

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN POSICIONADOR AUTOMÁTICO PARA LA OBTENCIÓN DEL PATRON DE RADIACIÓN

Tesis para optar el grado de Magíster en Física Aplicada a la Acústica, que
presenta el Ingeniero:

Samuel Alejandro Portocarrero Sotomayor

ASESOR: Jorge Néstor Moreno Ruiz

Lima, junio del 2018

RESUMEN

En la presente tesis se muestra el diseño y desarrollo de un sistema automático, basado en un posicionador de coordenadas esféricas, que permita obtener del patrón de radiación y balón de directividad de un altavoz. En dicho trabajo se presenta el proceso de investigación seguido, comenzando con la identificación y definición del marco problemático, pasando por la investigación del estado del arte en esta materia la cual nos brindará la información necesaria para plantear una solución útil; esta solución una vez diseñada e implementada permitirá realizar mediciones con diferentes resoluciones angulares consiguiendo así resultados del patrón de radiación y la directividad 3D del altavoz en evaluación en esta tesis, estos resultados serán analizados y documentados.

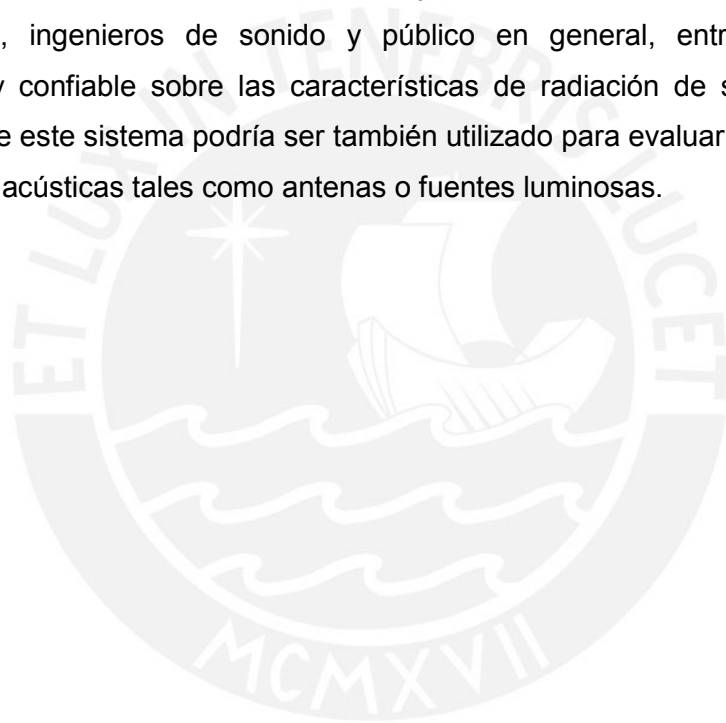
La primera parte del documento presenta el análisis de la problemática, la cual resalta la importancia y gran utilidad del patrón de radiación y directividad de una fuente sonora en diversas aplicaciones del audio y la acústica, planteando así la necesidad de obtener estos parámetros acústicos. Al finalizar el capítulo se declara el marco problemático que supone la obtención de la directividad, analizando para ello todos los factores y aspectos que se deben tomar en cuenta durante las mediciones del patrón de radiación.

Con el marco problemático ya declarado, se plantea la necesidad de diseñar un sistema capaz de solucionar los problemas en la obtención de estos parámetros; para ello se investiga el estado del arte donde se estudian los métodos y técnicas existentes vigentes tanto para la caracterización y medición de la respuesta del altavoz, para el procesamiento de señales, así como para el posicionamiento y medición angular.

Luego de haber investigado el estado del arte, en el tercer capítulo se plantea un sistema automatizado capaz de realizar barridos angulares en el espacio circundante y que obtenga la respuesta en frecuencia (H1) de un altavoz convencional a partir del auto espectro de la respuesta impulsiva promedio del sistema y más técnicas que se verán en el desarrollo del capítulo. En detalle se presentan los aspectos técnicos y teóricos por etapas del diseño del sistema mencionado.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos realizados, los problemas encontrados durante los mismos y un análisis de los resultados confrontándolos con los datos teóricos y las hipótesis planteadas inicialmente; es a partir de estas conclusiones que se podrán plantear recomendaciones de uso y eventuales mejoras a futuro.

Finalmente se expone un modelo de negocio elaborado a partir del sistema automático desarrollado; este emprendimiento se basa en brindar un servicio de medición de la directividad de altavoces y fuentes sonoras a empresas fabricantes, arquitectos, ingenieros de sonido y público en general, entregando información completa y confiable sobre las características de radiación de sus altavoces. Cabe resaltar que este sistema podría ser también utilizado para evaluar la radiación de otras fuentes no acústicas tales como antenas o fuentes luminosas.



