por sistemas radar, los aviones furtivos suelen tener una superficie angulosa.
- Material del objeto: las ondas electromagnéticas se dispersan cuando se produce un cambio en las constantes dieléctricas y diamagnéticas. Por este motivo, objetos hechos de material conductor son fácilmente detectables por sistemas rada, mientras que materiales resistivos y magnéticos absorben la señal electromagnética y minimizan la reflexión por lo que son ampliamente utilizados en la fabricación de aviones de combate.

2.2.3 Ecuación radar

La potencia reflejada P_r viene dada por la ecuación radar:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2}$$

donde

- P_t : potencia transmitida
- G_t : ganancia de la antena de transmisión
- A_r : área efectiva de la antena de recepción
- σ : coeficiente de decaimiento del objetivo
- F : factor de propagación
- R_t : distancia del transmisor al objetivo
- R_r : distancia del objetivo al receptor

2.2.4 Medidas con radar

Como ya se comentó anteriormente, con un radar podemos conocer la posición, la velocidad o la dirección del objetivo. A continuación, se describen los cálculos necesarios para determinar cada uno de los parámetros anteriores:

- **Distancia**

Podemos calcular la distancia a la que se encuentra el objeto midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión de la señal y la recepción del eco, y conociendo que las señales electromagnéticas se propagan en línea recta a la velocidad de la luz. Así, la distancia será la mitad del tiempo que tardamos en detectar el eco multiplicado por la velocidad del pulso.

$$R = \frac{c \cdot t}{2} \text{ [m]}$$

donde:

- R : distancia a la que se encuentra el blanco
- c : velocidad de la luz, típicamente 300.000 kms/s
- t : retardo entre la señal emitida y el eco

La mayoría de radares emplea la misma antena para envío y recepción y separan la circuitería de transmisión y recepción mediante un diplexor. Por este motivo, no se puede recibir ecos mientras se está enviando el pulso. Del mismo modo que para detectar objetos muy cercanos es necesario enviar pulsos más cortos, hay una distancia máxima de detección dado que si un eco llega cuando se está enviando el siguiente pulso, el receptor no podrá distinguirlos. Aumentando el tiempo entre pulsos se incrementa la distancia máxima detectable. Debido a estos dos factores, existe un compromiso entre detección a corta y a larga distancia:

- Detección a corta distancia: los pulsos deben ser más cortos y de menor potencia, lo que implica ecos más débiles.
- Detección a larga distancia: el tiempo de pulso y el tiempo entre pulsos deben ser mayores, lo que implica que los ecos de objetos cercanos lleguen cuando todavía no se terminado de enviar el pulso.

La combinación de tiempo entre pulsos T y el tiempo de pulso τ recibe el nombre de “patrón de pulsos”.

- **Dirección**

Para determinar la posición exacta del objeto es necesario conocer, además de la distancia, la dirección en que se encuentra el objeto. Esta dirección será la dirección angular en la que apunta la antena. Por ello, se emplean antena de gran directividad ya que tiene un ancho de haz más estrecho y permiten calcular la dirección con mayor precisión.

- **Velocidad**

Para la medida de velocidades existen dos alternativas:

- Memoria: si dotamos al radar de memoria podremos guardar el instante de tiempo y la anterior posición en la que se encontró el objetivo que junto con la posición e instantes actuales nos permitirá calcular la velocidad del objeto.
- Efecto Doppler: es un fenómeno que consiste en un cambio de frecuencia aparente de una onda debida al movimiento relativo entre la fuente y el receptor. Es decir, cuando una onda electromagnética impacta contra un objeto en movimiento la frecuencia de la señal recibida es distinta a la de la señal emitida.

2.2.5 Interferencias

A la hora de usar un sistema radar pueden estar presentes señales no deseadas que dificulten la detección del objetivo. Estas señales espurias pueden estar generadas por fuentes externas o por el propio sistema radar.

La capacidad de un radar a hacer frente al efecto de estas señales viene determinada por la relación señal/ruido (SNR). De este modo, un valor alto de SNR significa que el radar será capaz de distinguir entre los objetos de interés de otros que introducen señales espurias.

- **Clutter**

El término *clutter* hace referencia a las señales de eco no deseadas que recibe el sistema radar. Estas señales aparecen debido al impacto de la señal transmitida contra objetos que no son el blanco que se pretende detectar, como pueden ser las precipitaciones, animales o edificios. Los señuelos radar o *chaff* son una contramedida de radar con la que evitar ser detectado.

Gran parte de las técnicas para neutralizar el clutter se basan en el hecho de que apenas hay variaciones de detección entre diferentes barridos de radar. De este modo radares con memoria pueden neutralizarlo fácilmente.

- **Ruido**

El ruido es el conjunto de señales electromagnéticas que forman parte del fondo sobre el que hay que detectar el eco de la señal transmitida por el radar. Este puede ser generado por fuentes internas como los componentes electrónicos del sistema radar o también por fuentes externas como la radiación térmica del entorno del objetivo a detectar. De este modo cuanto menor sea la potencia de la señal de eco más difícil será diferenciarla del fondo que forman las señales de ruido.

- **Jamming**

Está formado por señales externas al sistema radar que se emiten a la misma frecuencia a la que funciona este. El *jamming* puede provocarse de forma intencionada por sistemas cuya finalidad es neutralizar el efecto del sistema radar. Los efectos del *jamming* son problemáticos ya que, por lo general, las señales que lo provocan tienen mayor potencia que el eco de la señal de interés puesto que este recorre un camino de ida y vuelta mientras que las señales de *jamming* únicamente hacen un camino de ida. El *jamming* que llega en línea recta al radar se denomina *jamming* de lóbulo principal y se puede minimizar su efecto disminuyendo el ángulo sólido del lóbulo principal. Otras técnicas de disminución de *jamming* son el uso de una determinada polarización (distinta a la de la señal de *jamming*) en el radar o el uso de espectros ensanchados mediante saltos en frecuencia (*Frequency Hopping*) que consiste en generar aleatoriamente cambios en la frecuencia de trabajo.

2.2.6 Tipos de radar

- **Según la señal transmitida**

- Radar de onda pulsada: se transmite periódicamente un pulso y se mide el tiempo que transcurre hasta que se recibe el eco. Conociendo este tiempo y la velocidad a la que viaja la señal transmitida se calcula la distancia a la que se encuentra el blanco.
- Radar de onda continua (CW): en lugar de emitir pequeños pulsos se envía una señal continua. Existen dos tipos:
 - Radar *Doppler*: se emplea para detectar la velocidad de los objetivos haciendo uso del efecto Doppler, es decir, enviando una señal cuya onda reflejada contra el blanco tendrá una frecuencia distinta a la de la señal transmitida en un primer momento. De este modo, observando la variación en frecuencia de las señales transmitida y recibida se puede calcular la velocidad a la que se mueve el objetivo.
 - Modulación CW-FM o CW-PM: a la señal transmitida se le añade una modulación de fase o frecuencia que permite saber en qué momento se emitió la señal correspondiente a un eco recibido.

- **Según el blanco**

- Radar primario: funciona con independencia del blanco.
- Radar secundario: se produce una interacción entre radar y blanco, que suele consistir en el envío de una serie de datos.

- **Según el número de antenas**

- Monoestático: una única antena transmisora y receptora.
- Biestático: antenas distintas para transmisión y recepción que además pueden situarse en distintos lugares.

- Multiestático: combina la información recibida por varias antenas.
- **Según su finalidad**
 - Radar de seguimiento: en el ámbito militar se emplean radares capaces de seguir el movimiento que realiza un objetivo.
 - Radar de búsqueda: su función es detectar los objetivos que se encuentran en una determinada región.
- **Según la frecuencia de trabajo**
 - Banda HF (3-30 MHz): radares de vigilancia costera y vigilancia OTH (*over-the-horizon*)
 - Banda VHF (50-330 MHz): vigilancia a grandes distancias.
 - Banda UHF (300-1000 MHz):

2.2.7 Ámbitos de aplicación

Los sistemas radar tienen múltiples aplicaciones entre las cuales destacan:

- **Militar**

Como ya se comentó anteriormente el origen del radar es resultado de investigaciones con fines militares. Algunos sistemas radar empleados en el ámbito militar son los radares de detección terrestre o los radares de misiles autoguiados.

- **Aeronáutico**

En el ámbito aeronáutico los radares son ampliamente utilizados para control de tráfico aéreo o para navegación.

- **Marítimo**

En este ámbito también se suele usar sistemas radar para navegación.

- **Circulación**

Las autoridades los emplean para control de velocidad de los vehículos en carreteras y autopistas.

- **Científico**

Los sistemas radar tienen multitud de aplicaciones científicas como pueden ser la observación de la Tierra o búsqueda de yacimientos arqueológicos.

- **Meteorológico**

Se emplean para detección de fenómenos meteorológicos.

3 LIDAR

3.1 Introducción

LiDAR es el acrónimo de *Light Detection and Ranging* y es una tecnología que emplea rayos láser para crear representaciones 3D del entorno. [2]

3.2 Historia

La tecnología lidar es relativamente reciente ya que comenzó a desarrollarse en la década de 1960. Las aplicaciones que tuvieron los primeros sistemas lidar pertenecían al ámbito de la batimetría y modelado de terrenos. Las limitaciones debidas a la falta de una referencia geográfica precisa se solucionaron con el desarrollo de sistemas de posicionamiento global (GPS) y de navegación inercial (INS).

3.3 Funcionamiento

Su funcionamiento se basa en la emisión de pulsos láser por parte del sensor lidar. Estos pulsos rebotan en los objetos del entorno y son captados de nuevo por el sensor. De este modo, midiendo el tiempo que tardó cada pulso en volver al sensor se calcula la distancia que recorrió.

Esta técnica se conoce como método TOF (*Time Of Flight*) y consiste en emitir periódicamente pulsos láser infrarrojos hacia el objetivo, el cual refleja los fotones de vuelta hacia el sensor.

Repetiendo este proceso millones de veces por segundo permite crear mapas 3D del entorno con gran precisión y en tiempo real.

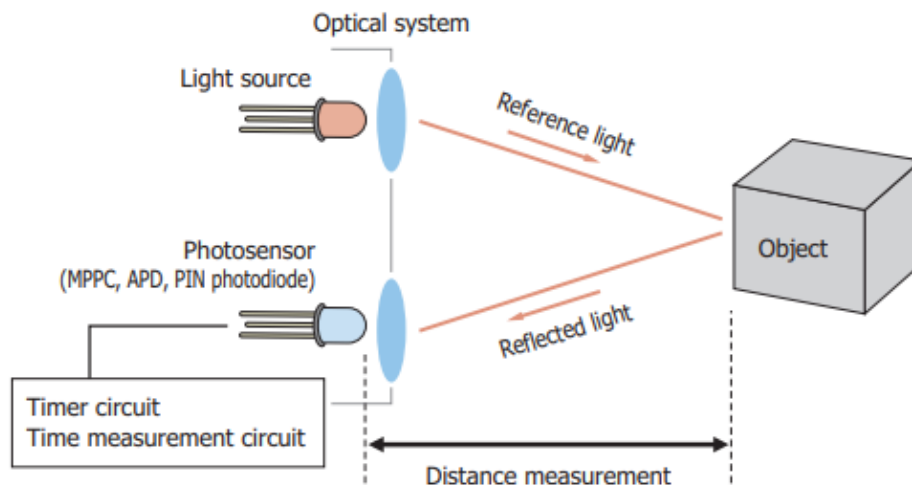


Figura 2: Funcionamiento de un sistema Lidar.

La ecuación que permite conocer la distancia a la que se encuentra un objeto es la siguiente:

$$R = \frac{c \cdot t}{2} \text{ [m]}$$

donde:

- R: distancia a la que se encuentra el objeto

- c: velocidad de la luz, típicamente 300.000 kms/s
- t: tiempo que tarda en recibirse la señal reflejada

Otro parámetro importante de un sistema lidar es la resolución, que viene determinada por la velocidad del avión en el que vaya embarcado el lidar, la altitud del vuelo, la tasa de emisión de pulsos y el FOV (*Field Of View*). El campo de visión o FOV es el ángulo a través del cual el sensor es capaz de detectar el rayo láser que se desea capturar.

3.4 Componentes

Un sistema lidar está compuesto por distintas partes, cada una de las cuales desempeña una función:

- **Láser**

Emite periódicamente pulsos de luz infrarroja de baja potencia lo que hace que no sea dañino para el ojo humano.

- **Scanner**

Está formado por pequeños espejos que dirigen el haz del láser. Por otro lado, es el encargado de detectar el reflejo del pulso de luz emitido.

- **GPS**

El sistema de posicionamiento global es el encargado de recopilar las posiciones geográficas del escáner.

- **IMU**

La función de la unidad de medida inercial es medir la orientación angular (cabeceo, inclinación y vuelco) del escáner respecto de la superficie.

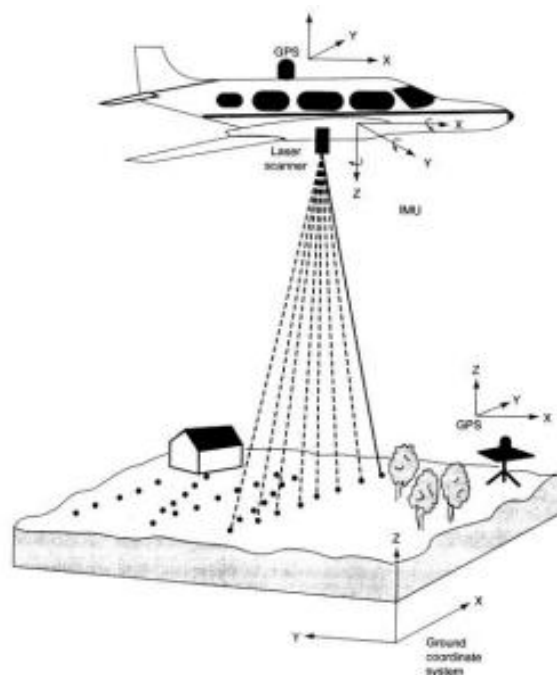


Figura 3: Ejemplo de aplicación de un sistema Lidar.

- **Reloj**

Calcula el tiempo que transcurre desde la emisión de un pulso hasta la recepción de su reflejo.

3.5 Tipos de lidar

Los sistemas lidar pueden clasificarse en dos categorías: [2]

- **Por el tipo de láser**
 - Lidar de pulsos: la distancia entre el sensor y el objeto se calcula midiendo el tiempo transcurrido desde que se emitió el pulso de luz hasta que fue recibido por el sensor.
 - Lidar de medición de fase: el funcionamiento consiste en la emisión de un pulso continuo y en el cálculo de la diferencia de fase entre el pulso emitido y el recibido.
- **Por el tipo de escaneado**
 - Lineal: el espejo que va desviando el rayo láser se mueve describiendo líneas paralelas.
 - Zigzag: el espejo se mueve en dos sentidos (ida y vuelta) y produce un patrón de escaneado en zigzag.
 - Elíptico: el láser es desviado utilizando dos espejos que producen un patrón de escaneado elíptico.
 - Fibra óptica: el rayo láser de la fibra central de un cable de fibra óptica es desviado por unos pequeños espejos hacia las fibras laterales. De este modo, se genera un patrón de escaneado con forma de circunferencias solapadas.

3.6 Ámbitos de aplicación

El lidar está presente en multitud de sectores, a continuación, se recogen algunas de las aplicaciones más destacadas.

- **Detección de velocidades**

En algunos países, la policía utiliza esta tecnología para controlar la velocidad de los vehículos dado que tiene algunas ventajas respecto al radar.

- Es más rápido, pudiendo proporcionar la velocidad de un vehículo en 3 décimas de segundo.
- Tiene mayor manejabilidad.
- Es más económico.
- El rayo láser diverge menos que en el caso del radar lo que permite apuntar a un vehículo en concreto sin que se produzcan interferencias debidas a los vehículos de alrededor.

- **Topografía**

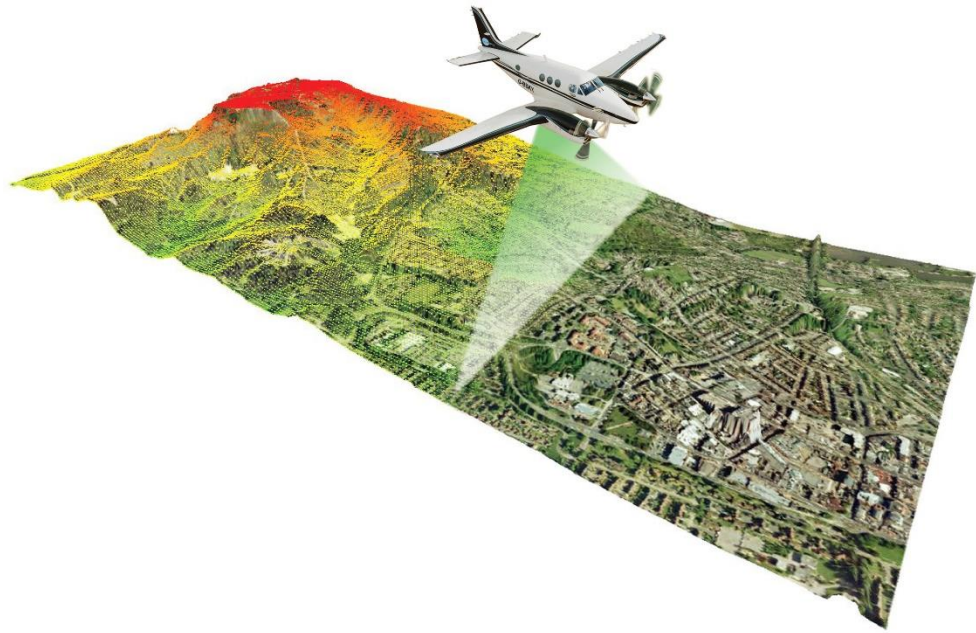


Figura 4: Uso de lidar en topografía.

La medición de distancia mediante lidar permite obtener mapas del terreno a gran escala. Con un lidar aerotransportado se pueden analizar terrenos de gran extensión en poco tiempo. Además, al contrario que otras tecnologías, se puede utilizar en condiciones de visibilidad reducida.

- **Biodiversidad**

Las imágenes proporcionadas por el lidar en estudios topográficos permiten evaluar el estado de los ecosistemas y así monitorizar diversos fenómenos como la deforestación, la erosión o cambios en el suelo.

- **Arqueología**

Un sistema lidar es capaz de atravesar vegetación densa y generar modelos 3D del terreno permitiendo identificar la posible existencia de ruinas u otros yacimientos arqueológicos. De este modo, los trabajos de excavación se realizan en las zonas con mayor potencial, reduciendo los costes del proyecto arqueológico.