INDICE

| | |
|---|------|
| <u>INTRODUCCION</u> | p.6 |
| <u>CAPITULO 1: EL PATRON DE RADIACION: UNA NECESIDAD ACTUAL</u> | p.7 |
| 1.1 Definición del patrón de radiación | p.7 |
| 1.2 El patrón de radiación en la industria del audio | p.8 |
| 1.2.1 Modelamiento de recintos por programas (<i>software</i>) | p.8 |
| 1.2.2 Predicción de la interacción de altavoces. | p.10 |
| 1.2.3 CLF: Formato común de altavoces | p.10 |
| 1.2.4 Auralización | p.11 |
| 1.2.5 Directividad | p.11 |
| 1.2.6 Nivel de presión sonora (L_p) | p.12 |
| 1.3 Análisis de la complejidad en la obtención del patrón de radiación. | p.13 |
| 1.4 Declaración del marco problemático | p.15 |
| <u>CAPITULO 2: METODOS DE OBTENCION DEL PATRON DE RADIACION</u> | p.16 |
| 2.1 Estado del arte. | p.16 |
| 2.1.1 Presentación del asunto de estudio | p.16 |
| 2.1.2 Estado de la investigación | p.17 |
| I. Caracterización de la respuesta del altavoz | p.17 |
| a. Respuesta impulsiva. | p.17 |
| b. Señal impulso tonal (<i>Tone Burst</i>) | p.18 |
| c. Barrido sinusoidal (<i>Sweep Tone</i>) | p.19 |
| d. TDS: Espectrometría de retardo de tiempo | p.20 |
| e. MLS: Secuencia de máxima longitud | p.21 |
| f. SSR: Respuesta de estado estable | p.22 |
| II. Acondicionamiento y entorno de medición | p.22 |
| a. Medición en campo libre | p.22 |
| b. Medición en cámara anecoica | p.23 |
| III. Procesamiento de data | p.23 |
| a. MATLAB® | p.24 |
| b. BRÜEL & KJÆR PULSE™ | p.25 |
| c. CLIO: Sistema de medición | p.25 |

| | | |
|-------|--|------|
| IV. | Mecanismos de posicionamiento angular | p.26 |
| | a. Tornamesa | p.26 |
| | b. Arreglo de micrófonos | p.28 |
| | c. Micrófono rotatorio | p.29 |
| | d. Mecanismo de posicionamiento esférico | p.30 |
| 2.1.3 | Síntesis sobre el asunto de estudio | p.32 |
| 2.2 | Conceptos y definiciones generales | p.33 |
| 2.3 | Modelo teórico | p.34 |
| 2.4 | Definiciones operativas | p.35 |

CAPITULO 3: DISEÑO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ANGULAR

| | | |
|-----|---|------|
| | <u>AUTOMATIZADO</u> | p.37 |
| 3.1 | Hipótesis | p.37 |
| | 3.1.1 Hipótesis principal | p.37 |
| | 3.1.2 Hipótesis secundarias | p.38 |
| 3.2 | Objetivos | p.38 |
| | 3.2.1 Objetivo General | p.38 |
| | 3.2.2 Objetivos específicos | p.39 |
| 3.3 | Sistema automatizado de obtención del patrón de radiación | p.39 |
| 3.4 | Área electrónica | p.41 |
| | 3.4.1 Fuente de alimentación de energía | p.43 |
| | 3.4.2 Acondicionamiento de los voltajes de alimentación | p.45 |
| | 3.4.3 Etapa de potencia | p.48 |
| | 3.4.4 Etapa de control de posición angular | p.51 |
| | 3.4.5 Etapa de control manual | p.57 |
| | 3.4.6 Etapa de comunicación USB - RS232 - TTL | p.58 |
| | 3.4.7 Etapa de micro controlador | p.59 |
| 3.5 | Área mecánica | p.60 |
| | 3.5.1 Cálculo y diseño de torque de movimiento | p.61 |
| | 3.5.2 Selección de motores | p.64 |
| | 3.5.3 Mecanismos de transmisión y movimiento | p.66 |
| 3.6 | Área de programación | p.79 |
| | 3.6.1 Controlador digital (ARDUINO® MEGA2560) | p.80 |
| | 3.6.2 Programación BRÜEL & KJÆR PULSE™ | p.84 |

| | | |
|--|--|-------|
| 3.6.3 | Sincronización MATLAB® | p.91 |
| 3.6.4 | Graficador de los patrones de radiación y polar | p.94 |
| 3.6.5 | Interface gráfica GUI | p.104 |
| 3.6.6 | Comunicación Cliente - Servidor OLE 2.0 | p.106 |
| 3.6.6 | Comunicación USB - RS232 tipo “apretón de manos” (<i>handshaking</i>) | p.107 |
| <u>CAPITULO 4: PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS</u> | | p.109 |
| 4.1 | Preparación de la medición | p.109 |
| 4.2 | Pruebas de sistema prototipo | p.112 |
| 4.2.1 | Pruebas de posicionador angular | p.113 |
| 4.2.2 | Pruebas de respuesta en frecuencia | p.113 |
| 4.2.3 | Pruebas de sistema automatizado | p.114 |
| 4.3 | Análisis de resultados | p.114 |
| 4.3.1 | Resultados del posicionador angular | p.115 |
| 4.3.2 | Resultados de la respuesta en frecuencia | p.115 |
| 4.3.3 | Resultados del sistema automatizado | p.115 |
| 4.4 | Estudio del error | p.123 |
| <u>APLICACIÓN INDUSTRIAL</u> | | p.124 |
| <u>CONCLUSIONES</u> | | p.125 |
| <u>BIBLIOGRAFIAS</u> | | p.126 |
| <u>ANEXOS</u> | | p.136 |

INTRODUCCIÓN

Una necesidad en la industria de altavoces es la implementación de nuevas técnicas de evaluación de los parámetros de altavoces y sistemas de altavoces, uno de estos es la dispersión de la energía sonora radiada la cual generalmente se evalúa y analiza a través del patrón de radiación.