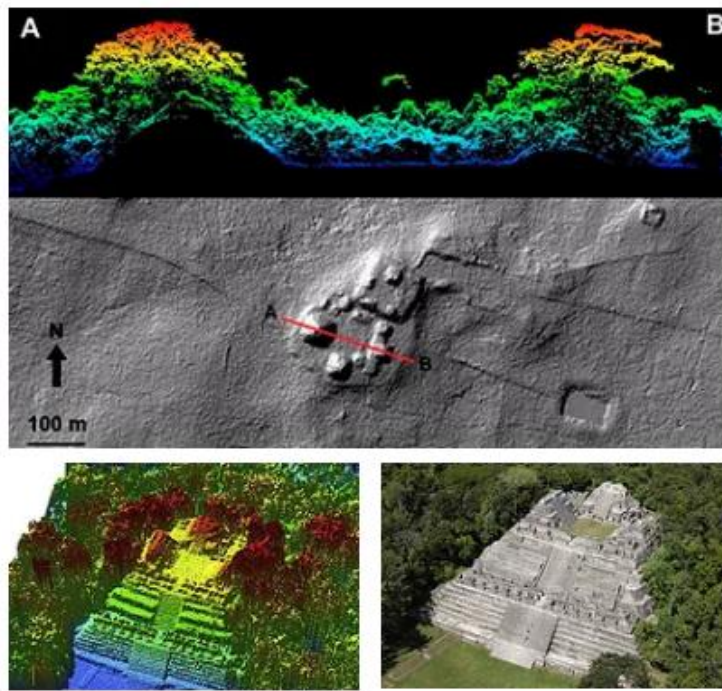


Figura 5: Modelado 3D de un yacimiento arqueológico mediante lidar.

- **Automoción**

La tecnología lidar está cobrando cada vez más importancia en el sector de la automoción, en concreto para el desarrollo de vehículos autónomos ya que combinada con otros sensores y con Inteligencia Artificial es capaz de ofrecer solución a los principales desafíos de la conducción autónoma.

4 SODAR (Radar acústico)

4.1 Introducción

SODAR (*Sound Detection And Ranging*) es una tecnología que combina conceptos de RADAR y SONAR y se emplea para la monitorización de fenómenos atmosféricos y detección de objetos en el espacio utilizando para ello ondas de sonido en lugar de ondas electromagnéticas.

4.2 Funcionamiento

El funcionamiento de un radar acústico se basa en la emisión de una onda de sonido y en el análisis de la reflexión de esta señal cuando choca con un objeto. Es importante la relación entre la longitud de onda de la señal emitida y el tamaño del objeto a detectar ya que señales de baja frecuencia tendrán una larga longitud de onda y es posible que, si el objeto es pequeño, apenas dé lugar a una onda reflejada. Por ello, se emplean señales de alta frecuencia con una pequeña longitud de onda para tratar de asegurar que produce reflexión sobre el objeto.

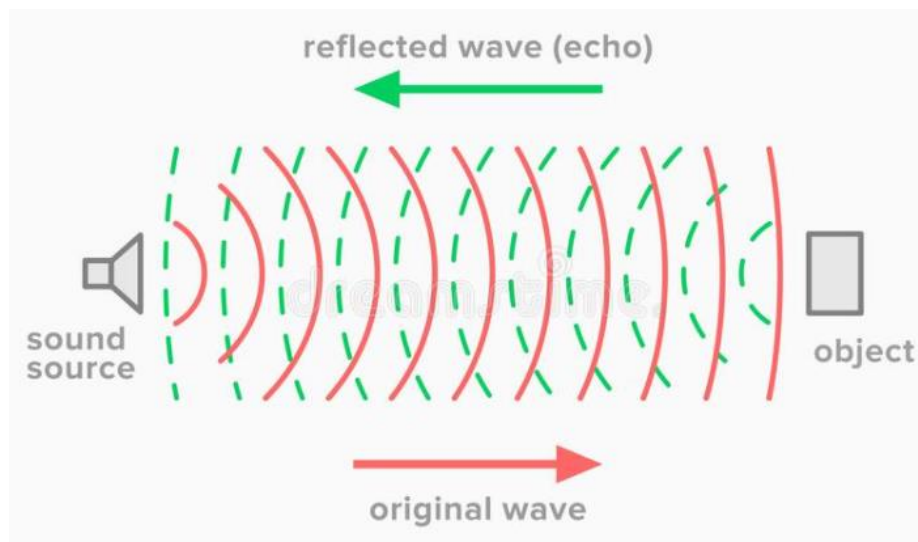


Figura 6: Funcionamiento de un radar acústico.

4.3 Historia

La propagación del sonido ha sido objeto de estudio durante los últimos 200 años, pero no ha sido hasta hace poco cuando se ha empezado a utilizar los conocimientos sobre dispersión acústica para estudiar, por ejemplo, la estructura de la atmósfera. [3]

Durante la Segunda Guerra Mundial se empleó para determinar la influencia de la capa baja de la atmósfera en enlaces que operaban en el rango de microondas.

En las décadas siguientes, diversos grupos de investigación centraron sus estudios en esta cuestión, entre ellas la Administración Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA)

demonstró la utilidad del radar acústico para monitorizar el viento y la temperatura en la atmósfera.

A finales de la década de 1990, se desarrolló el sistema sodar ART Model VT-1 que empleaba un ordenador portátil y baterías lo que permitía usarlo en prácticamente cualquier ubicación. Además, era casi inmune al ruido ambiental y al clutter del suelo debido a que operaba a altas frecuencias y presentaba una buena relación lóbulo principal a secundario.

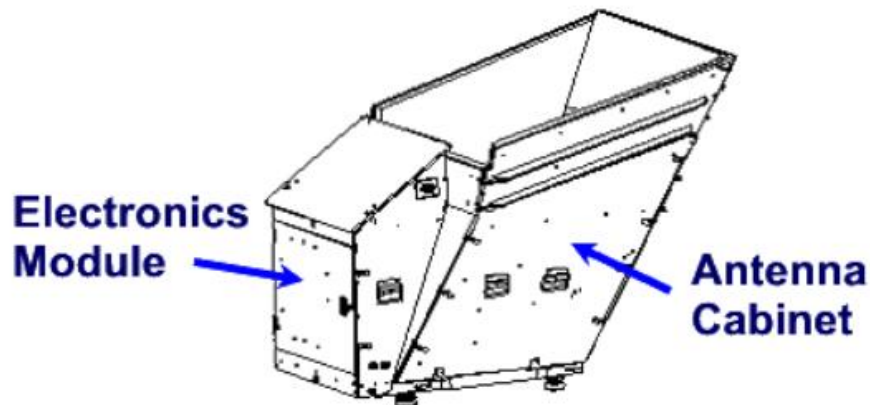


Figura 7: ART Model VT-1.

4.4 Tipos de SODAR

- Monoestático: se trata de un sistema sodar que dispone de las antenas de transmisión y recepción en el mismo punto.
- Biestático: es un sistema sodar en el que las antenas de transmisión y recepción se encuentran en distintos sitios.

4.5 Aplicaciones

Los sistemas sodar tienen numerosas aplicaciones en el ámbito de la meteorología. Mediante el Efecto Doppler es posible estudiar la variación en frecuencia de la señal reflejada respecto de la señal original, permitiendo monitorizar el movimiento del aire. De este modo, si la turbulencia que es objeto de estudio se está moviendo hacia el sistema sodar, la frecuencia de la señal recibida será mayor que la frecuencia de la señal transmitida. Por el contrario, si la turbulencia se está alejando del sistema sodar, la señal reflejada tendrá una frecuencia menor que la señal original. Además, midiendo la intensidad de la señal reflejada se puede determinar la estructura térmica de la atmósfera en distintos puntos. [4]

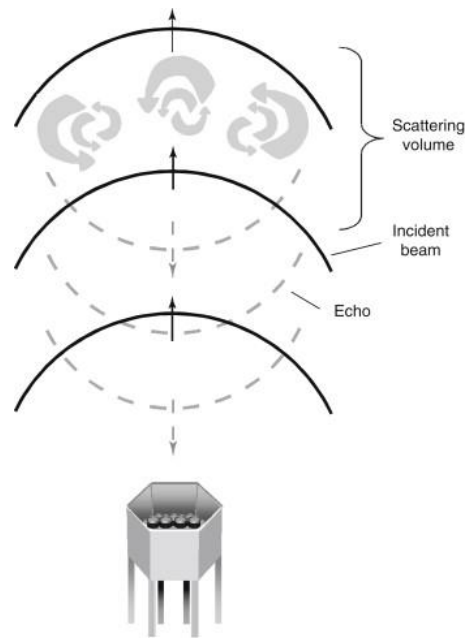


Figura 8: Funcionamiento de un sodar monoestático.

5 PROCESADO ESPACIAL: BEAMFORMING

5.1 *Introducción*

En esta sección se detalla una de las técnicas empleadas para el procesamiento espacial de señales, el conformado de haz o *beamforming*, de la que hacen uso algunas de las herramientas utilizadas en el proyecto como es ViSAM©.

5.2 *Beamforming*

La conformación de haz es una técnica de filtrado espacial fundamental para los sistemas con arrays de sensores y está presente en multitud de aplicaciones de radar, sonar, comunicaciones inalámbricas, etc.

Esta técnica permite distinguir espacialmente entre la señal objetivo y el ruido de fondo conformando haces de radiación en distintas direcciones y observando las señales recibidas para cada ángulo de apuntamiento. De este modo, el sistema es capaz de determinar en qué dirección se recibe mayor energía y conocer así la posición en la que se encuentra el emisor. [5]

Además, el conformado de haz maximiza la relación señal a ruido (SNR) reduciendo los lóbulos secundarios y haciendo el lóbulo principal lo más estrecho posible, lo que permite obtener un diagrama de radiación óptimo en una dirección concreta.

5.3 *Algoritmo Delay and Sum*

Una de las técnicas de beamforming más utilizadas es el algoritmo Delay and Sum, el cual consiste en la aplicación de distintos desfases en los sensores del receptor para posteriormente sumar todas las señales recibidas. [6]

La siguiente figura ilustra este algoritmo:

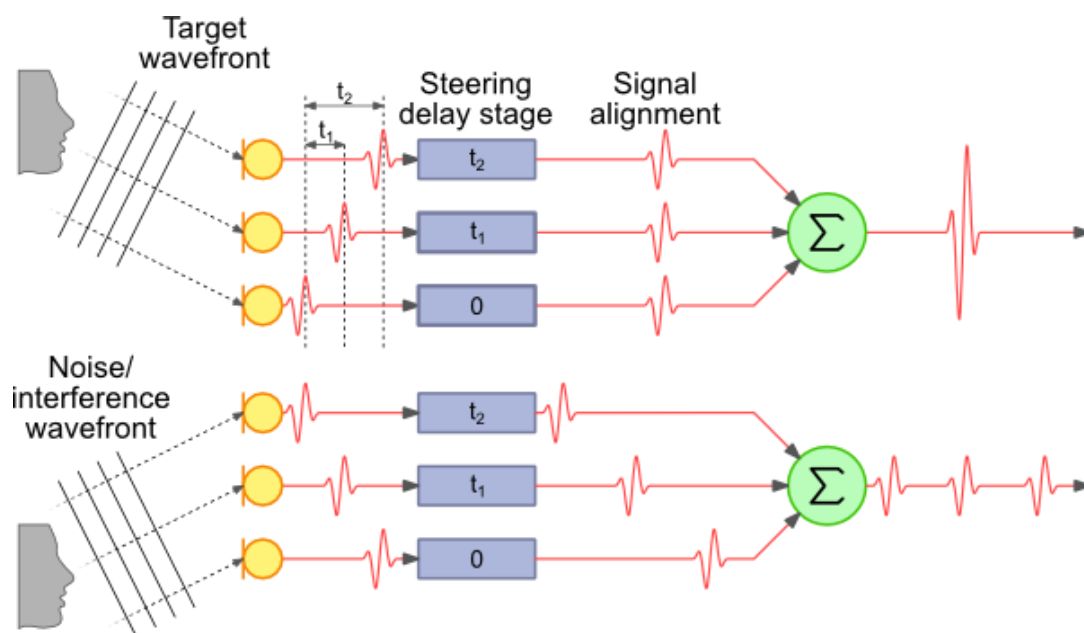


Figura 9: Delay & Sum Beamforming

En la parte superior de la imagen se presenta el caso en el que la señal acústica llega desde la dirección de interés. Como se puede ver, a las señales recibidas por cada uno de los tres sensores se les aplica un desfase que depende del ángulo desde el que se recibe la señal y la distancia entre los sensores que a su vez influye en el momento en que reciben la señal cada uno de los sensores. De este modo, a la señal captada por el sensor superior, que es la primera en recibirse, se le aplica un desfase t_2 que es el tiempo que transcurre entre la recepción de la señal por parte del sensor superior y la recepción por parte del sensor inferior. Para la señal del sensor del medio, el desfase es t_1 , menor que en el caso anterior. Finalmente, se suman las señales desfasadas para obtener una única señal de mayor amplitud.

En la parte inferior, se muestra el caso en que la señal llega desde una posición que no interesa, es decir la recepción de ruido. Los desfases que se aplican a las señales captadas por cada sensor hacen que no lleguen a sumarse constructivamente y no se obtenga una única señal de interés sino tres señales de menor amplitud.

6 RECURSOS

6.1 Recursos hardware

6.1.1 SAM (Sistema de adquisición acústica basado en MEMS)

Se hizo uso de un **sistema de adquisición acústica** denominado SAM cuyo esquema puede observarse en la siguiente figura:



Figura 10: Componentes del sistema de adquisición acústico basado en MEMS (SAM).

- En primer lugar, un altavoz (tweeter) se encarga de generar una señal acústica de una frecuencia concreta.
- En segundo lugar, un array planar uniforme (UPA) acústico 8x8 de micrófonos MEMS separados entre sí 2,5 cm como el de la siguiente figura y encargado de la obtención de las señales acústicas que reflejan los distintos objetos de estudio.



Figura 11: Cámara LiDAR, Array de micrófonos y tweeter empleados en el proyecto.

- Por último, un controlador myRIO de National Instruments conecta los anteriores elementos con el software de captura de imágenes acústicas CaSAM© del que se hablará más adelante. [7]



Figura 12: NI myRIO.

6.1.2 Cámara LiDAR

Otro recurso hardware del que se hizo uso para el desarrollo del proyecto fue la **cámara Intel RealSense LiDAR Camera L515** que se puede ver en las siguientes figuras: [8]



Figura 13: Intel RealSense LiDAR Camera L515.

Se trata de una cámara de profundidad diseñada para emplearse en aplicaciones que requieren la captura de datos de profundidad con alta resolución y precisión. Para ello, emplea un MEMS encargado de la emisión de un láser infrarrojo y su reflexión sobre un espejo. Sus dimensiones (61mm de diámetro y 26mm de alto), un peso de aproximadamente 100g y un consumo de 3,5W la convierten en la cámara LiDAR de alta resolución más eficiente del mundo.



Figura 14: Cámara utilizada en el proyecto.

El rendimiento óptimo se obtiene en interiores y en un rango de distancias desde 25cm hasta 9m.

En la siguiente figura se puede observar la diferencia entre una imagen de profundidad tomada con una cámara LiDAR (parte derecha) y una imagen captada con una cámara normal.

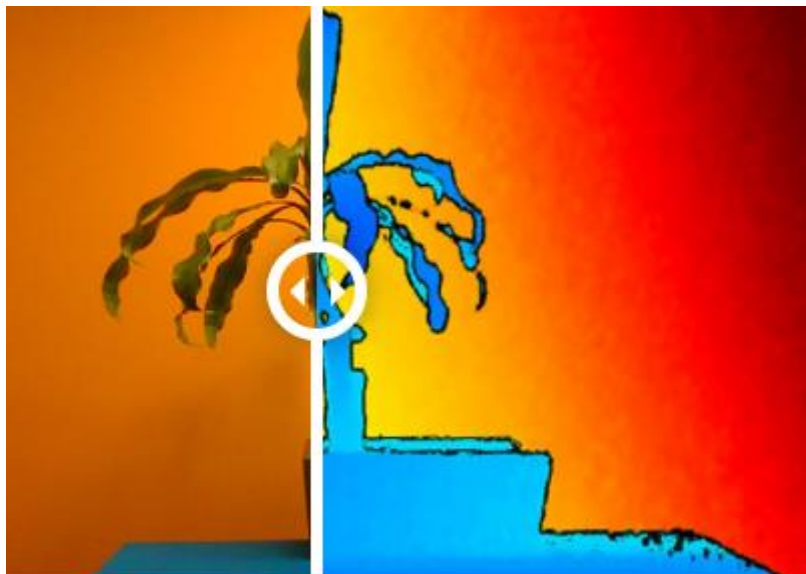


Figura 15: Comparativa entre imagen cromática e imagen de profundidad

En la imagen de profundidad los píxeles, en lugar de presentar información de color, presentan un determinado valor en función de la distancia a la que se encuentran de la cámara LiDAR, la cual está formada por los siguientes componentes:

- **Gorilla Glass 3**

Se trata de una lámina de vidrio reforzado químicamente y de gran resistencia contra fracturas y arañazos.

- **RGB Camera**

La cámara RGB tiene las siguientes características:

- RGB frame resolution: 1920 x 1080
- RGB sensor FOV (H x V): 70° x 43°
- RGB frame rate: 30fps
- RGB sensor resolution: 2 MP
- RGB sensor technology: Rolling Shutter

- **IMU (Inertial Measurement Unit)**

La unidad de medida inercial es una combinación de un acelerómetro y un sensor giroscópico que permite aumentar la precisión de captura de imágenes en situaciones en las que la cámara está en movimiento.

- **IR Emitter module (Laser + MEMS mirror)**

El módulo emisor de infrarrojo se encarga de generar un rayo láser con una longitud de onda de 850nm.

- **ASIC Board**

El ASIC (Circuito Integrado de Aplicación Específica) tiene como tarea procesar los datos del rayo reflejado capturado por el fotodiodo y proporcionará como salida un valor de profundidad representando la distancia entre un punto específico de la escena y la cámara.

6.2 Recursos software

6.2.1 LabVIEW

Para el diseño e implementación del proyecto se he empleado el programa **LabVIEW** (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) desarrollado por la compañía National Instruments en 1986. Se trata de una plataforma y entorno de desarrollo para diseño de sistemas electrónicos con un lenguaje de programación visual gráfico. La gran ventaja de LabVIEW reside en la programación en bloques lo que le hace fácil de usar tanto para programadores profesionales como para usuarios con poca formación en materia de programación. [9]

Los programas en LabVIEW se denominan instrumentos virtuales (VIs) y tienen dos partes:

- **Panel frontal**

Constituye el medio a través del cual tiene lugar la interacción con el usuario. Mediante los controles introducimos los distintos parámetros mientras que los indicadores y gráficas nos muestran los resultados que proporciona el programa que se está ejecutando.