Para evaluar y obtener estos parámetros se requieren mecanismos de posicionamiento que permitan caracterizar la respuesta del altavoz en cada coordenada de radiación con una resolución angular aceptable de acuerdo a la norma AES56-2008. En la actualidad muchos fabricantes proporcionan el patrón de radiación de sus dispositivos; sin embargo, en el Perú aún no se dispone de un método automatizado que permita la obtención de dicha directividad de fuentes sonoras.

El presente trabajo tiene por objetivo principal desarrollar un sistema automatizado realimentado que permita obtener el patrón de radiación y la directividad en 3D de un altavoz, la respuesta en frecuencia de esta fuente sonora se obtendrá empleando el método de la respuesta impulsiva del sistema. A partir de la información almacenada se obtiene el valor en decibeles para una misma frecuencia en todos los ángulos polares y azimutales barridos, estos valores graficados en coordenadas esféricas constituyen el patrón de radiación y directividad para una frecuencia determinada.

El diseño del sistema propuesto incluye: el desarrollo de un posicionador robótico de coordenadas esféricas; un montaje que permita generar señales, capturar el frente de onda y obtener la respuesta en frecuencia del altavoz; y una interface gráfica amigable que permita implementar la metodología movimiento-medición, es decir sincronizar e intercalar el funcionamiento del posicionador de coordenadas esféricas con la obtención de la respuesta en frecuencia del altavoz.

CAPÍTULO 1: EL PATRÓN DE RADIACIÓN: UNA NECESIDAD ACTUAL

En la industria de audio, la predicción y simulación del comportamiento de altavoces, así como su interacción con otros sistemas y recintos son una necesidad constante e importante, años atrás se utilizaban métodos analógicos para estos propósitos. Es con el avance tecnológico que se desarrollan programas y sistemas computarizados capaces de realizar estas simulaciones, significando así una mejora sustancial para el campo del audio y la acústica.

Para lograr dichas simulaciones se necesita conocer el comportamiento exacto de cómo radían los altavoces, en determinadas bandas de frecuencias y en direcciones angulares concretas, es bajo este marco que cobra gran importancia el concepto de patrón de radiación. En el presente capítulo se estudiará el importante rol que desempeña el patrón de radiación en la industria del audio, así como también se analizará la problemática y complejidad que supone la obtención del mismo en 3D de manera exacta y precisa; esto contribuye a tener una simulación acústica confiable.

1.1 Definición del patrón de radiación

El patrón de radiación o balón de directividad es una representación gráfica del nivel de presión relativa (L_p) del campo sonoro en todas direcciones circundantes de la fuente sonora y evaluado a distancias constantes para cada coordenada; en la presente tesis la fuente sonora es un altavoz. Este patrón ilustra las características de directividad de una fuente sonora usando una escala de presión en decibeles (dB) normalizados al valor máximo del gráfico en $0 dB$.

El patrón de radiación se representa en una gráfica tridimensional (Figura 1.6) compuesta a partir de capas bidimensionales o patrones polares, cada una de las cuales es una gráfica en coordenadas polares (r, θ) para cada elevación angular (Φ). Los datos del patrón de radiación pueden también ser presentados en una gráfica conocida como gráfica de cascada (*waterfall*).

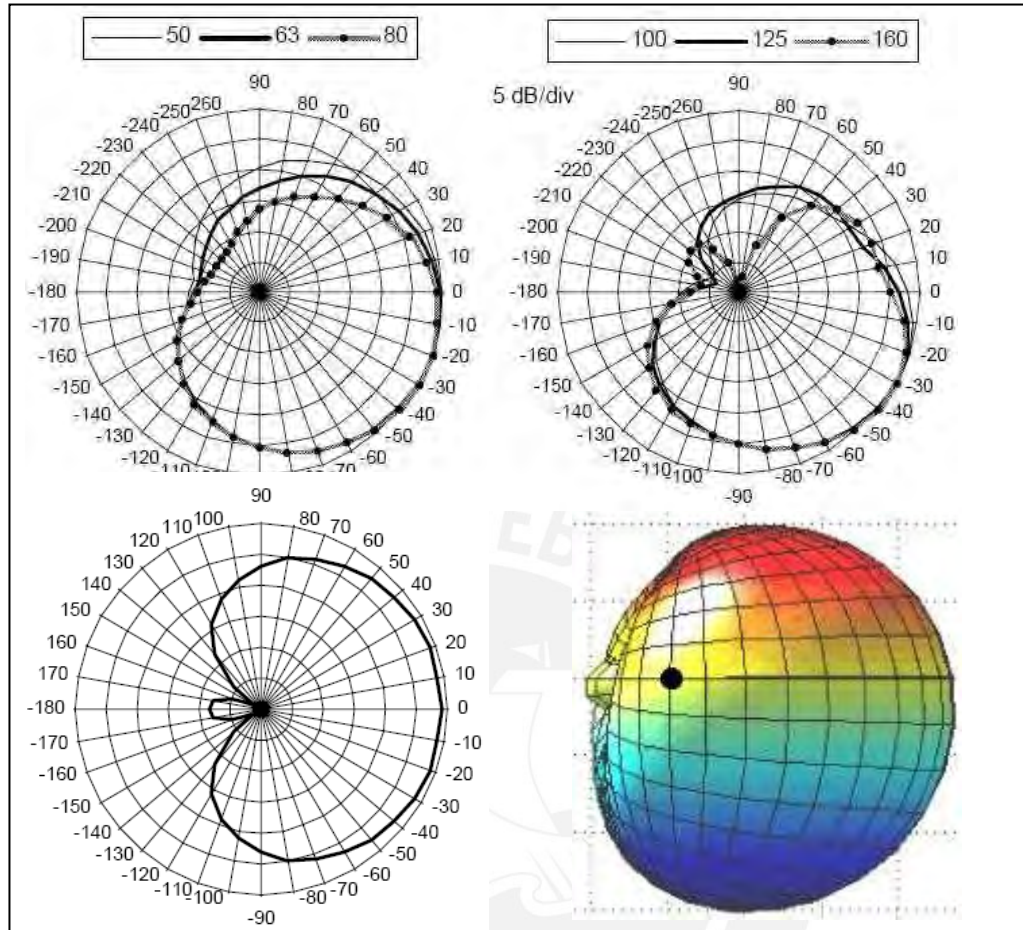


Fig. 1.1 PR: Respuesta vertical (arriba), horizontal y 3D a 80 Hz (abajo) [20]

1.2 El patrón de radiación en la industria del audio.

La industria del audio y la acústica en general han venido mejorando e implementando sus técnicas de medición de los parámetros acústicos de altavoces o sistemas de audio mediante programas predictivos, en este proceso el patrón de radiación ha sido un parámetro fundamental en el análisis del comportamiento de los altavoces. A continuación se verán sus aplicaciones en la industria del audio actual.

1.2.1 Modelamiento de recintos por programas (softwares).

El modelamiento computarizado de recintos fue propuesto durante los años 60's por Schröder y hasta el día de hoy sigue siendo un poderoso método de diseño al que muchos investigadores han contribuido; estos programas de modelamiento

asistido han ido evolucionando con el tiempo, siendo más amigables, exactos y económicos en comparación a otras técnicas de medición. Tan pronto como el plano arquitectónico del recinto es introducido al programa de simulación se ingresan las características de la fuente sonora (altavoz) y así la propagación del sonido puede ser simulada y analizada en interacción con el recinto. [11]

Para la simulación de un recinto mediante estos algoritmos se deben describir datos tales como la geometría del recinto, las fuentes sonoras y los receptores; la caracterización acústica de las superficies está basada en la absorción, dispersión y los principios físicos de los materiales. [15] La información de la fuente sonora es definida mediante el patrón de radiación el cual contiene información acerca de la directividad del altavoz y la presión sonora radiada desde dicha fuente.

Entre los programas más populares tenemos el ODEON, EASE y MAPP ONLINE®. En la Figura 1.2 se puede apreciar un recinto simulado en interacción con fuentes sonoras en su interior, para este ejemplo se usó el programa I-Simpa.

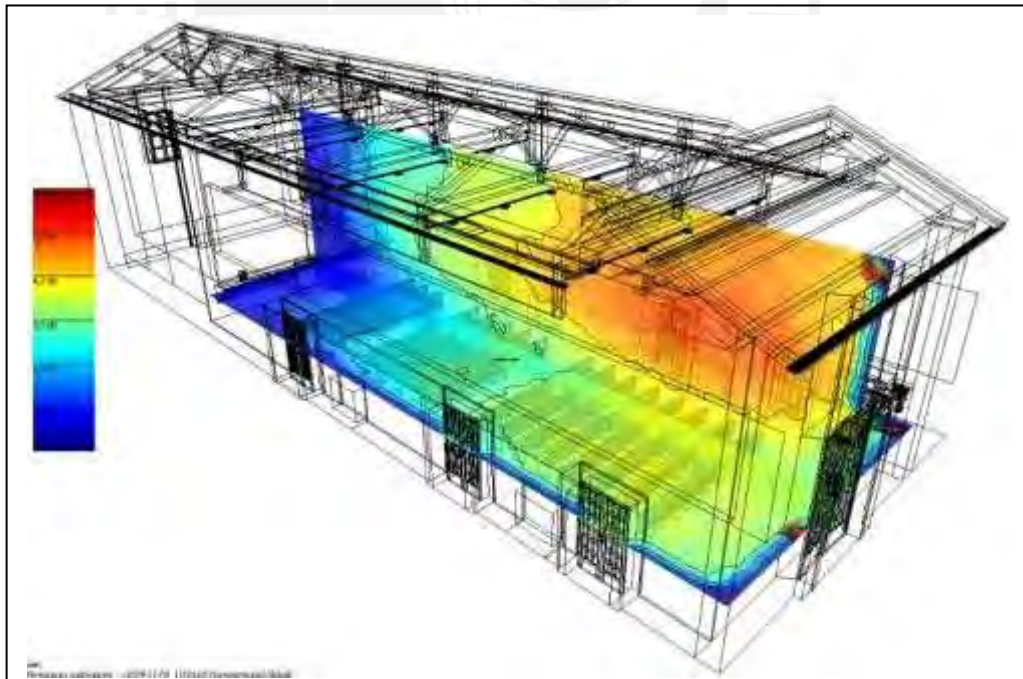


Fig. 1.2 Recinto simulado con el programa I-Simpa [51]

1.2.2 Predicción de la interacción de altavoces.

Se conoce así a la simulación de la directividad resultante de la combinación de dos o más altavoces que forman arreglos entre sí, esta simulación puede ser realizada de forma matemática [16] e implementada en programas de simulación como el realizado por David G. Mayer [17], o mediante los programas vistos anteriormente como es el caso del ODEON que también se aplican para esta clase de simulaciones [15]. Para estos procedimientos son necesarios los datos de la geometría de los altavoces, sus ubicaciones espaciales y el patrón de radiación de cada uno de ellos.