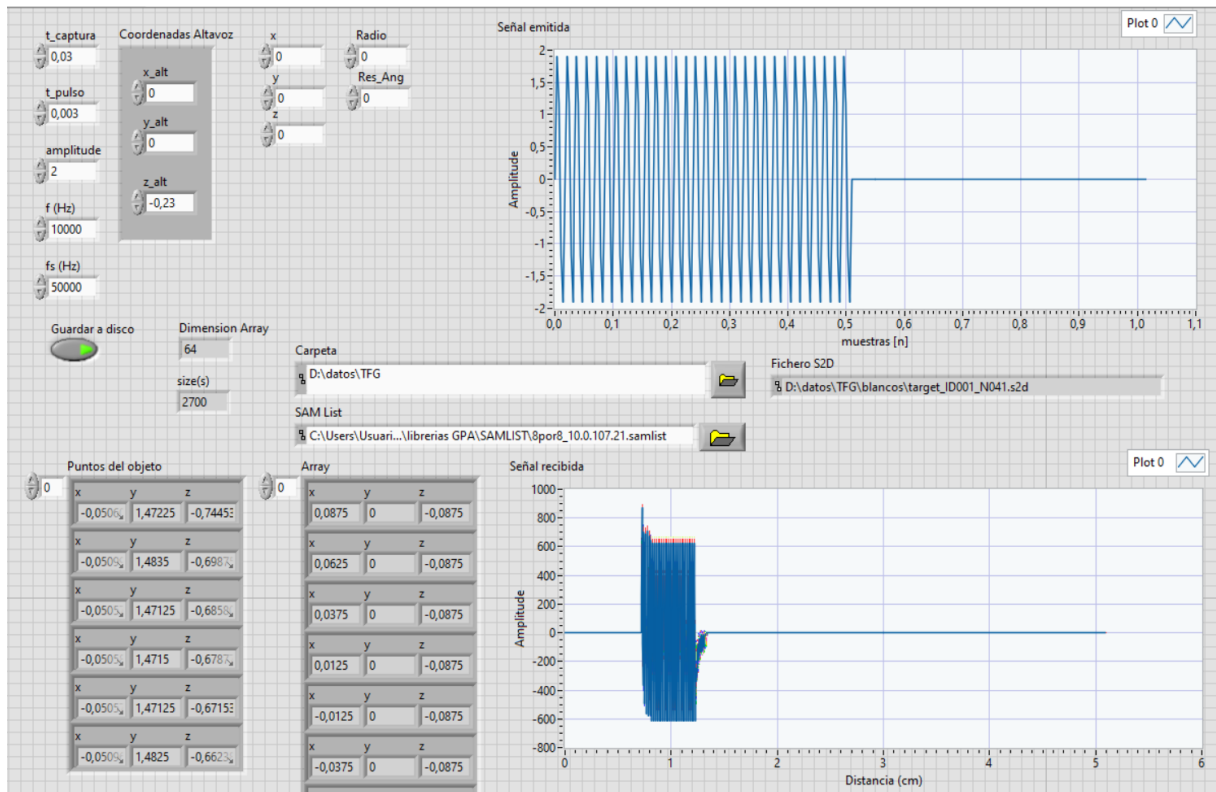


Figura 16: Ejemplo de Panel frontal

- **Diagrama de bloques**

En esta parte se colocan y se conectan los iconos de los bloques que realizan una determinada función, es decir, en el diagrama de bloques es donde se lleva a cabo la programación. En la siguiente figura se muestra un ejemplo del diagrama de bloques de una de las rutinas del proyecto:

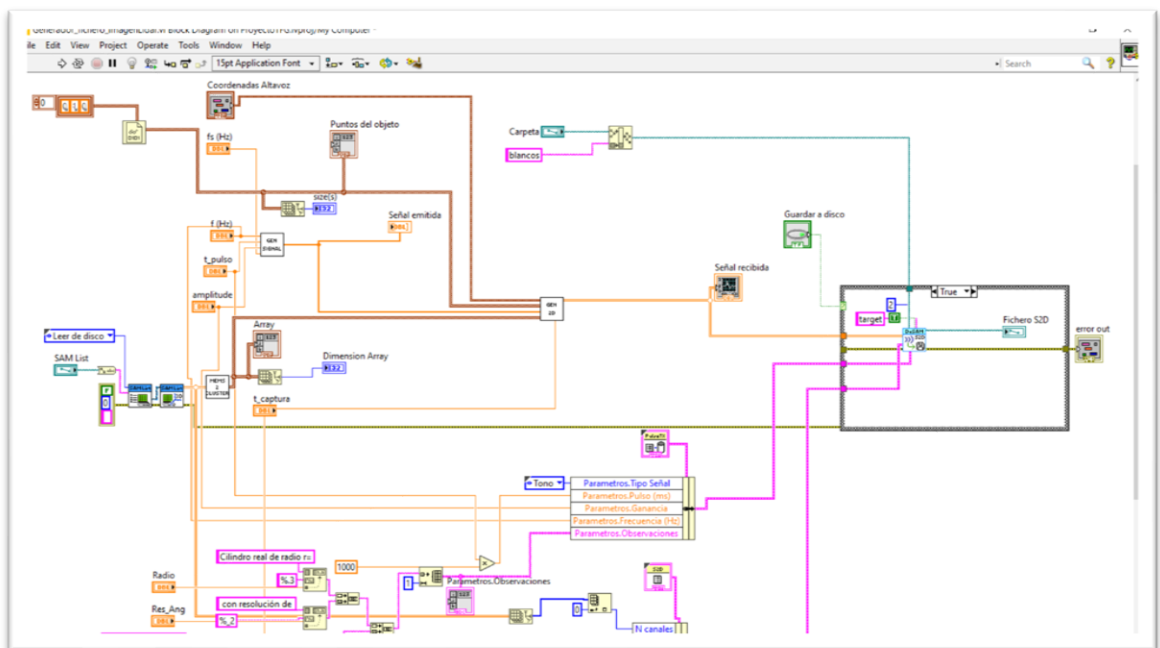


Figura 17: Ejemplo de Diagrama de bloques

6.2.2 Casam© - Visam©

Para el análisis de los resultados se ha hecho uso de dos herramientas software desarrolladas por el grupo de investigación GPA (Grupo de Procesado en Array): **ViSAM** y **CaSAM**. Por un lado, ViSAM aplica técnicas de filtrado espacial como beamforming para obtener las imágenes acústicas a partir de las señales capturadas por el array de micrófonos del simulador mientras que CaSAM se encarga de la captura de imágenes acústicas empleando el sistema SAM expuesto anteriormente. Un ejemplo del entorno gráfico de ViSAM se puede ver a continuación:

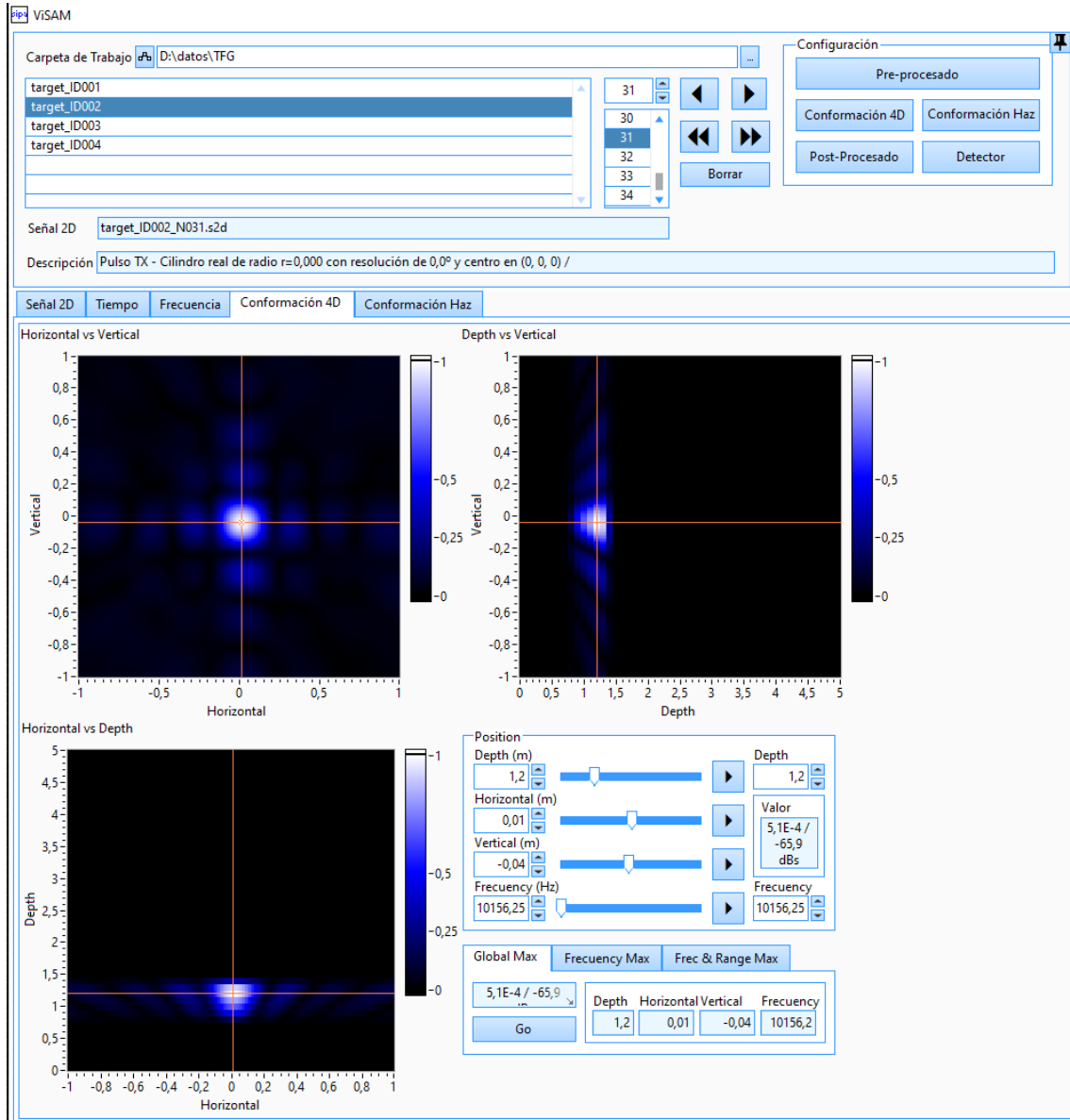


Figura 18: Entorno gráfico de la herramienta software ViSAM

7 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

7.1 Introducción

En este apartado se detalla el diseño y la implementación del simulador acústico, así como la relación entre los distintos dispositivos que se emplearon. Se exponen también los métodos de trabajo que se siguieron durante el desarrollo del proyecto y las distintas líneas de trabajo que lo conforman.

7.2 Metodología de trabajo

Este proyecto se desarrolló a través de dos líneas de trabajo con el objetivo de comparar los resultados obtenidos de cada una de ellas.

7.2.1 Adquisición de señales acústicas sintéticas y generación de imágenes 3D

En la siguiente figura se muestra un mapa conceptual general de la primera línea del proyecto:

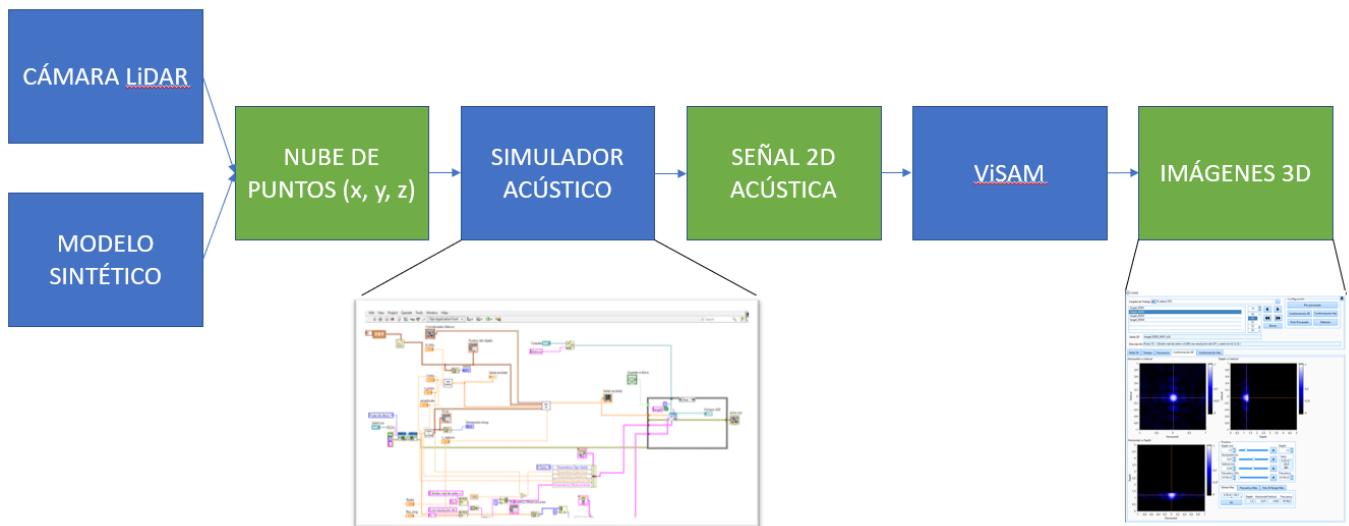


Figura 19: Esquema de la adquisición de señales acústicas sintéticas y generación de imágenes 3D

En primer lugar, usando la cámara LiDAR que ya detallamos en apartados anteriores, capturamos imágenes de distintos cuerpos simples (esfera, cilindro, etc.) y cuerpos complejos (persona real) y obtenemos una nube de puntos que se corresponde con las coordenadas (x, y, z) de cada punto del objeto bajo estudio. De forma paralela, haciendo uso del simulador diseñado con LabVIEW generamos los objetos (únicamente los objetos simples de la esfera y el cilindro) obteniendo otra nube de puntos y con el modelo de reflexión expuesto anteriormente creamos la señal 2D acústica. Finalmente, mediante la herramienta ViSAM obtenemos las imágenes 3D (rango, azimuth y elevación) a partir de las señales 2D acústicas.

7.2.2 Adquisición de señales acústicas reales y generación de imágenes 3D

Por otro lado, la otra línea de desarrollo del proyecto se detalla en el esquema siguiente:

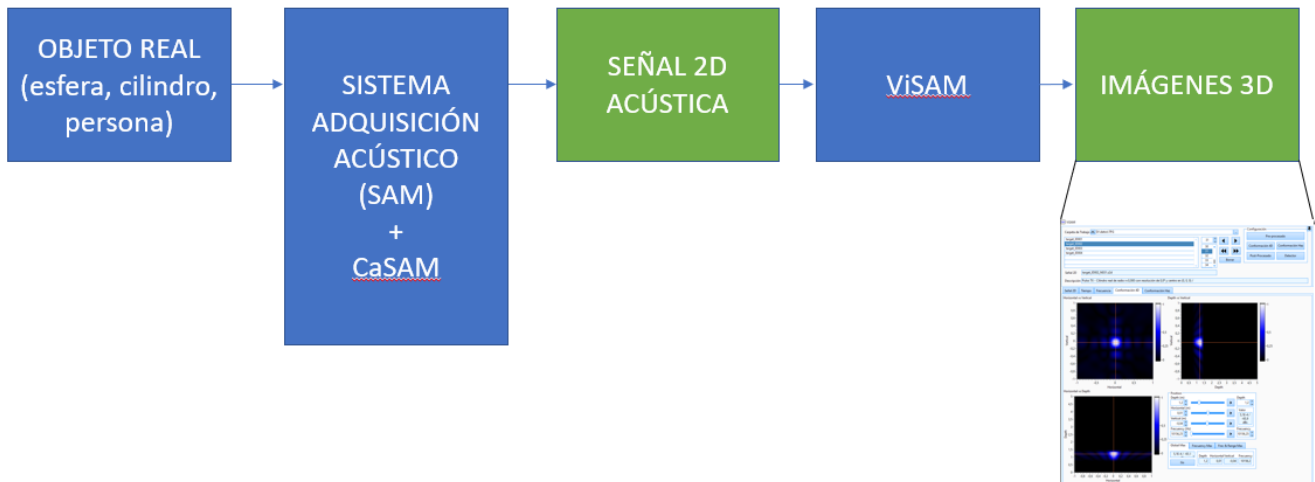


Figura 20: Esquema de la adquisición de señales acústicas reales y generación de imágenes 3D

En este caso, partiendo de esferas, cilindros y personas reales y empleando el sistema de adquisición acústica detallado en secciones anteriores formado por un tweeter, un array planar uniforme y un controlador myRIO se obtienen las señales acústicas 2D. Después, con la herramienta ViSAM se generan las imágenes 3D a partir de las señales acústicas 2D obtenidas previamente.

7.3 Modelo acústico de reflexión

A continuación, se expone el modelo en el que se basa el simulador y el proceso de creación de este.

El simulador diseñado en este proyecto se basa en un sencillo modelo acústico de reflexión en el que los objetos se pueden descomponer en una cantidad finita de puntos. De este modo, se puede calcular las distancias del objeto al altavoz y al array de micrófonos asumiendo que cada uno de los puntos en los que se descompuso el objeto bajo estudio refleja la señal acústica emitida tal y como se ilustra en la siguiente figura:

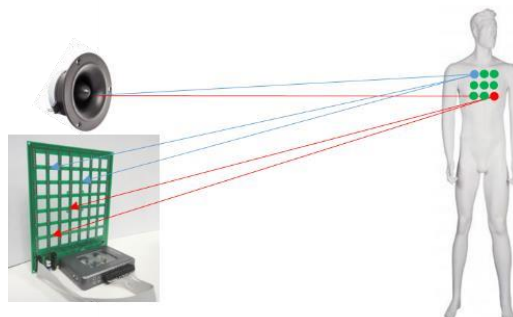


Figura 21: Esquema del modelo acústico de reflexión.

El sistema de coordenadas con el que se trabajó durante el desarrollo del proyecto se muestra en la siguiente figura. El array de micrófonos y el altavoz se encuentran colocados en el plano XZ mientras que los objetos se colocarán enfrente a una determinada distancia y.

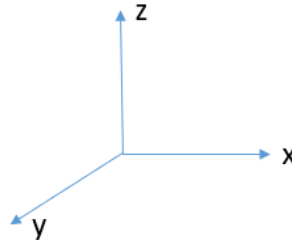


Figura 22: Sistema de coordenadas empleado en el simulador.

Tal y como se comentó anteriormente, los programas de LabVIEW se denominan instrumentos virtuales (VIs) y se caracterizan por estar divididos en dos partes:

- **Diagrama de bloques:** permite implementar la funcionalidad deseada mediante la incorporación de los distintos bloques lógicos necesarios.
- **Panel frontal:** permite al usuario interactuar con el VI por medio de diversos controles, indicadores, gráficos, etc.

7.3.1 Generación de la señal original → altavoz.vi

La señal emitida es un pulso sinusoidal cuyas características podemos configurar a través del uso de distintos controles.

- **Frecuencia de la señal:** 10kHz
- **Frecuencia de muestreo:** 50kHz
- **Amplitud:** 2V
- **Tiempo de pulso:** 3ms

La siguiente figura muestra la señal generada:

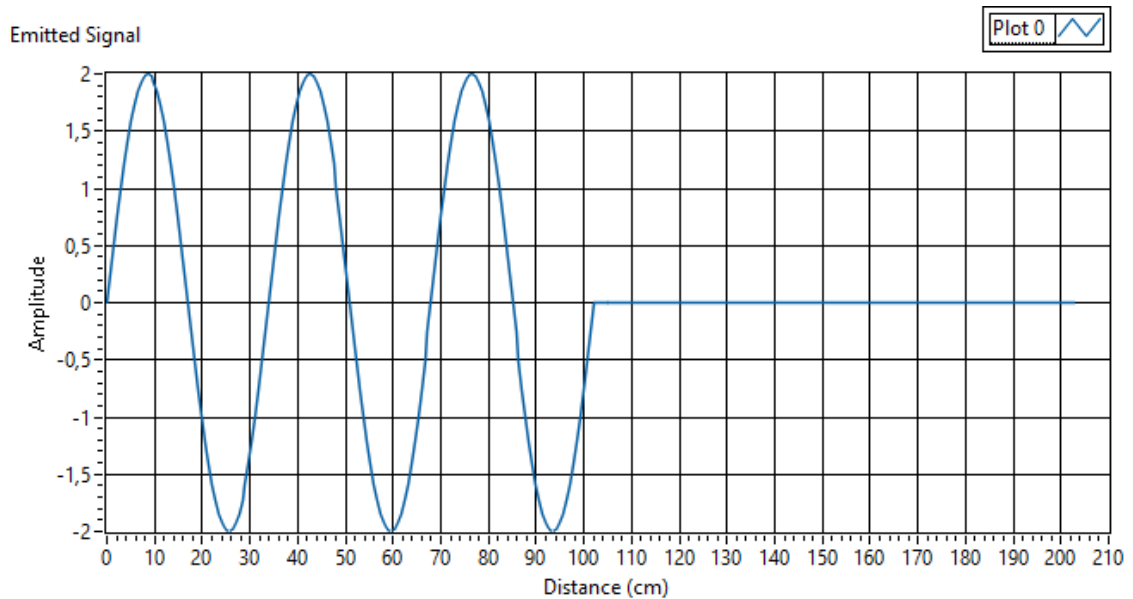


Figura 23: Señal emitida.