A continuación se presenta el resultado de una simulación realizada en ODEON de dos altavoces iguales para dos posiciones relativas diferentes (Figura 1.3). El programa predice el nivel de presión sonora resultante sumando en el plano real-imaginario los patrones de radiación (PR) individuales de cada altavoz. En estas simulaciones se consideran los efectos constructivos y destructivos de fase.

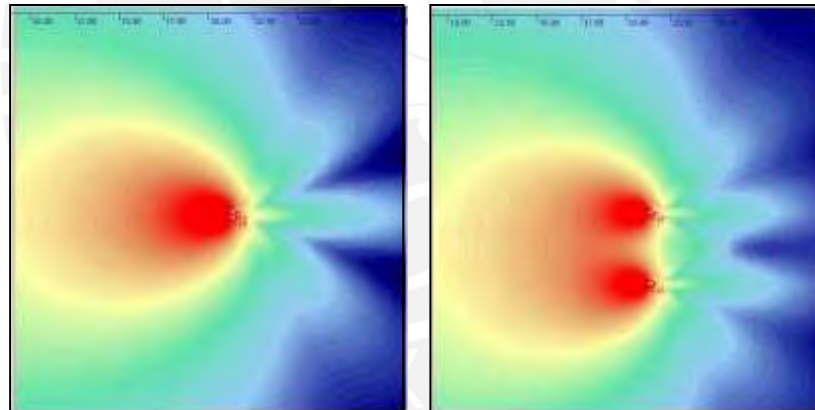


Fig.1.3 PR de dos altavoces cercanos (Izq.) y lejanos (Der.) [15]

1.2.3 CLF: Formato común de altavoces

Un grupo formado por los autores de los programas de predicción CATT – Acoustic™, ODEON, LARA, ULYSSES™ y SYN-AUD-CON, creó un formato delimitado para el ingreso de data de forma segura e identificable a los sistemas de simulación acústica, este formato es el CLF [18]. Se trata de un formato libre y estándar para la creación y presentación de las características de los altavoces que busca uniformizar y

ordenar la distribución de la información de altavoces; tales como el patrón de radiación.

El formato CLF se compone de una serie de valores en formato texto que son creados a partir de las mediciones realizadas a las fuentes sonoras en evaluación. El programa lector de CLF (*CLF Viewer*) analiza el archivo de texto, muestra el resultado para su verificación, y guarda los datos en un archivo de distribución binaria.

1.2.4 Auralización

Auralización es la técnica de crear y reproducir archivos de sonido audible a partir de data numérica (simulada, medida y sintetizada) [11]. Mediante esta técnica es posible predecir la interacción entre lo radiado por la fuente sonora y las fronteras del recinto. En la práctica la auralización permite escuchar el resultado de la interacción entre la señal radiada por la fuente y la geometría de un auditorio.

Mediante la auralización se simulan las condiciones actuales de diseño del recinto, de manera que permite tener la sensación auditiva y percepción sonora par una ubicación o caso específico del recinto. Cada uno de los altavoces o fuentes sonoras que sean usados ingresan a la simulación con su correspondiente data de dispersión o patrón de radiación.

1.2.5 Directividad

Es la propiedad o capacidad de direccionamiento de la energía que se expande o distribuye en el espacio circundante; es el conjunto de características acústicas, de radiación de energía, de una determinada fuente (nivel de presión) en función del ángulo de radiación. Para nuestro objeto de estudio la directividad representa el comportamiento de la radiación de un altavoz (nivel de presión sonora) para cada dirección angular discreta en que es evaluada (coordenadas esféricas). Esta directividad es representada con un conjunto de patrones de radiación tomados para diferentes valores de frecuencia. A continuación se muestra una representación de la directividad de un altavoz:

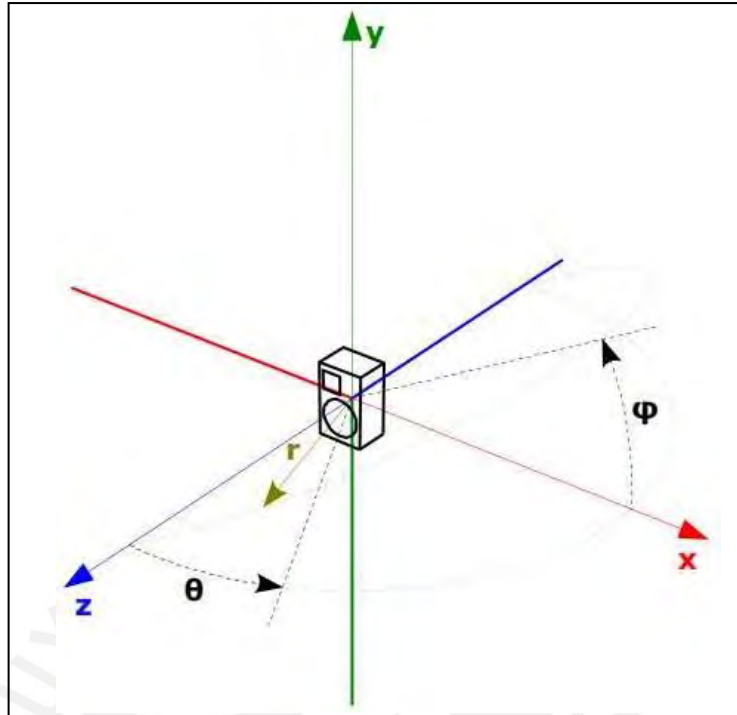


Fig. 1.4 Esquema de coordenadas para medir la directividad [22]

1.2.6 Nivel de presión sonora (L_p)

Se trata de una escala logarítmica que busca aproximar la presión sonora medida (en Pa) a la característica no lineal de la respuesta del sistema de audición humana. En consecuencia no se utiliza el pascal como unidad de medida, debido al amplio margen que hay entre la sonoridad más intensa y la más débil (entre $200 Pa$ y $20 \mu Pa$), normalmente se adopta la escala logarítmica y como unidad el decibelio (dB). Siendo el decibelio adimensional, para poder medir valores absolutos se necesita especificar a qué unidades está referida, en el caso del nivel de presión sonora en aire se toma como referencia $20 \mu Pa$. En la figura 1.5 se presenta un esquema que permite explicar los conceptos de intensidad (I) y nivel de presión sonora (L_p) en las condiciones de campo libre:

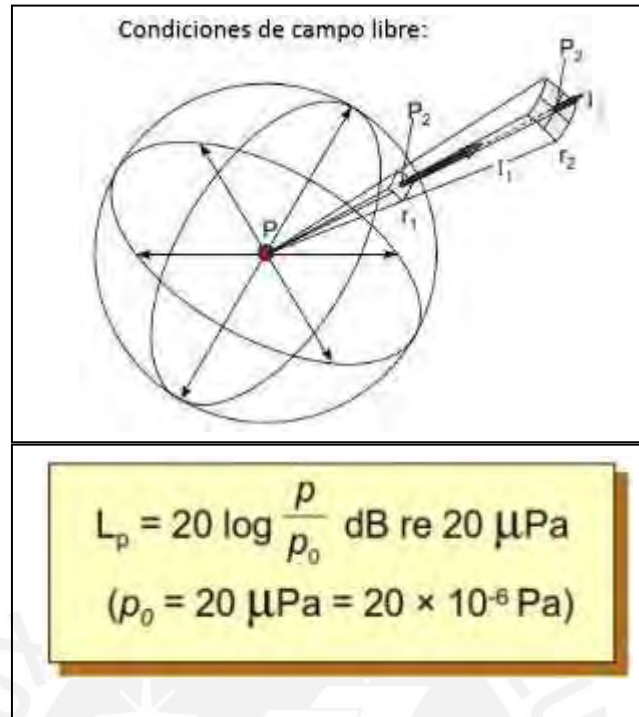


Fig. 1.5 Esquema de campo libre (arriba) y cálculo del L_p (abajo) [52]

1.3 Análisis de la complejidad

La obtención del patrón de radiación espacial es una tarea compleja, pues partiendo de la premisa teórica que la fuente radía en todo el espacio con dependencia angular, resulta necesario medir y caracterizar el comportamiento de dicha fuente para cada coordenada discreta en el espacio circundante.

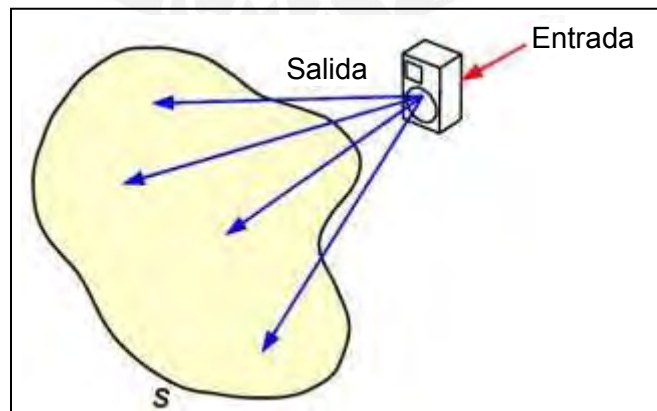


Fig. 1.6: Esquema de una entrada – múltiples salidas angulares [22]

Una fuente, en este caso un altavoz, es un sistema de una entrada eléctrica y una salida acústica generalmente no uniforme en el espacio (Fig. 1.6), esto es debido a que la radiación depende tanto de la frecuencia como del posicionamiento angular; para cada coordenada esférica la energía presenta diferentes características acústicas tales como presión, intensidad, densidad entre otras. De lo expresado anteriormente podemos presentar los siguientes factores a considerar:

- Se debe mantener una distancia uniforme entre el emisor (altavoz) y receptor (micrófono).
- La geometría de la fuente sonora repercute en la uniformidad de la distancia, con respecto al receptor, durante el posicionamiento angular.
- La caracterización de la respuesta altavoz debe realizarse para cada coordenada discreta del espacio circundante, con un nivel de resolución angular suficiente para representar el patrón de radiación de la fuente
- El desplazamiento angular ($\Delta\theta$ y $\Delta\Phi$) para cada posición discreta de medición debe ser constante, para así garantizar una descripción uniforme del patrón de radiación.
- Es necesaria la reconstrucción de los vacíos en las señales medidas mediante algoritmos matemáticos o interpolaciones; además de procesar la señal con enventanamientos en el tiempo y filtros.
- Emplear siempre la misma señal al emisor para mantener la coherencia en la medición.
- Considerar el aislamiento del ruido y la reverberación inherente del recinto.
- El tiempo de propagación que le toma al frente de onda llegar desde el altavoz hasta el micrófono, además de mantener la temperatura del recinto controlada durante toda la medición pues la velocidad del sonido es afectada por este factor [20].