7.3.2 Generación de los objetos

A continuación, se explica cómo se realizó la generación de los distintos objetos con los que se trabajó:

- Objeto puntual → VI_BlancoPuntual.vi
Haciendo uso de tres clusters de tres elementos definimos las coordenadas (x, y, z) del altavoz que emite la señal, del objeto puntual y del micrófono que recoge la señal reflejada en el objeto. Por lo general, altavoz y micrófono estarán colocados en el origen de coordenadas.

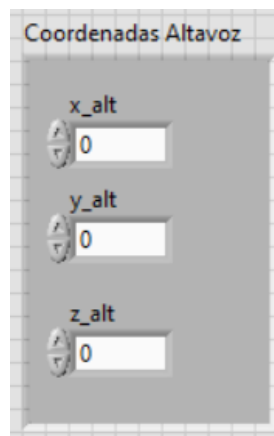
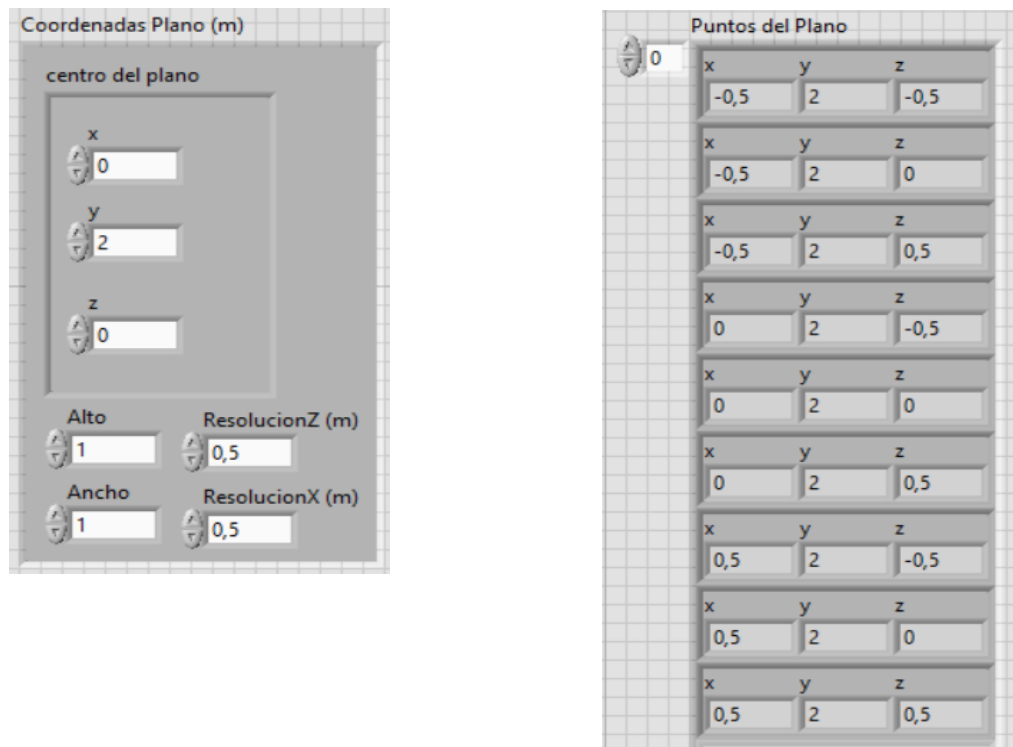


Figura 24: Cluster con las coordenadas del altavoz

- Plano → VI_BlancoPlano.vi
Para definir las coordenadas del altavoz y del micrófono se utilizan sendos clusters de tres elementos correspondientes a las coordenadas (x, y, z). Para crear el plano se hace uso de otro cluster con los siguientes elementos:
 - Centro del plano: con un cluster de tres elementos modificamos las coordenadas (x, y, z) en las que se encontrará el centro del plano.
 - Altura

- Ancho
- ResolucionZ: resolución vertical
- ResolucionX: resolución horizontal

De este modo, con los parámetros Altura y Ancho controlamos las dimensiones del plano, con el parámetro Centro del plano podemos controlar el lugar donde estará el plano mientras que con los parámetros ResolucionZ y ResolucionX definimos la cantidad de puntos que formarán el plano.



(a)

(b)

Figura 25: (a) Controles para la generación de un plano. (b) Puntos que forman el plano.

Los valores de la figura anterior izquierda generan un plano centrado en el punto (0, 2, 0) de 1 metro de alto y 1 metro de ancho con puntos separados 0,5 metros en z y en y. En la figura de la derecha se pueden ver los 9 puntos que forman el plano.

- Semicilindro → VI_Semicilindro.vi

El caso del semicilindro es similar al del plano, pero con algunas modificaciones. Para las coordenadas del altavoz y el micrófono se utilizan dos clusters que contienen las coordenadas (x, y, z).

Este es un caso similar al del plano porque la idea sigue siendo generar una superficie, con la salvedad de que ahora la superficie es curva. Para ello se emplea un cluster con los siguientes elementos:

- Centro del semicilindro: es un cluster de tres elementos que nos permiten definir las coordenadas (x, y, z) del centro del cilindro.
- Radio, en metros
- Alto, en metros
- Res_Ang: resolución angular

- ResoluciónZ: resolución vertical

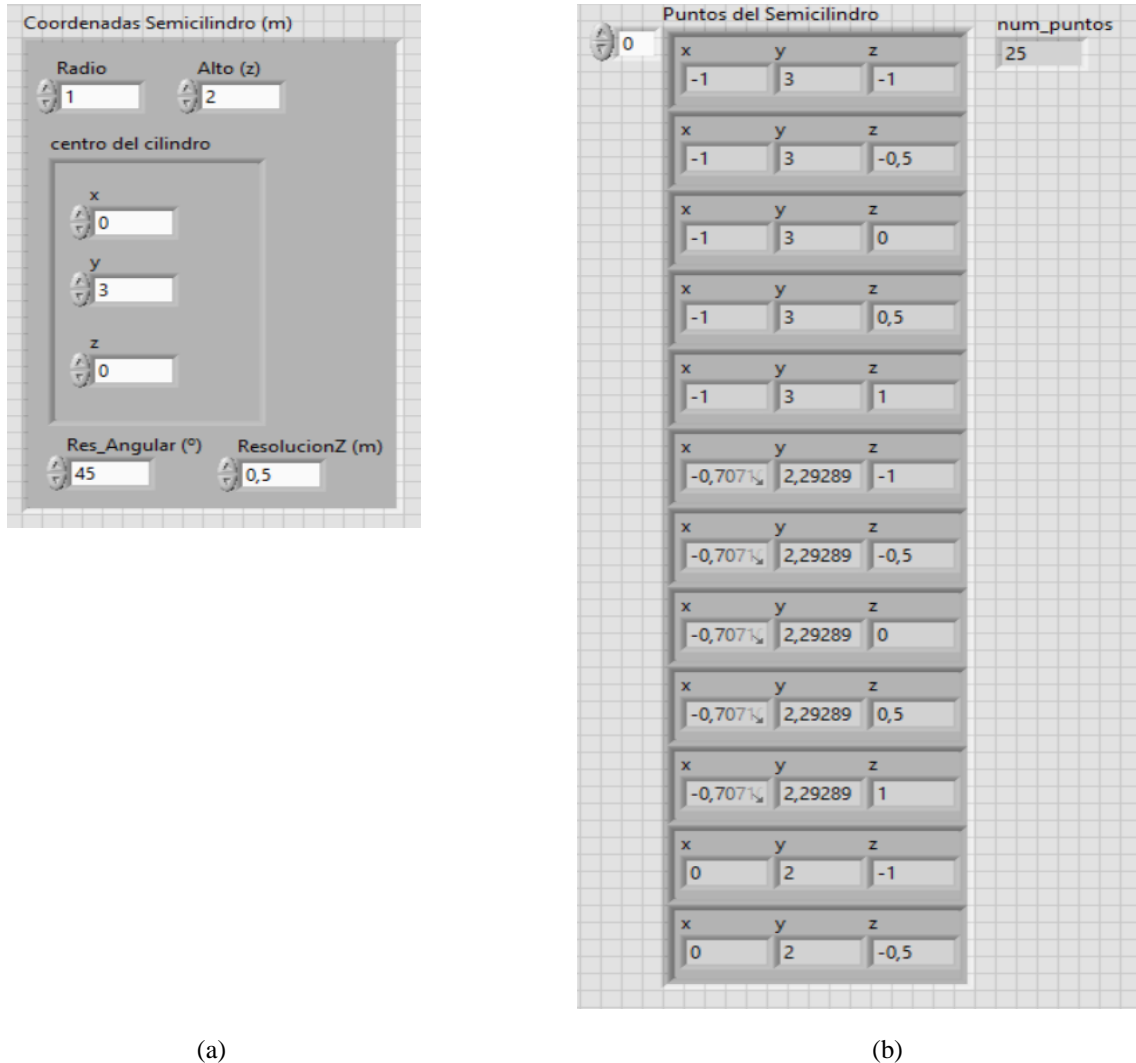


Figura 26: (a) Controles para la generación de un semicilindro. (b) Puntos que forman el semicilindro.

Con los valores de la figura anterior izquierda, se genera un semicilindro con centro en el punto (0, 3, 0) de 1 metro de radio, 2 metros de alto, con resolución angular de 45° y resolución vertical 0,5 metros.

Del mismo modo que en el caso del plano, la resolución angular y la resolución vertical determinan el número de puntos que forman el semicilindro. En este caso, el semicilindro está formado por 25 puntos, algunos de los cuales se pueden ver en la figura de la derecha.

Además, con la rutina **Visualizar_cilindro.vi** podemos comprobar cómo es el semicilindro que hemos construido. En la figura siguiente se muestra un semicilindro centrado en (0,3,0) de 1 metro de radio, 1,8 metros de alto, resolución angular de 15° y resolución vertical 0,2 metros.

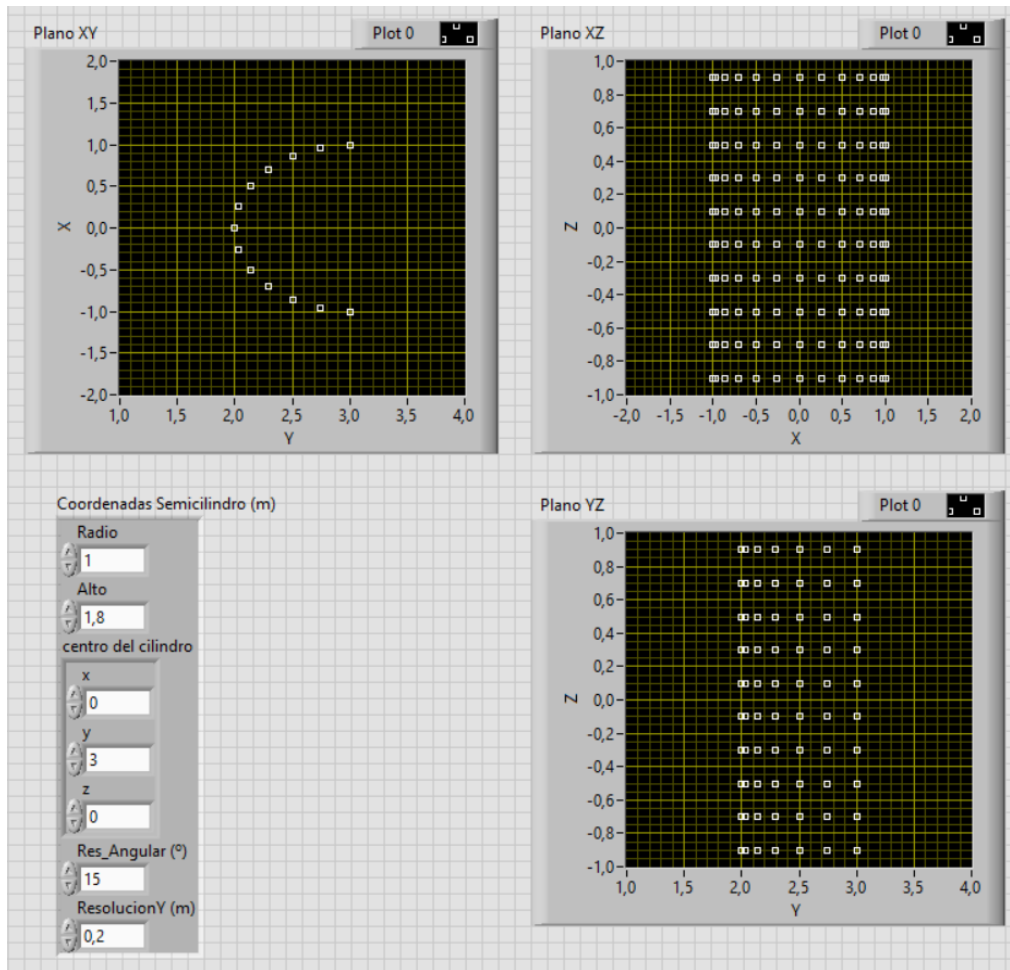


Figura 27: Visualización del semicilindro generado.

- **Semiesfera** → VI_Semiesfera.vi

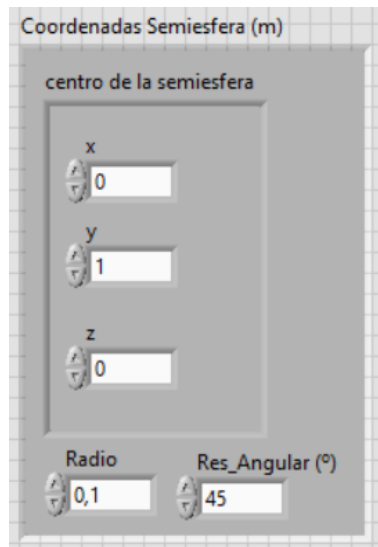
Las coordenadas del altavoz y del micrófono las definimos con dos clusters de tres elementos como en los casos anteriores.

Para construir la semiesfera hacemos uso de un cluster con los siguientes tres elementos:

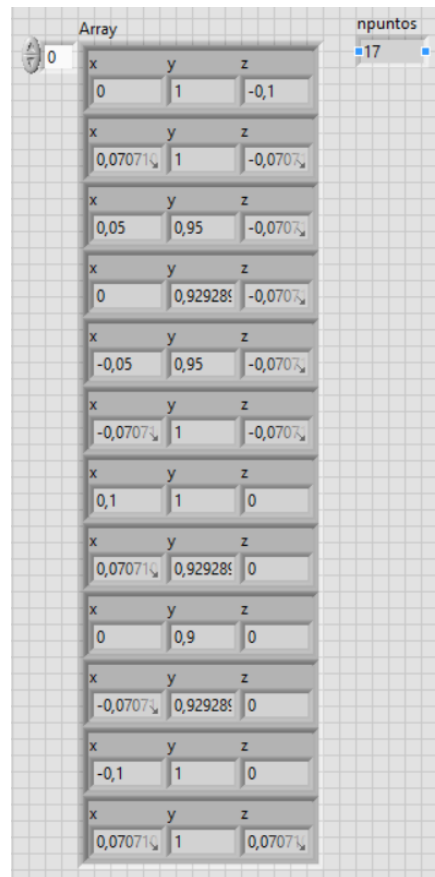
- Centro de la semiesfera: se trata de un cluster con la coordenadas (x, y, z) en las que se sitúa el centro de la semiesfera.
- Radio, en metros
- Res_Angular, en grados

En este caso, únicamente consideramos una resolución angular para tener la misma cantidad de puntos tanto en elevación como en acimut.

Los valores que se muestran en la figura inferior izquierda definen una semiesfera centrada en el punto (0, 1, 0) con radio 0,1 metros y puntos separados 45°. Algunos de los puntos de la semiesfera se pueden ver en la figura de la derecha.



(a)



(b)

Figura 28: (a) Controles para la generación de una semiesfera. (b) Puntos que forman la semiesfera.

Además, con la rutina **Visualizar_esfera.vi** podemos comprobar cómo es la semiesfera que hemos construido. En la figura siguiente se muestra una semiesfera centrada en (0,3,0) de 1 metro de radio y resolución angular de 15°.

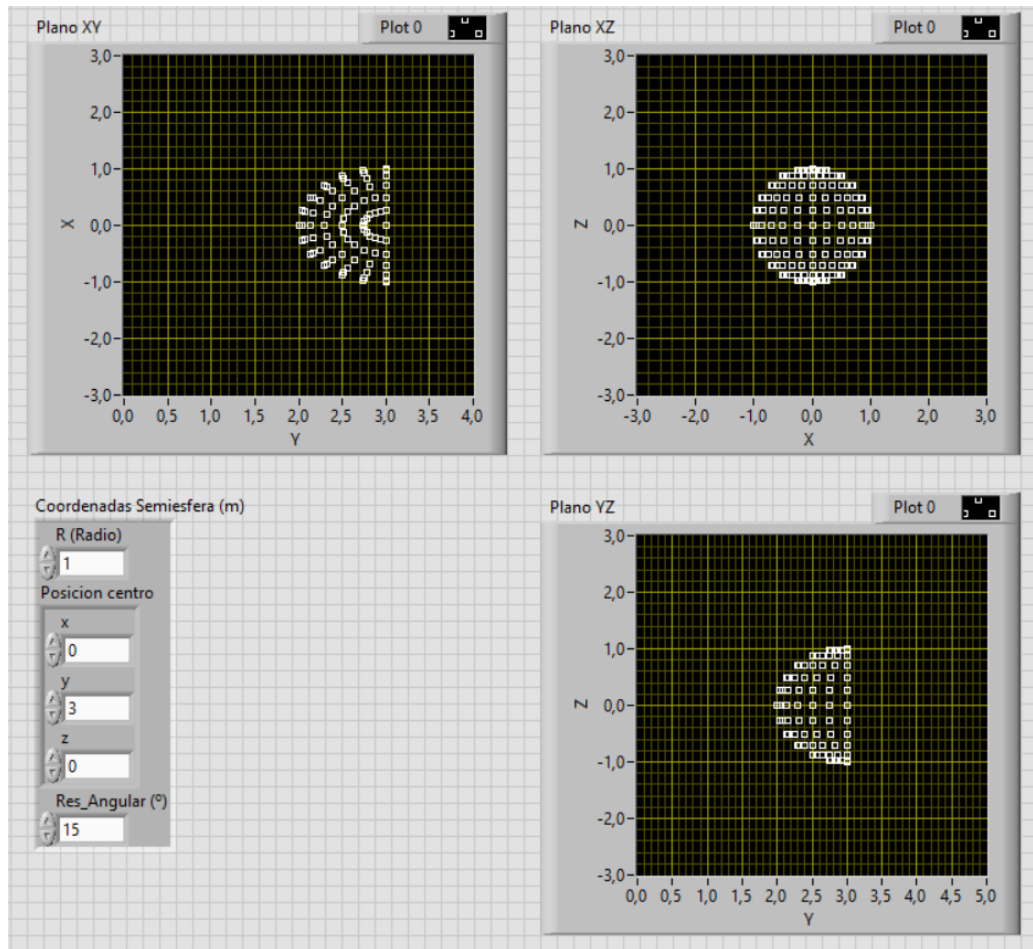


Figura 29: Visualización de la semiesfera generada.