1.4 Declaración del marco problemático006F

La problemática del asunto de estudio viene dada por la necesidad de representar la respuesta acústica del altavoz en toda su área circundante, de tal manera que cuando se emplean los resultados medidos, las simulaciones y aplicaciones posteriores tengan resultados coherentes y fiables; sin embargo existen tres errores significativos que supone la obtención del patrón de radiación [20]:

- La distancia asumida entre el micrófono y el altavoz no se mantiene constante para cada medición, esto genera error en la salida medida.
- Los pasos angulares que ejecuta el posicionador no se mantienen constantes. Esto genera error en los ángulos graficados en el patrón de radiación.
- La combinación de los efectos antes mencionados genera un error de fase acumulado en la señal medida.

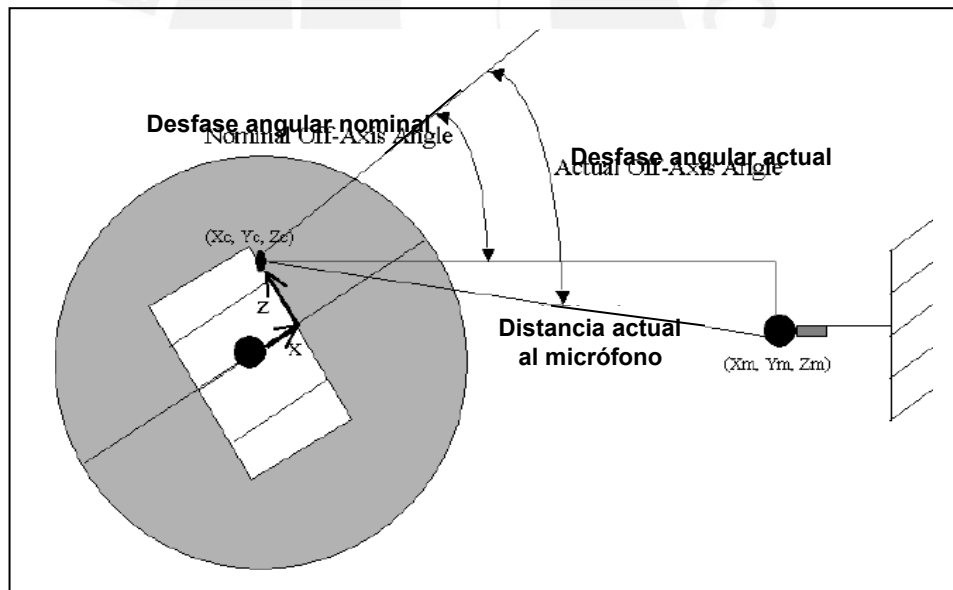


Fig. 1.7 Errores en la geometría física de la medición [21]

En conclusión se plantea la necesidad de medir el nivel de presión sonora de la fuente para cada coordenada esférica, manteniendo siempre la exactitud y abarcando uniformemente el espacio circundante; para esto se debe diseñar un mecanismo de posicionamiento preciso, automático, que no interfiera en la acústica de la medición y que alcance las coordenadas uniformemente y con precisión.

CAPITULO 2:

MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL PATRÓN DE RADIACIÓN DE ALTAVOCES

El proceso de obtención del patrón de radiación es un trabajo acústico integral, que involucra una serie de etapas y conceptos necesarios para el buen funcionamiento del sistema implementado; en tal sentido la industria del audio ha venido desarrollando técnicas y métodos involucrados en este proceso con el propósito de mejorar la exactitud en la medición del patrón de radiación, caracterizando así la respuesta del parlante de la forma más real posible.

El segundo capítulo presenta, de una manera sistemática, el análisis de las técnicas y métodos más importantes de la industria en la actualidad que pueden ser empleados en cada etapa del proceso de obtención del patrón de radiación; en cada punto se revisarán los pros y contras que supone la eventual implementación de alguno de ellos. A partir esta investigación del estado del arte se plantea el modelo teórico, incluyendo los métodos antes presentados, para finalmente presentar los indicadores cualitativos y cuantitativos del progreso de los objetivos planteados.

2.1 Estado del arte

El poder obtener el patrón de radiación de una manera exacta y efectiva es una necesidad para la industria de altavoces, es por tal motivo que, haciendo uso de la herramienta tecnológica se han desarrollado una serie de técnicas y metodologías para la medición de la directividad radiante. A continuación se analizará el nivel de desarrollo actual alcanzado.

2.1.1 Presentación del asunto de estudio

Para poder evaluar los métodos involucrados de una manera más ordenada se definen las etapas involucradas que interesan en el diseño del sistema automatizado de obtención del patrón de radiación [22]:

- Caracterización de la respuesta del altavoz.
- Acondicionamiento y entorno de medición.

- Mecanismos de posicionamiento angular.
- Procesamiento de data.
- Control e interface de usuario.

El estudio de estas etapas, y el análisis de las ventajas y limitaciones en cada una de ellas permitirá desarrollar un modelo teórico que será implementado en el diseño del sistema de obtención del patrón de radiación.