7.3.3 Cálculo de distancias → d_total.vi – media_distancia.vi

El VI **d_total.vi** calcula la distancia a la que se encuentra el objeto respecto del altavoz desde el que se emite la señal. El diagrama de bloques se muestra a continuación:

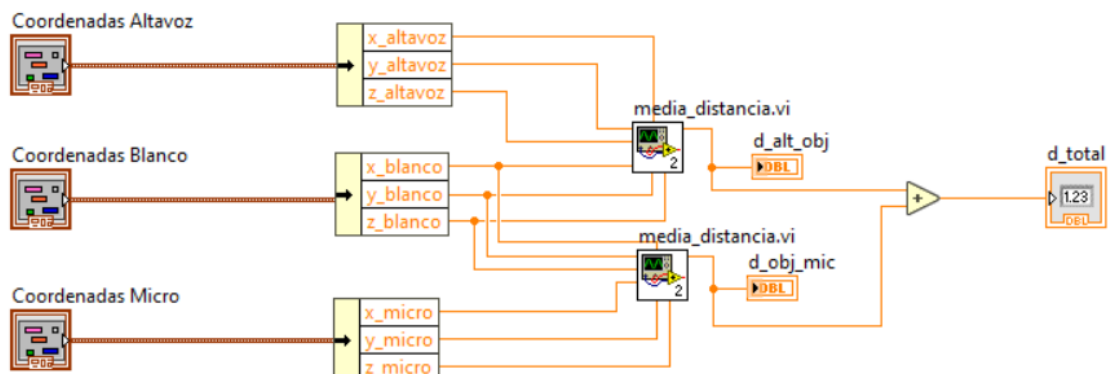


Figura 30: Diagrama de bloques del VI d_total.vi

Como se puede ver, se hace uso del subVI **media_distancia.vi** para calcular las distancias altavoz-blanco y blanco-micrófono y cuyo diagrama de bloques se muestra en la figura siguiente:

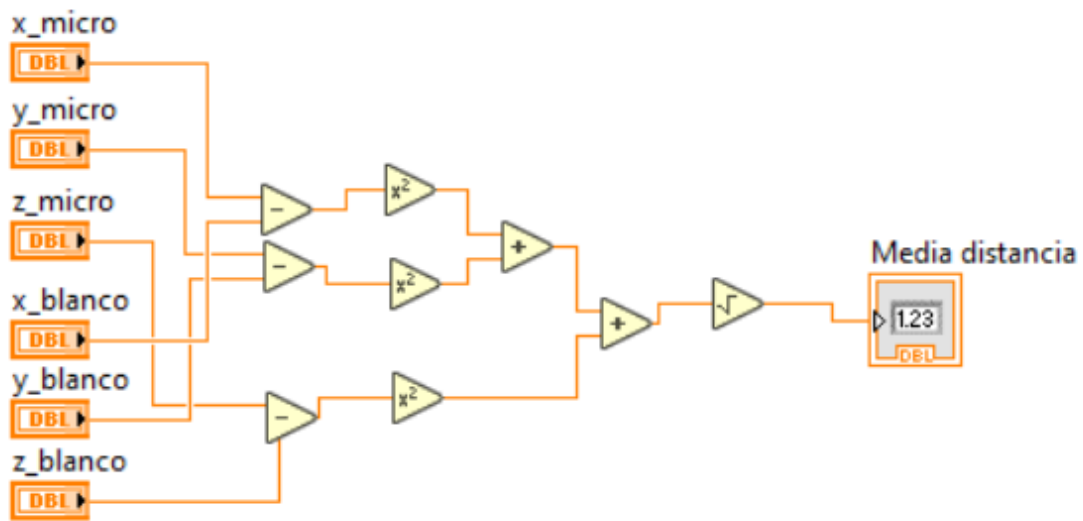


Figura 31: Diagrama de bloques del VI media_distancia.vi

Este subVI es el que realmente realiza el cálculo de la distancia siguiendo la siguiente fórmula:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

Este valor de la distancia se utiliza posteriormente para saber el tiempo que transcurre desde que el altavoz emite la señal hasta que esta es captada por el array de micrófonos. Para ello se consideró que la velocidad del sonido es 340 m/s.

7.3.4 Señal reflejada → Generador_Array.vi

El procedimiento que se siguió para obtener la señal reflejada se detalla a continuación.

Como ya se explicó anteriormente, en primera instancia el altavoz genera la señal sinusoidal que chocará con el objeto (puede ser un objeto puntual, un plano, un semicilindro o una semiesfera), rebotará y será captada por el array de micrófonos.

Para simular esta recepción de la señal reflejada por parte del array de micrófonos se emplea el VI Generador_Array.vi cuyo diagrama de bloques aparece en la siguiente figura:

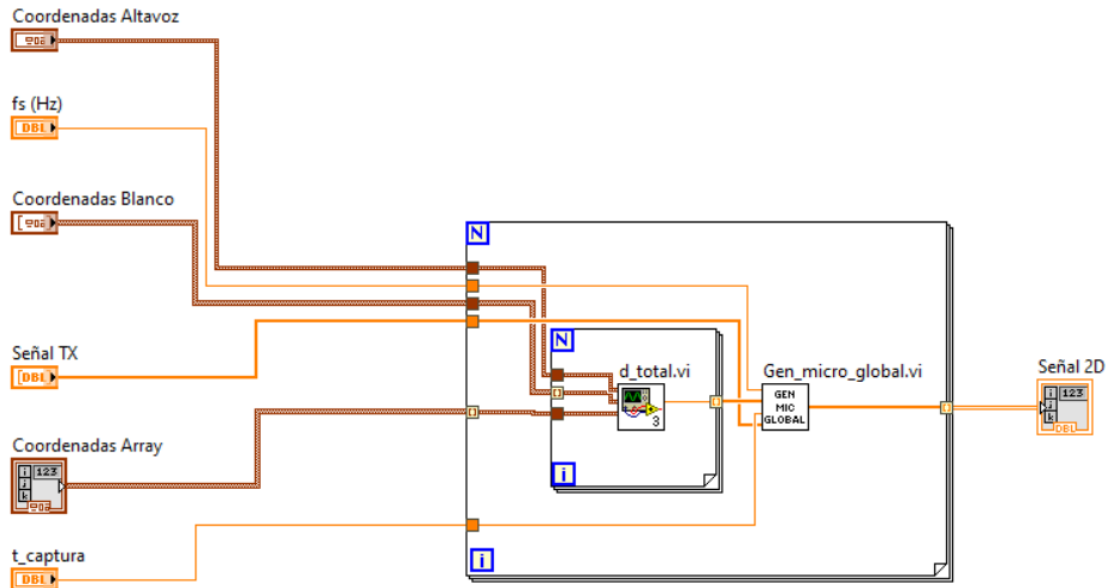


Figura 32: Diagrama de bloques del VI Generador_Array.vi

Como se puede observar, este VI hace uso de otros subVIs como son d_total.vi que calcula la distancia entre cada uno de los puntos y los micrófonos del array como ya explicamos previamente, y Gen_micro_global que se encarga de sumar todas las señales recibidas.

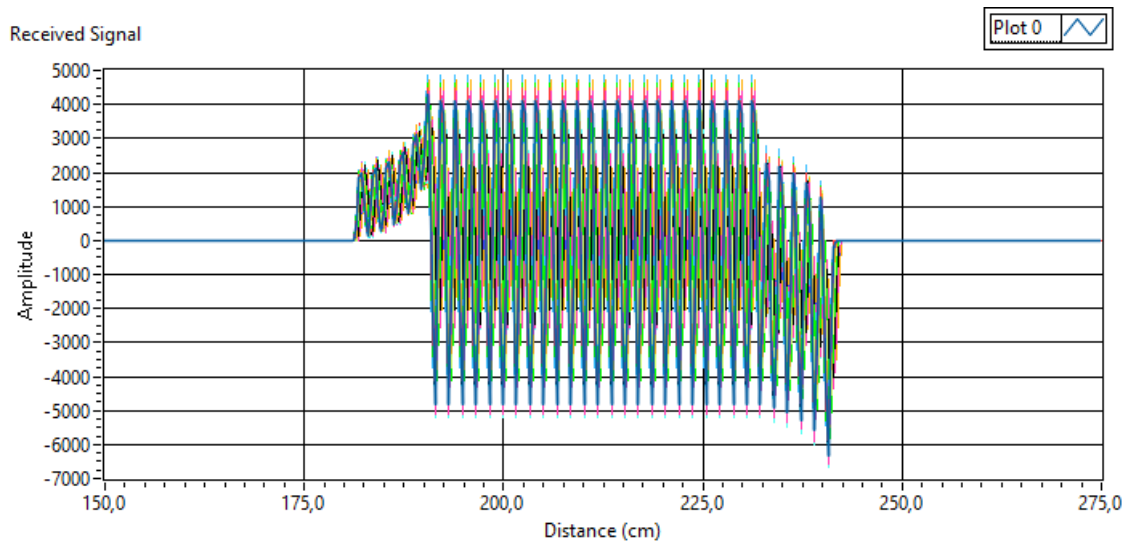


Figura 33: Señal recibida

7.4 *Diseño de escenarios*

7.4.1 Objeto puntual → VI_BlancoPuntual.vi

En primer lugar, se empezó con el diseño del escenario más sencillo, el cual consiste en emitir una señal sinusoidal que rebotará contra un objeto puntual (es decir, el objeto está únicamente formado por un punto) y será captada por el micrófono. El diagrama de bloques de este VI se muestra a continuación:

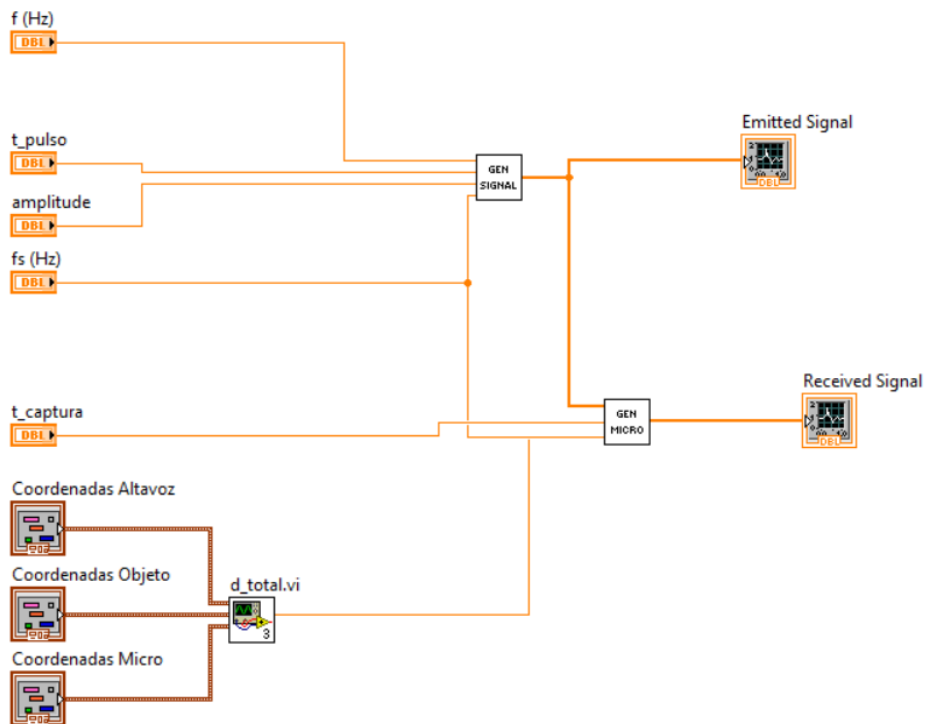


Figura 34: Diagrama de bloques de VI_BlancoPuntual.vi

Por otro lado, en la siguiente figura se puede observar el panel frontal con los distintos controles y gráficas.

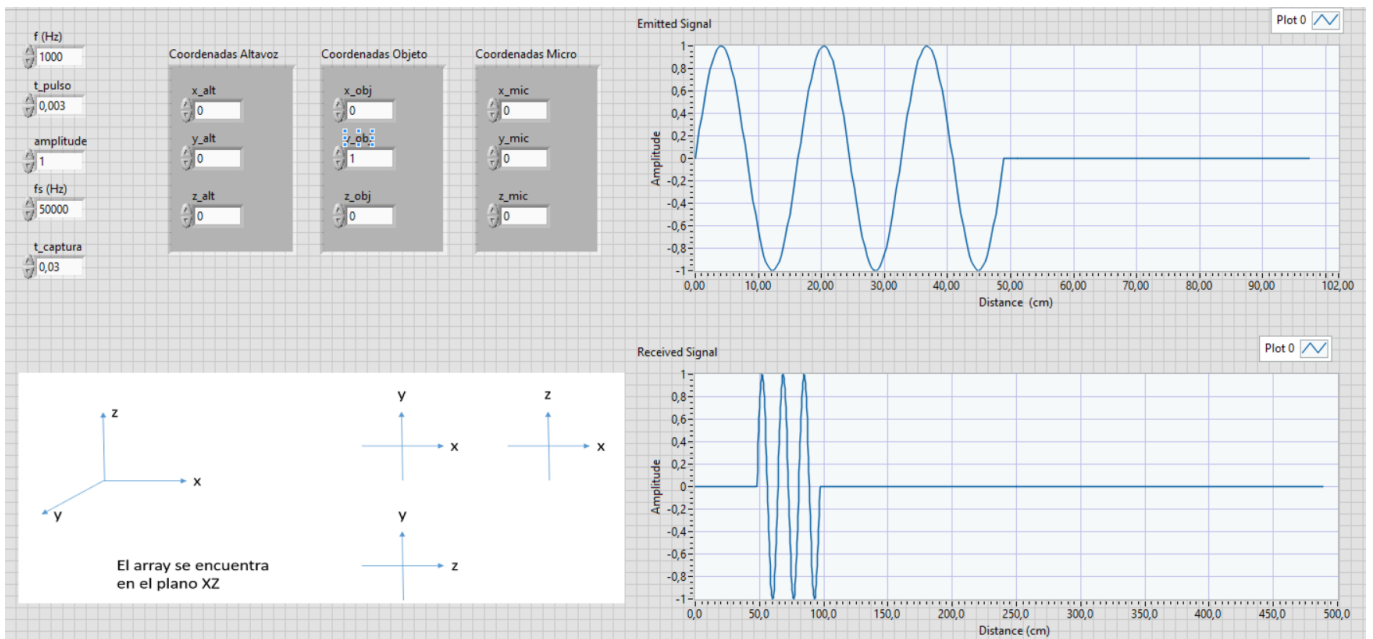


Figura 35: Panel frontal de VI_BlancoPuntual.vi

7.4.2 Objeto plano → Generador_fichero_Plano.vi

A continuación, se exponen las rutinas que generan las señales acústicas 2D que posteriormente, a través de la herramienta ViSAM, darán lugar a las imágenes 3D. Así, el siguiente escenario que se implementó fue el que simula la emisión de una señal contra un plano y la posterior recepción de la señal reflejada por parte del array de micrófonos 8x8 que ya detallamos en secciones anteriores. El diagrama de bloques de este VI es el siguiente:

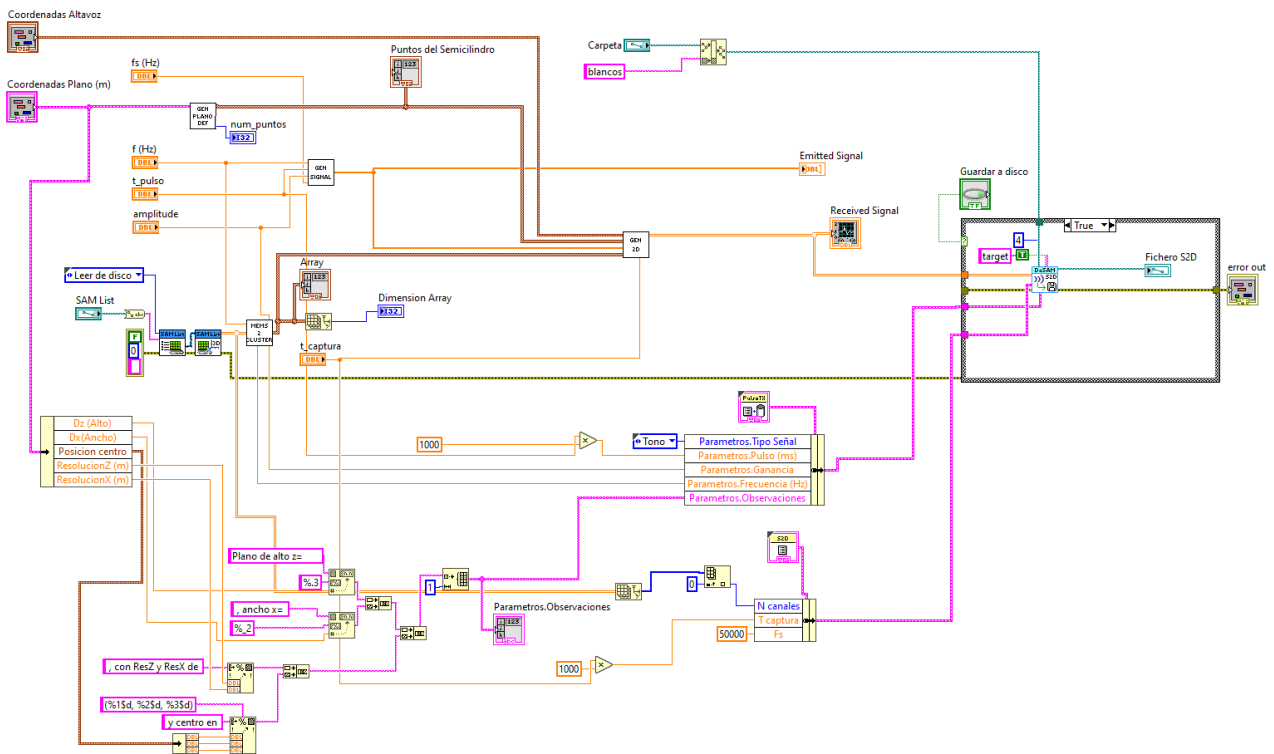


Figura 36: Diagrama de bloques del VI Generador_fichero_Plano.vi

El panel frontal se muestra a continuación:

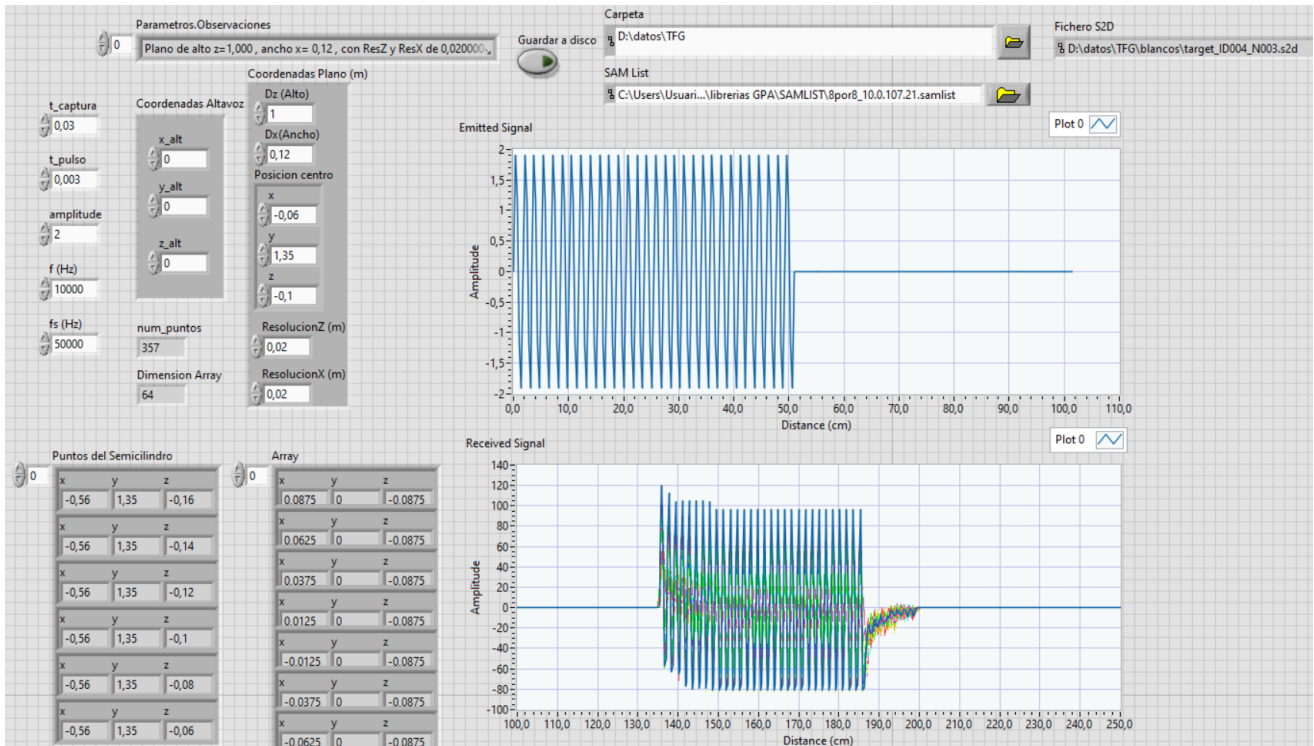


Figura 37: Panel frontal de Generador_fichero_Plano.vi

Dado que ahora se tienen tantas señales reflejadas como puntos tiene el plano, en este caso se hace uso del subVI Gen_micro_global.vi el cual tiene en cuenta la contribución de todas las señales reflejadas en cada uno de los puntos que forman el plano, esto significa que se suman todas las señales reflejadas para construir la señal final recibida por el array de micrófonos.

7.4.3 Objeto semicilíndrico → Generador_fichero_Cilindro.vi

El diagrama de bloques del VI que simula el escenario en el que el objeto que tenemos es un semicilindro se muestra en la figura siguiente:

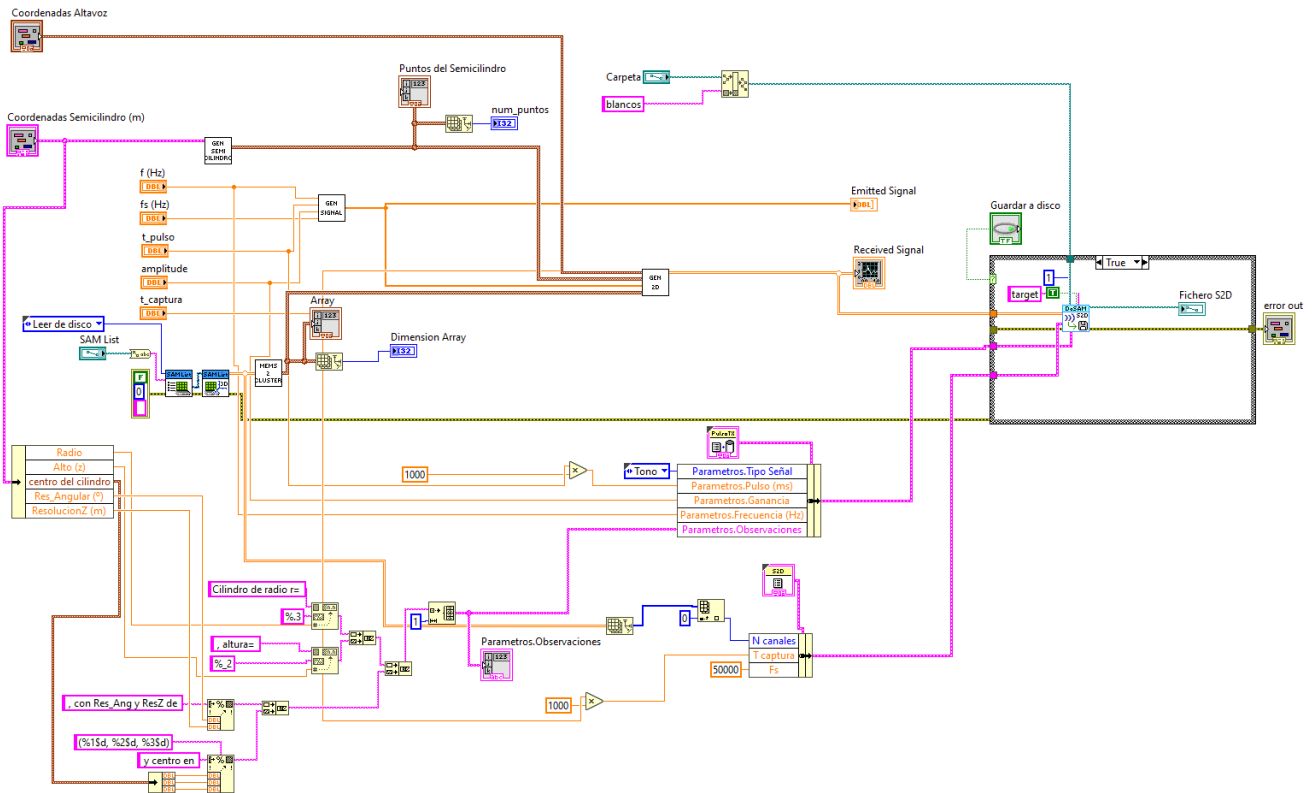


Figura 38: Diagrama de bloques del VI Generador_fichero_Cilindro.vi

El panel frontal de este VI se muestra a continuación:

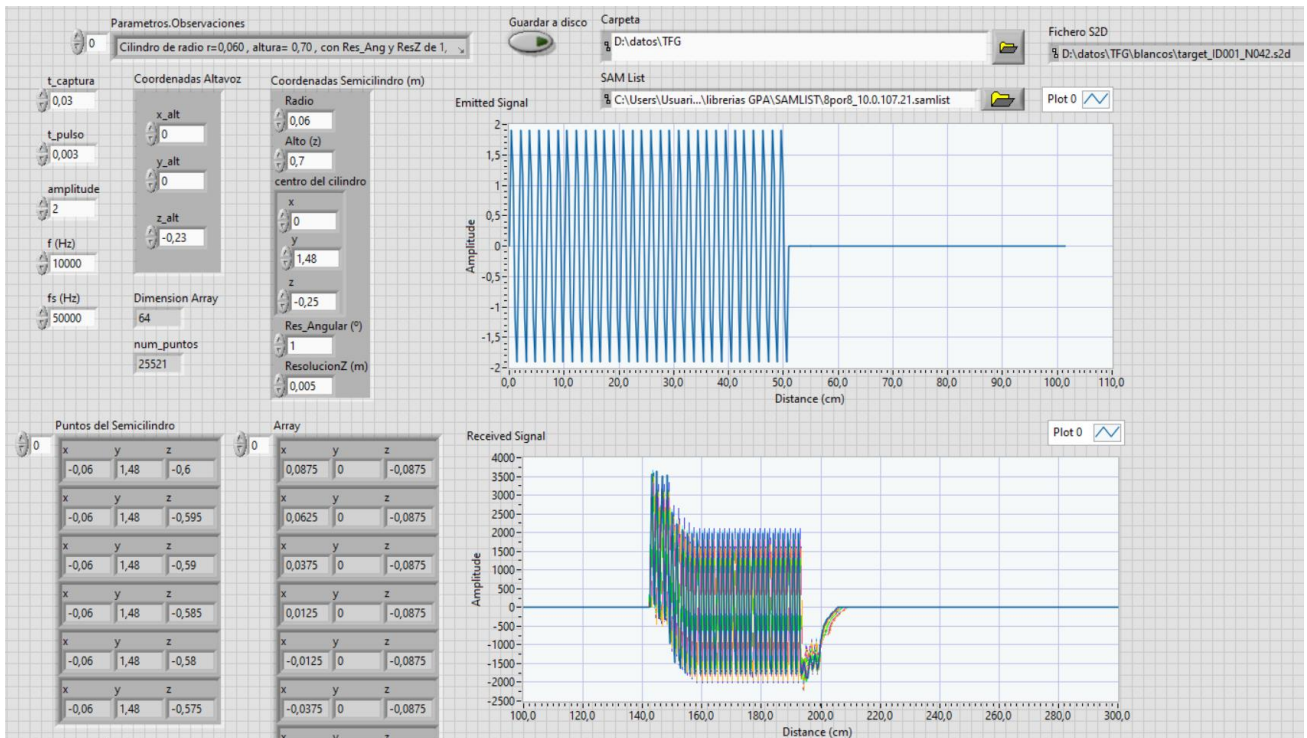


Figura 39: Panel frontal de Generador_fichero_Cilindro.vi

7.4.4 Objeto semiesférico → Generador_fichero_Esfera.vi

El último de los escenarios que se diseñó es el que simula la emisión de una señal senoidal que rebota contra una semiesfera y es posteriormente captada por un micrófono.

El diagrama de bloques y el panel frontal de este VI se muestran en las figuras siguientes:

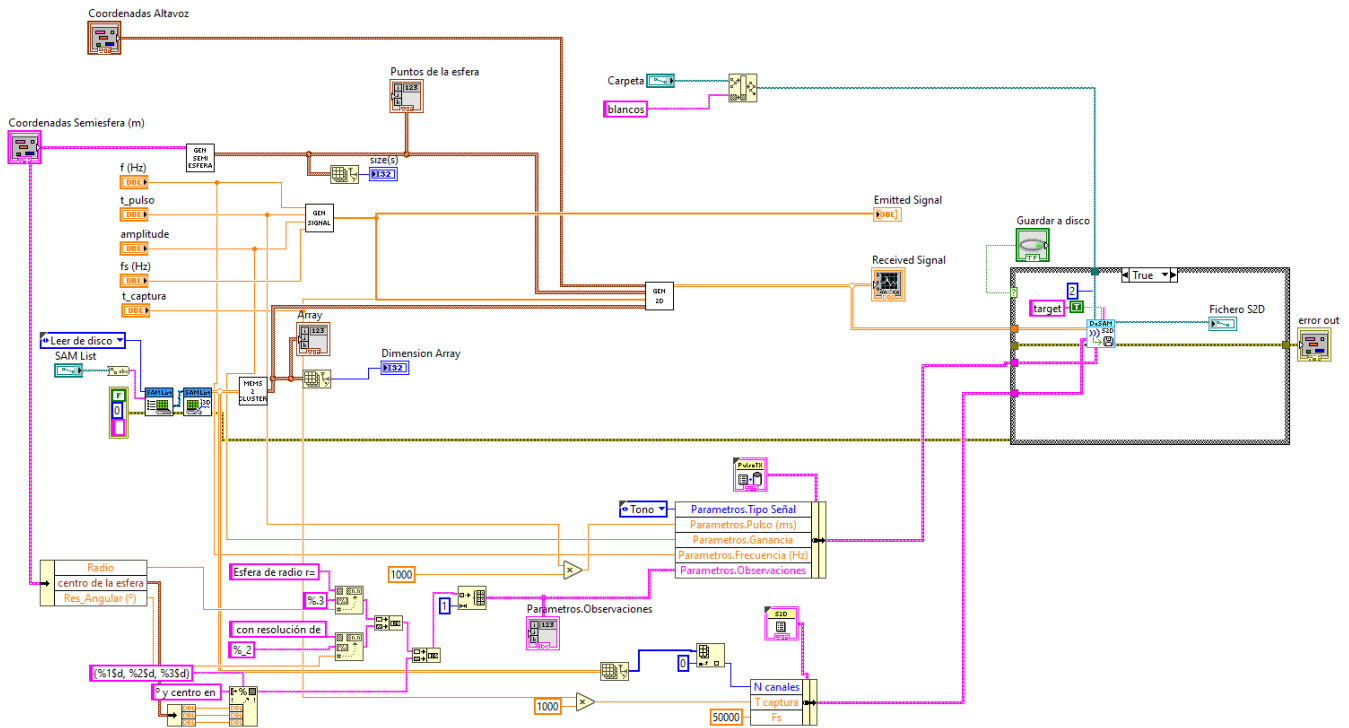


Figura 40: Diagrama de bloques del VI Generador_fichero_Esfera.vi

Como se puede observar en la gráfica de la señal recibida la distancia a la que se detecta la semiesfera es 181 cm respecto del array de micrófonos, lo cual tiene sentido ya que a través del cluster de controles de las coordenadas de la semiesfera, definimos una semiesfera de 0.09 metros de radio a 1.9 metros del array. Con lo cual el punto más cercano lo encontraremos a 1.81 metros.

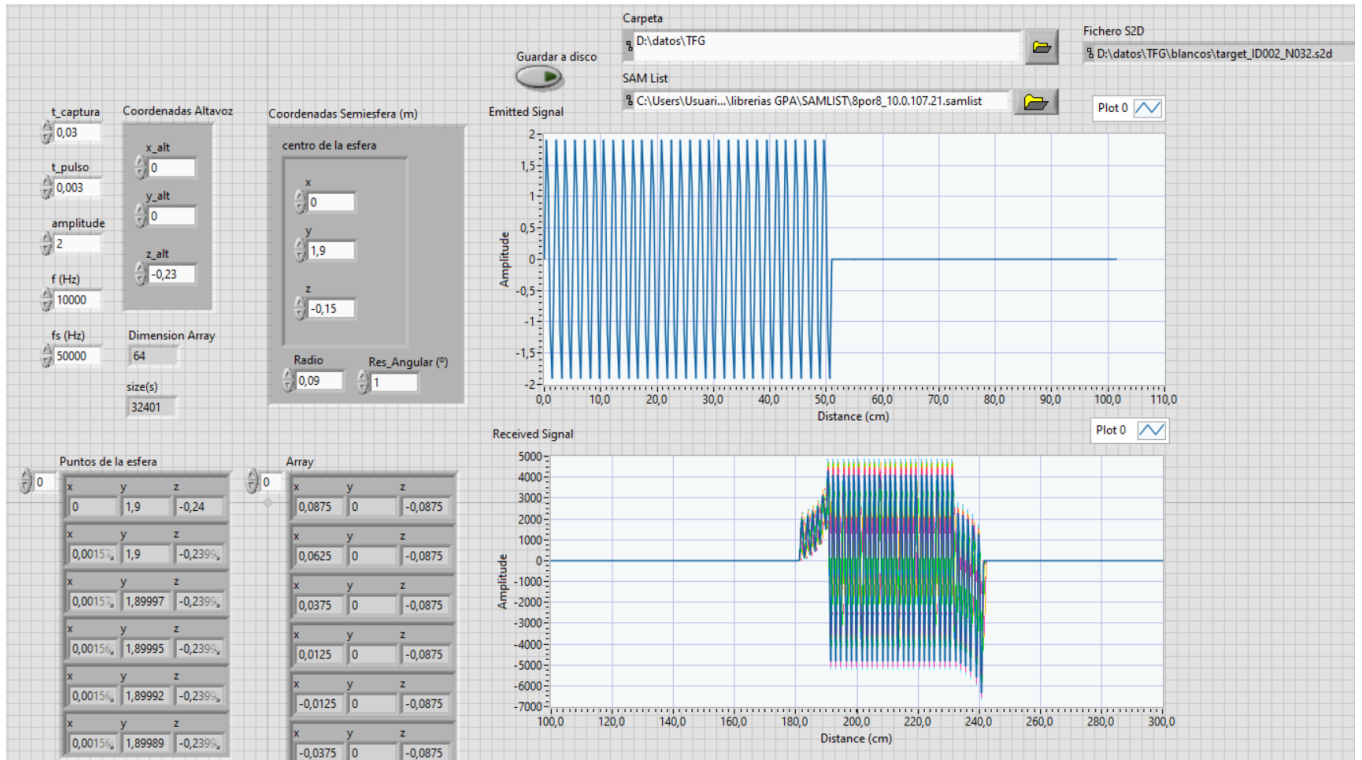


Figura 41: Panel frontal de Generador_fichero_Esfera.vi

8 RESULTADOS

En este apartado se detallan las distintas ejecuciones y resultados obtenidos del proyecto desarrollado.

- **Obtención de imágenes acústicas sintéticas** a partir del modelo teórico diseñado en LabVIEW.
- **Adquisición de imágenes de objetos reales con la cámara LiDAR:** se capturaron imágenes de diferentes objetos reales (una pelota, un cilindro, una persona...) con la cámara LiDAR para, a partir de esta nube de puntos LiDAR, obtener la imagen acústica.
- **Comparación de las imágenes acústicas obtenidas anteriormente con las imágenes acústicas reales** obtenidas a través de un array planar uniforme (UPA) compuesto por 8x8 micrófonos MEMS separados 2.5cm. La forma cuadrada del array proporciona igual resolución en azimuth y elevación.

8.1 Objetos simples

Para la obtención de las imágenes de objetos simples se trabajó con pulsos senoidales de 3ms de duración y de 10kHz de frecuencia.

8.1.1 Semicilindro

En este apartado se comparan los resultados obtenidos a partir de un cilindro real de 1.7 metros de altura y 6 cm de radio colocado a 1.4 metros del array con los resultados obtenidos a partir del modelo acústico, basado en la nube de puntos LIDAR y el generador sintético de cilindros.

En la siguiente figura se puede ver la similitud entre las imágenes acústicas obtenidas a partir del cilindro real, el cilindro sintético y la nube de puntos LiDAR del cilindro real. La figura 42a muestra la imagen acústica obtenida a partir del cilindro real empleando el sistema de adquisición acústica. En la figura 42b se puede ver la imagen acústica obtenida a partir del semicilindro sintético generado con nuestro programa. La figura 42c muestra la imagen acústica generada a partir de la nube de puntos LiDAR del cilindro real.

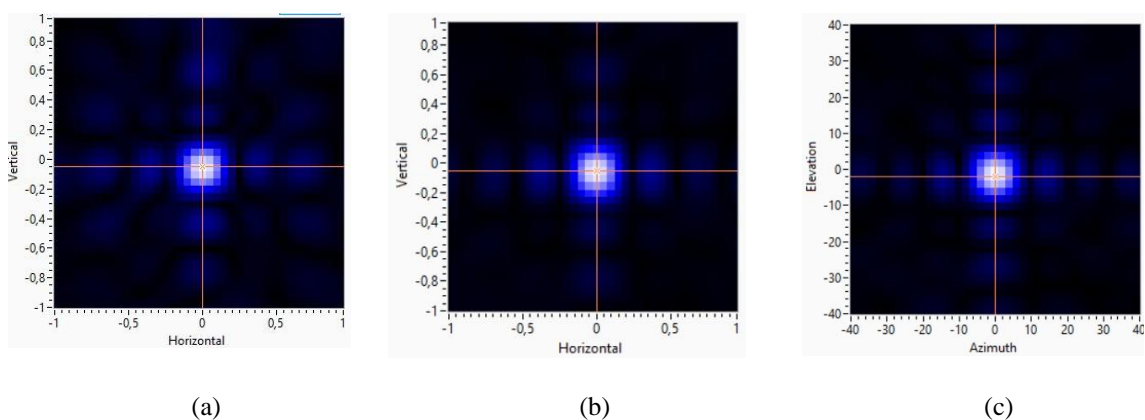


Figura 42: Imágenes acústicas obtenidas a partir de: (a) Cilindro real. (b) Semicilindro sintético. (c) Puntos LiDAR de un cilindro real.

8.1.2 Semiesfera

En este apartado se ha comparado el comportamiento de una esfera real (una pelota de 9 cm de radio aproximadamente y situada a 1.9 metros del array acústico a 0° en azimuth y 0.5° en elevación) con la esfera sintética generada sintéticamente.

En la figura siguiente se muestran las imágenes acústicas obtenidas en este primer escenario. La figura 43a muestra la imagen acústica real obtenida con el sistema de adquisición acústica. La subfigura 43b muestra la imagen acústica obtenida a partir de una esfera sintética creada con el generador de objetos. En la subfigura 43c se puede ver la imagen acústica generada a partir de la nube de puntos LiDAR de una esfera real.

Se puede observar una diferencia en la altura del eco producido por la esfera en la figura 43a respecto a las otras dos figuras. Esto es consecuencia de que, en este experimento, la cámara LiDAR y el array de micrófonos se encuentran separados 25 cm en vertical. Por lo demás, las tres imágenes son bastante similares.

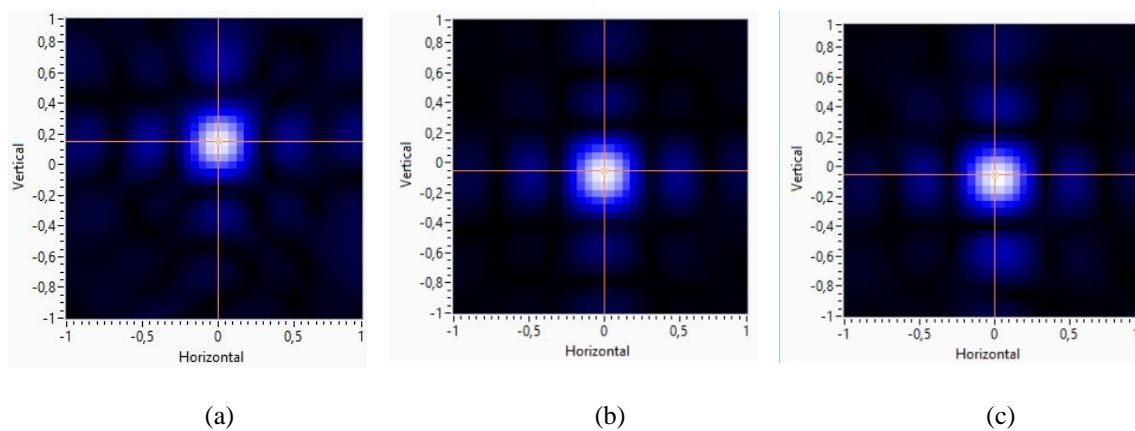
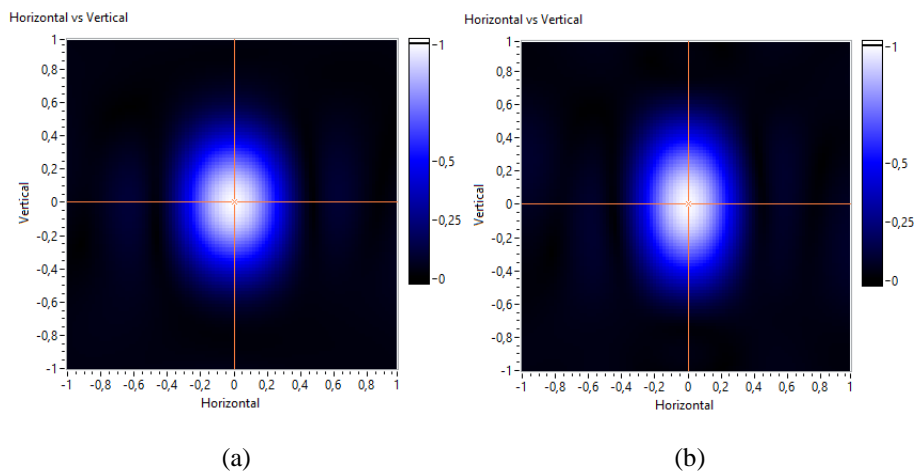


Figura 43: Imágenes acústicas obtenidas a partir de: (a) Esfera real. (b) Semiesfera sintética. (c) Puntos LiDAR de una esfera real.

A continuación, se muestran las imágenes acústicas obtenidas a partir de esferas de distintos radios creadas con el generador de objetos sintéticos. De este modo, se podrá ver cómo varían las imágenes acústicas en función del radio de la esfera bajo estudio.



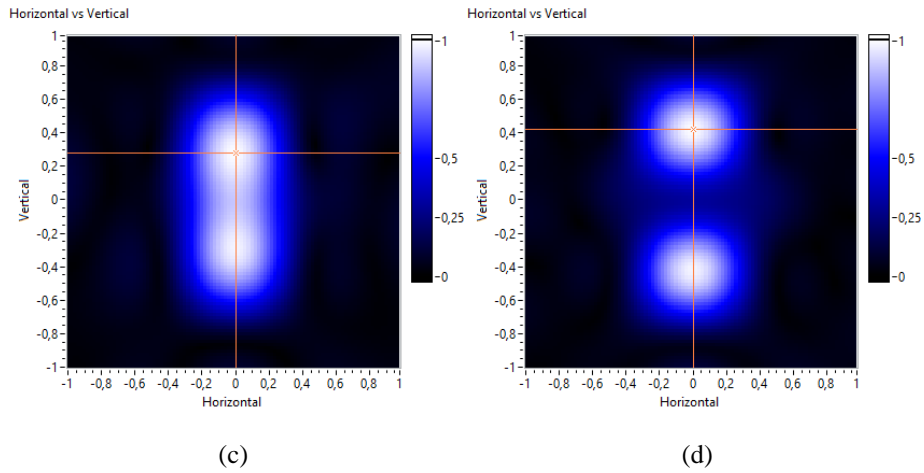
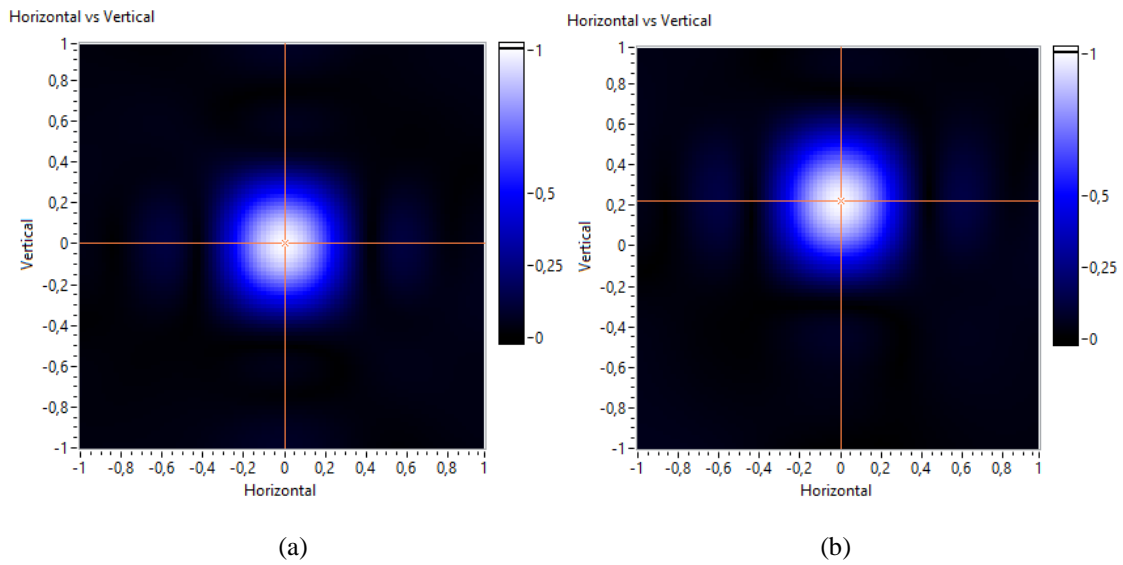


Figura 44: Imágenes acústicas obtenidas a partir de esferas sintéticas de radio: (a) Radio = 18 cm. (b) Radio = 23 cm. (c) Radio = 27 cm (d) Radio = 36 cm.

Con la esfera de pequeño tamaño únicamente se observa un foco de reflexión, sin embargo, cuando el tamaño de la esfera aumenta se aprecian dos focos de reflexión por separado. Esto se debe a que, debido a las grandes dimensiones de la esfera las señales reflejadas no se comportan como ondas planas.

En la siguiente figura se muestran las imágenes acústicas de la esfera sintética de 9 cm de radio colocada a 1,9 m de distancia y a diferentes alturas sobre el origen de coordenadas:



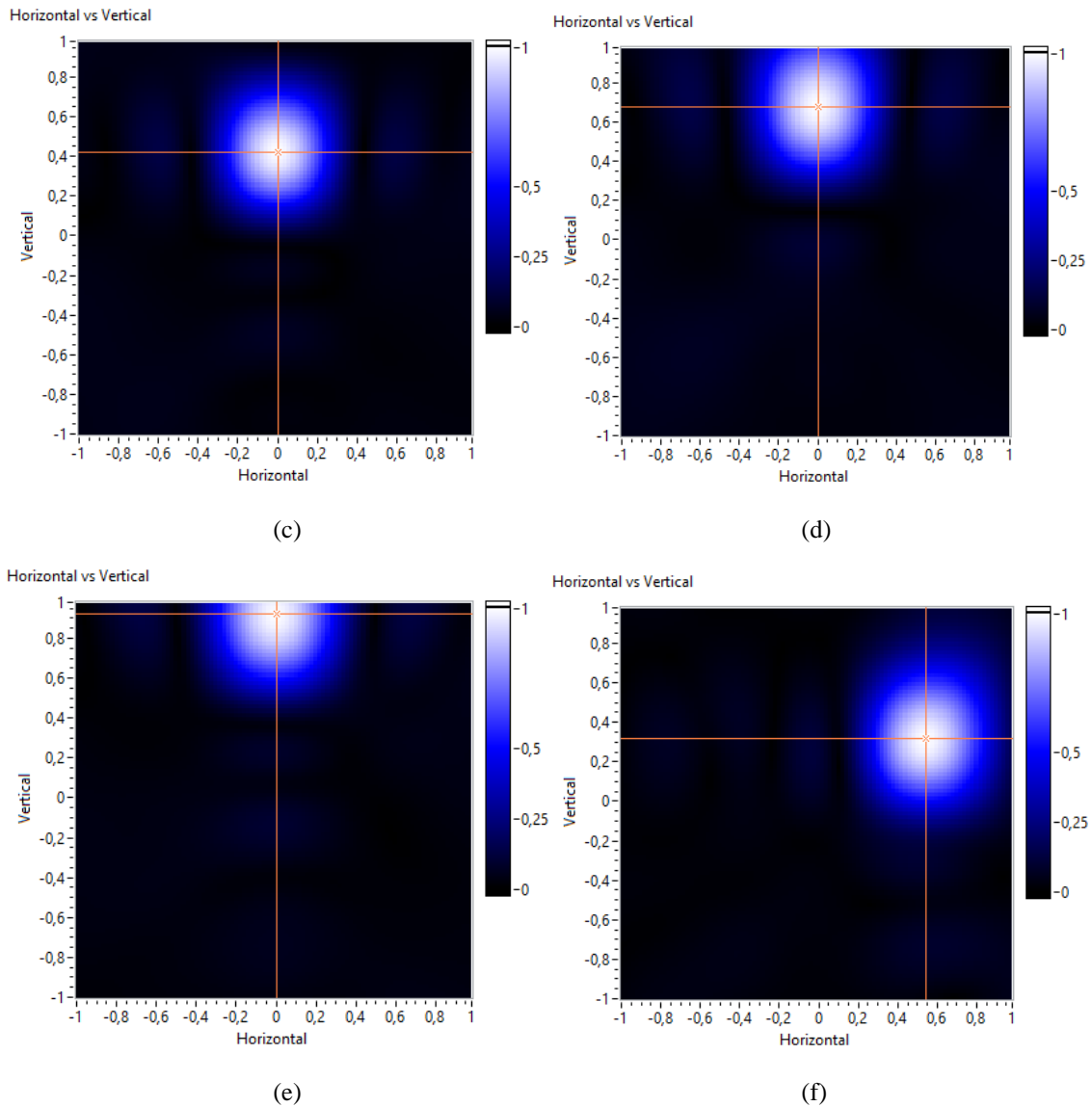


Figura 45: Imágenes acústicas de una esfera sintética de 9 cm de radio situada a 1,9 m y a una altura: (a) 0 cm sobre el origen. (b) 20 cm sobre el origen. (c) 40 cm sobre el origen. (d) 60 cm sobre el origen. (e) 80 cm sobre el origen. (f) 30 cm sobre el origen y 50 cm en la coordenada x.

Como se puede observar la imagen acústica obtenida a partir de una esfera generada sintéticamente no varía demasiado con la posición en la que se encuentra la esfera lo cual se debe a que el modelo de reflexión acústica en el que se basa el simulador asume que todos los puntos de la semiesfera reflejan la señal hacia el array de micrófonos cuando en la realidad lo que ocurre es que únicamente llegan al array las señales que inciden sobre los puntos de la esfera que se encuentran en la dirección normal. De este modo, la imagen acústica obtenida a partir de una esfera sintética y la imagen acústica generada a partir de la nube de puntos LiDAR de una esfera real son iguales cuando la esfera se encuentra en la dirección normal al array ya que los puntos de la semiesfera creada con el generador y los puntos capturados por la cámara LiDAR son prácticamente los mismos. [10]

8.2 *Objetos complejos – Personas*

Para el análisis de objetos complejos se modificó la frecuencia de la señal emitida y se trabajó con pulsos de 15 kHz y 3 ms de duración.

8.2.1 Modelado de una persona mediante esferas

En este apartado se trató de modelar una persona mediante siete esferas de 12 cm de diámetro colocadas de manera que representen distintas partes del cuerpo de una persona.

El origen de coordenadas viene determinado por el centro del array de micrófonos y la cámara LiDAR que se situaron a una altura de 106 cm sobre el suelo. Las coordenadas de las distintas esferas se pueden ver en la siguiente tabla:

Target	Coordenada X	Coordenada Z	Distancia
Cabeza	0 cm	65 cm	210 cm
Hombro izquierdo	-20 cm	42 cm	210 cm
Hombro derecho	20 cm	42 cm	210 cm
Pecho	0 cm	30 cm	210 cm
Cintura	0 cm	-4 cm	210 cm
Rodilla izquierda	-13 cm	-50 cm	210 cm
Rodilla derecha	13 cm	-50 cm	210 cm

Figura 46: Tabla con las coordenadas de las 7 esferas que modelan una persona.

En las siguientes figuras se muestra la posición de las esferas reales y la de las esferas generadas de forma sintética:

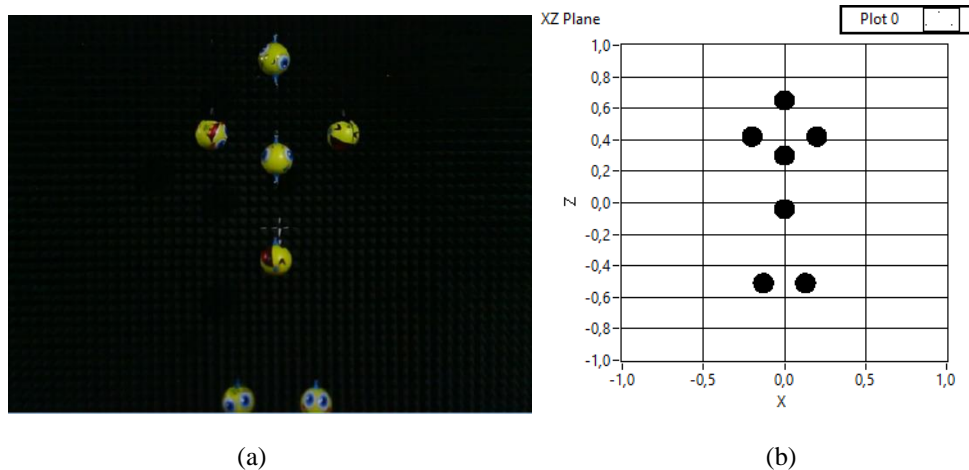


Figura 47: (a) Visualización de las 7 esferas reales. (b) Visualización de las esferas 7 esferas sintéticas.

A continuación, se muestran las imágenes acústicas de las 7 esferas. La figura 48a corresponde a la imagen acústica real obtenida con el sistema acústico SAM. La figura 48b muestra la imagen acústica obtenida con el simulador a partir de la generación sintética de las 7 esferas. En la figura 48c se puede ver la imagen acústica generada con el simulador y empleando la nube de puntos de las 7 esferas capturadas con la cámara LiDAR.

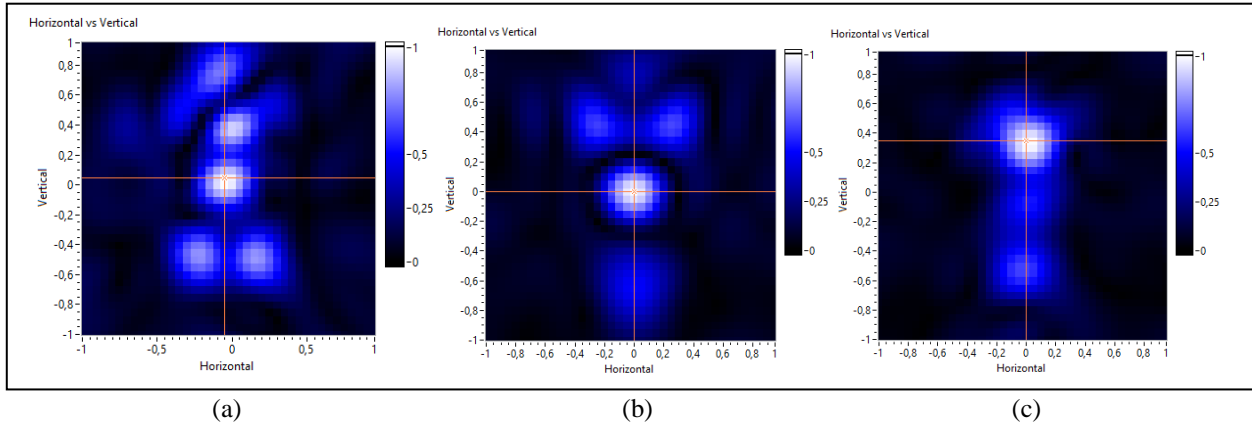


Figura 48: Imágenes acústicas obtenidas a partir de: (a) 7 esferas reales. (b) 7 esferas sintéticas. (c) Puntos LiDAR de 7 esferas.

Las diferencias entre la imagen acústica de las esferas sintéticas (figura 48b) y la imagen acústica de las esferas creadas a partir de la nube de puntos LiDAR (figura 48c) se deben a que los puntos de las esferas únicamente coinciden cuando estas están situadas en la dirección normal al array. Los puntos LiDAR de las esferas que se encuentran por encima o por debajo del array difieren de los puntos de las semiesferas creadas sintéticamente con el generador de objetos.

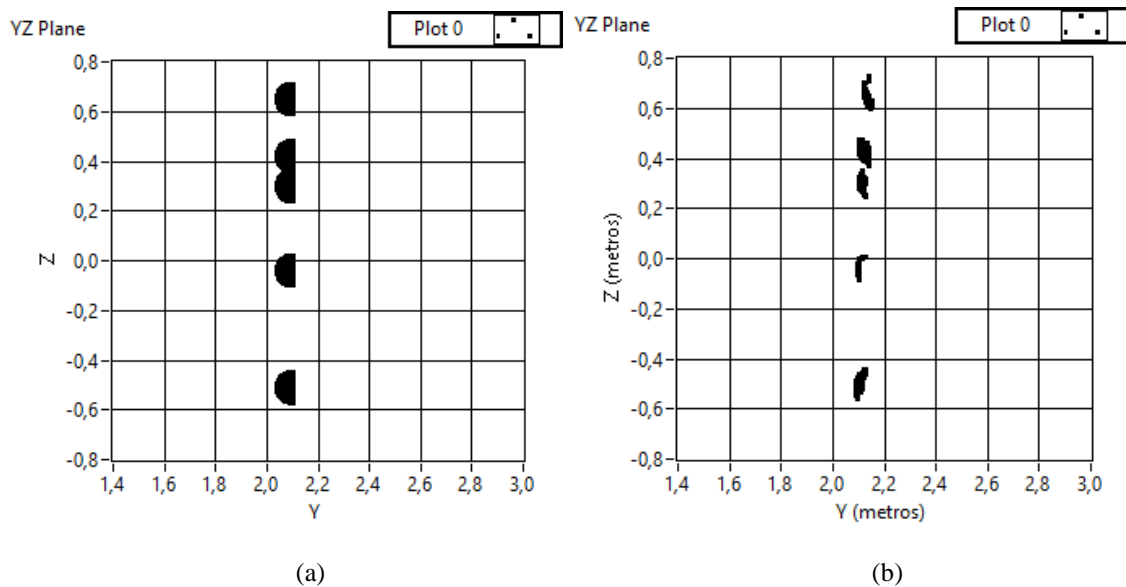


Figura 49: (a) Vista lateral de las 7 esferas sintéticas. (b) Vista de los puntos LiDAR de las 7 esferas.

Tal y como se puede observar en la figura anterior, la cantidad y la posición de los puntos capturados con la cámara LiDAR (figura 49b) son distintas que en el caso de la generación sintética de las semiesferas (figura 49a) lo cual da lugar a diferencias en las imágenes acústicas resultantes.

Por otro lado, como ya se comentó anteriormente, una esfera únicamente refleja especularmente las señales que inciden en la dirección normal a la superficie. Sin embargo, el simulador desarrollado se basa en un modelo acústico simplificado en el que todos los puntos del objeto bajo estudio reflejan las señales hacia el array de micrófonos. De este modo, dado que en una esfera real solo unos pocos puntos reflejan la señal incidente hacia el array, una manera de modelar este comportamiento es colocar un único punto en la posición de cada una de las siete esferas, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente figura: [11] [12]

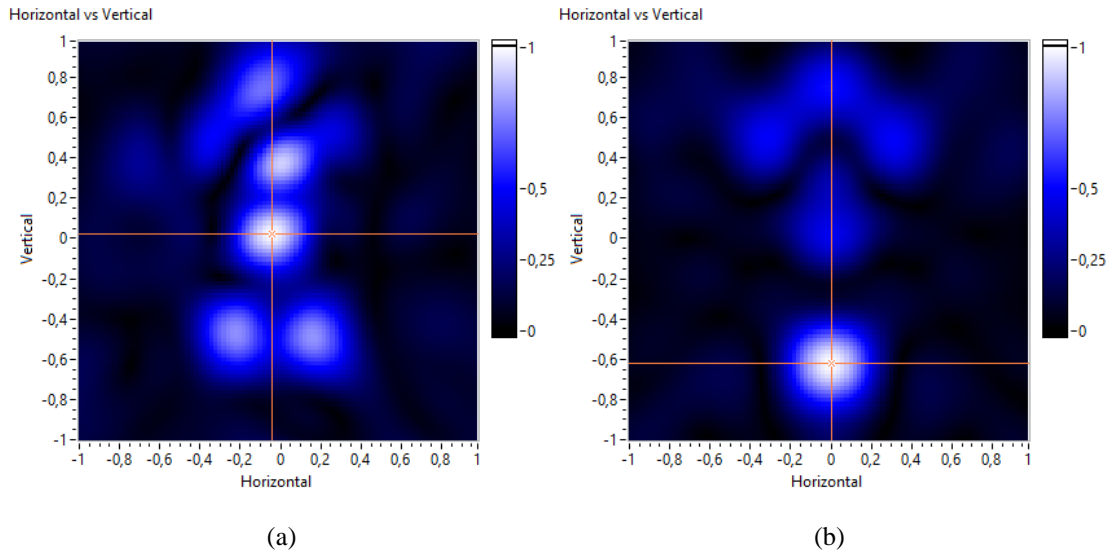


Figura 50: Comparativa entre: (a) Imagen acústica obtenida a partir de 7 esferas reales. (b) Imagen acústica obtenida a partir de 7 puntos colocados en las posiciones de las esferas.

8.2.2 Persona real

En este escenario, se comparan los resultados obtenidos a partir de una persona de 1.7 metros de altura situada a 2 metros del array de micrófonos.

A diferencia de los casos anteriores, en los que se comparaban tres imágenes, en este caso únicamente se comparan dos imágenes ya que no es posible generar una persona con el generador sintético de objetos.

De este modo se compara la imagen acústica real capturada mediante el sistema acústico a partir de la persona real y la imagen acústica sintética generada a partir de la nube de puntos LiDAR de la persona.

Se analizan dos casos: en el primero la persona tiene los brazos extendidos mientras que, en el segundo caso, la persona tiene los brazos pegados al cuerpo.

PERSONA CON BRAZOS EXTENDIDOS

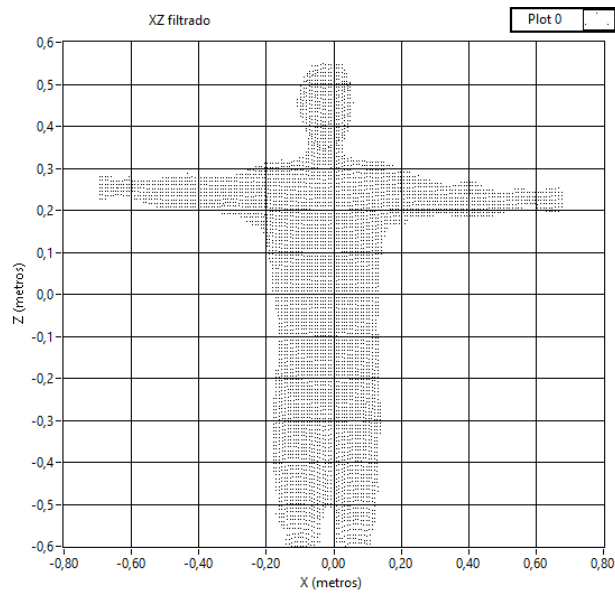


Figura 51: Nube de puntos LiDAR de una persona con los brazos extendidos.

A continuación, se muestran las imágenes acústicas de una persona con los brazos extendidos.

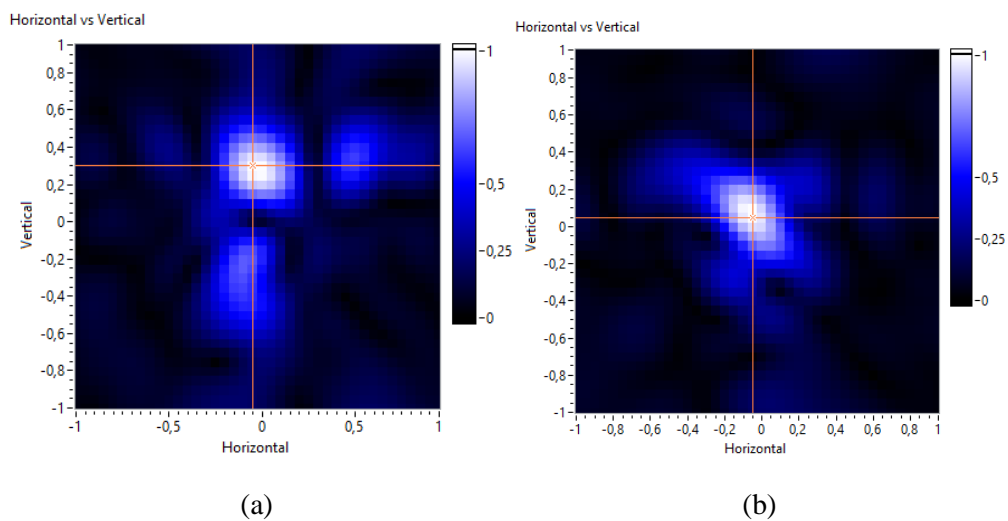


Figura 52: (a) Imagen acústica real de una persona con los brazos extendidos. (b) Imagen acústica sintética generada a partir de la nube de puntos LiDAR de una persona con los brazos extendidos.

En ambas imágenes se aprecia que el eco más fuerte se recibe por la parte central y corresponde al pecho y la cabeza mientras que a los lados y en la parte inferior se produce una reflexión más suave en los brazos y la parte inferior del cuerpo.

PERSONA CON LOS BRAZOS NO EXTENDIDOS

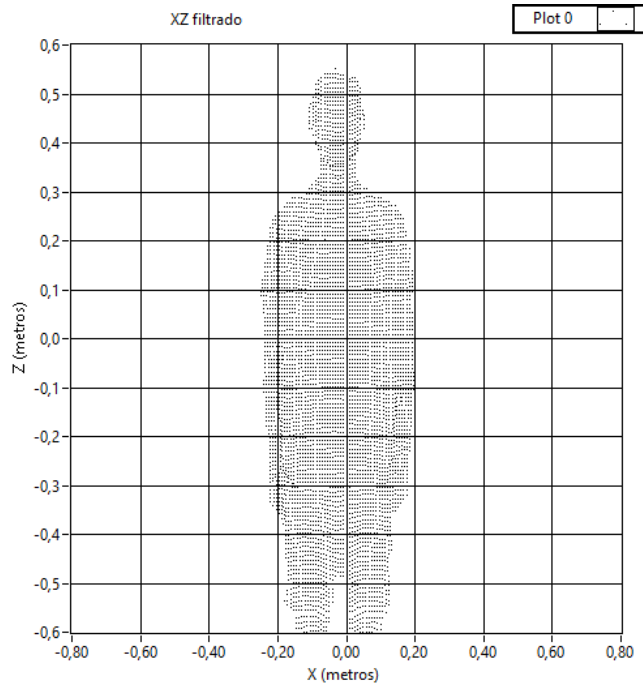


Figura 53: Nube de puntos LiDAR de la persona con los brazos no extendidos.

En las figuras siguientes se muestran las imágenes acústicas de la persona con los brazos pegados al cuerpo.

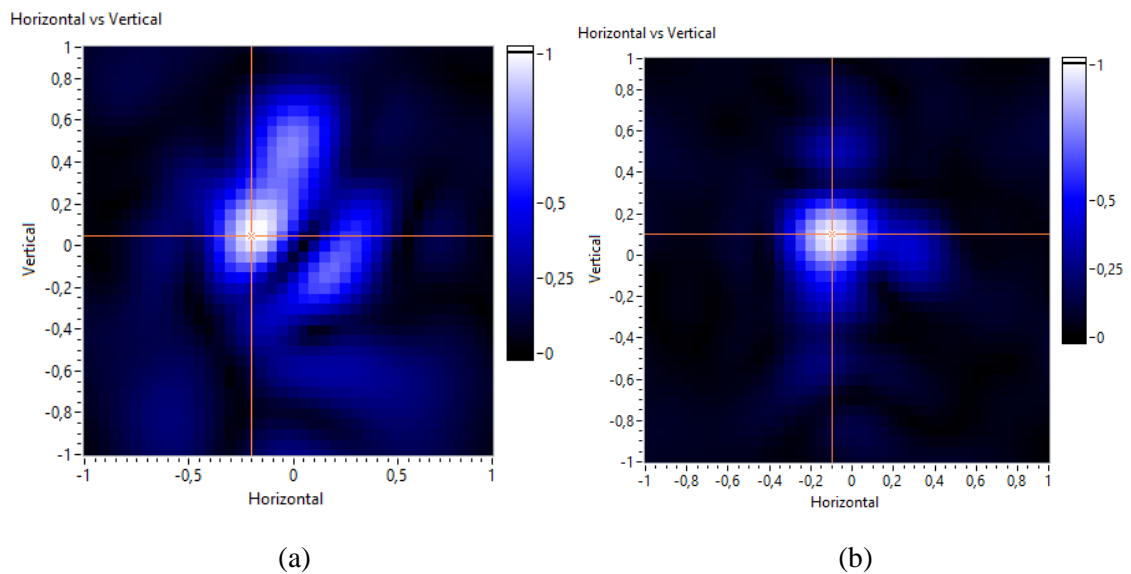


Figura 54: (a) Imagen acústica real de una persona con los brazos no extendidos. (b) Imagen acústica sintética generada a partir de la nube de puntos LiDAR de una persona con los brazos no extendidos

En este caso también se aprecia el eco procedente del pecho y la cabeza en la parte superior central y ya no aparece el eco de los brazos extendidos.

En resumen, el sistema permite detectar distintas partes del cuerpo humano: la cabeza/pecho, los brazos si están extendidos y la parte inferior del cuerpo. Finalmente, cabe destacar que la cámara LiDAR no proporciona información acerca de la reflectividad acústica de la persona, lo cual da lugar a que la imagen acústica real y la imagen acústica sintética sean diferentes.

9 CONCLUSIONES

El resultado de este proyecto es la implementación de un simulador de imágenes acústicas. El proyecto abarcaba varios objetivos: desarrollar el simulador con LabVIEW y obtener imágenes acústicas sintéticas, capturar imágenes acústicas reales con un sistema de adquisición acústico y comparar estas imágenes acústicas reales con las sintéticas.

El primer objetivo, el desarrollo del simulador con LabVIEW fue el que más tiempo y carga de trabajo ha requerido. Para ello, se fue aumentando gradualmente la complejidad de las simulaciones. De este modo, se empezó por simular un escenario sencillo, el de la reflexión de la señal emitida sobre un objeto puntual. Más adelante, se simuló la reflexión sobre una superficie plana formada por varios puntos, hasta finalmente simular la reflexión de la señal sobre cilindros y esferas.

En la fase de captura de imágenes acústicas con el simulador, la definición de un sistema de coordenadas preciso ha sido fundamental para que las coordenadas del emisor, el array de micrófonos y los distintos objetos utilizados en el simulador coincidiesen con las posiciones reales de los distintos elementos.

En este proyecto se ha desarrollado un simulador mediante la descomposición de la superficie de objetos de distinta geometría en una nube de puntos a partir de la cual obtener la imagen acústica asociada. A la vista de los resultados recogidos en el análisis y comparación de las imágenes acústicas reales con las imágenes acústicas sintéticas generadas por el simulador, se puede concluir que el modelo acústico de reflexión pulso-eco del simulador no es el más adecuado para modelar las imágenes acústicas de una persona. Si bien es cierto que, para el caso de objetos simples como cilindros y esferas, las imágenes acústicas reales y sintéticas coinciden, en el caso de objetos más complejos las imágenes acústicas reales y sintéticas difieren de forma notable. Aun así, se pueden identificar distintas partes del cuerpo de una persona (cabeza, brazos, pecho, etc.).

Para objetos complejos, el modelo utilizado asume que la reflectividad acústica de todos los puntos es la misma y que todos los rayos reflejados son captados por el array. Sin embargo, las pruebas realizadas muestran que hay diferencias entre las imágenes acústicas reales y las sintéticas (simuladas a partir e la nube de puntos LiDAR).

De cara a mejorar el modelo, sería necesario tener en cuenta los ángulos de incidencia y de reflexión en el objeto bajo análisis para una mejor estimación de la reflectividad acústica y para determinar qué rayos emitidos se reflejan en la dirección del array. Otra mejora sería la descomposición de la nube de puntos LiDAR en un conjunto de superficies reducidas caracterizadas por su vector normal.

La principal conclusión que se extrae de la realización de este proyecto es que el modelo acústico simplificado en el que se basa el simulador tiene margen de mejora porque el tipo de reflexión que se produce en los objetos sintéticos es distinto del que se produce en los objetos reales.

10 REFERENCIAS

1. Skolnik, M.I. Introduction to RADAR systems, 3rd Edition, McGraw-Hill Education, 2001.
2. McManamon, Paul F. LiDAR Technologies and Systems, SPIE PRESS, 2019.
3. Nappo, Carmen J. An Introduction to Atmospheric Gravity Waves, 2012.
4. Gilbert, K. E. Dynamical Meteorology | Acoustic Waves, Encyclopedia of Atmospheric Sciences, 2015
5. Christensen J. J. Hald J. Beamforming. Technical Review, 2004.
6. Ahmed Abdalla, Peiyu He, A Study of a various Acoustic Beamforming Techniques Using a Microphone Array, Journal of Communications Technology, Electronics and Computer Science, Issue 1, 2015.
7. National Instruments. NI myRIO Hardware at a Glance. (2021). [Available online]: <http://www.ni.com/product-documentation/14604/en/>
8. Intel RealSense L515 LiDAR Camera. (2022). [Available online]: <https://www.intelrealsense.com/download/7691/>
9. National Instruments. ¿Qué es LabVIEW? (2022). [Available online]: <https://www.ni.com/es-es/shop/labview.html>
10. Scott M. Juds, Photoelectric sensors and controls: selection and application, 1988.
11. Pat Hanrahan, Wolfgang Krueger, Reflection from Layered Surfaces due to Subsurface Scattering, 1993.
12. Tan, R.T., Specularity, Specular Reflectance, 2013.