2.1.2 Estado de la investigación

I. Caracterización de la respuesta del altavoz

Existe una gran variedad de técnicas de caracterización de altavoces, en nuestro objeto de estudio la mayor parte de parámetros necesarios se encuentran en la respuesta en frecuencia. A continuación se presentaran las principales técnicas empleadas en la industria y en qué consiste cada una:

a. Respuesta impulsiva

Es la respuesta que presenta el sistema ante la excitación de una señal tipo pulso, teóricamente el pulso perfecto es un delta de Dirac. Esta señal es una cuyo valor, en términos temporales, es cero para todo instante excepto en $t=0$, la integral de la función en el dominio del tiempo es igual a la unidad [23]. El empleo de esta técnica fue una tarea común en la industria del audio en la década de los 80's y 90's [30].

A la respuesta impulsiva captada por el micrófono se le aplica un desplazamiento temporal (*offset*) con el propósito de compensar el tiempo de arribo desde el altavoz al micrófono además de una ventana temporal (filtro tipo ventana en el dominio del tiempo) para aislar la respuesta de interés de las reflexiones propias del recinto. Para mejorar la relación señal a ruido (S/R) esta respuesta impulsiva es tomada a partir del promedio de la emisión de un tren pulsos periódicos [24].

Entre las desventajas de este método se encuentran la baja inmunidad al ruido externo a bajas frecuencias y la necesidad de mantener un bajo ruido de fondo para lograr resultados óptimos. En la figura 2.1 se puede ver un diagrama de bloques para esta técnica.

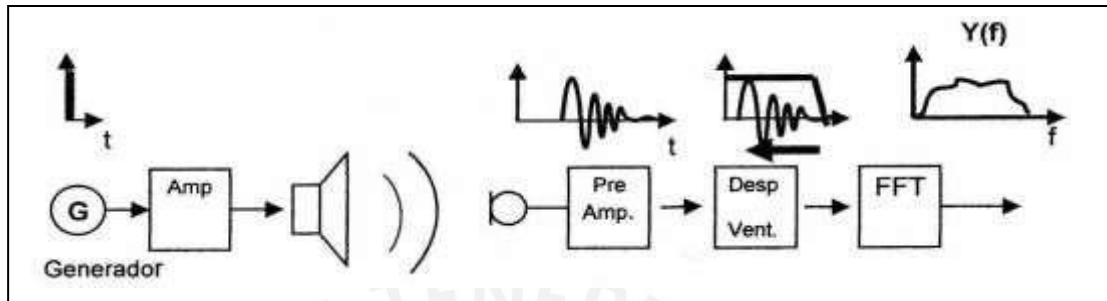


Fig. 2.1 Medición de la respuesta impulsiva. [14]

b. Señal impulso tonal (Tone Burst)

Consiste en un tono o pulso, de corta duración, a una determinada frecuencia. Esta técnica es útil cuando se realizan mediciones para frecuencias concretas; en pocas palabras, un *Tone Burst* es un tono enventanado que en el dominio de la frecuencia se comporta como una función impulsiva [26]. Es muy útil el uso de estos pulsos para realizar mediciones acústica pseudo anecoicas en ambientes ordinarios.

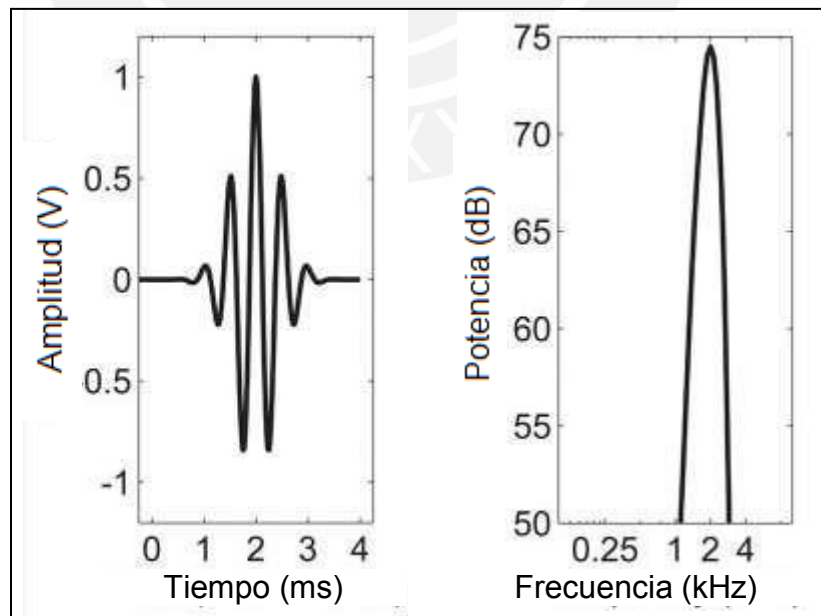


Fig. 2.2 Impulso tonal en el tiempo y en el dominio de la frecuencia [53]

En la Figura 2.2 se puede apreciar una señal de impulso tonal como una sinusoidal empaquetada en el tiempo. La respectiva señal en frecuencia viene dada como una señal impulso centrada en 2 kHz la cual es la frecuencia del disparo enviado].

c. Barrido sinusoidal (Sweep tone)

Un *sweep tone* es una señal sinusoidal cuya frecuencia, para fines de audio, varía logarítmicamente en el tiempo con lo cual se tiene un barrido en frecuencia en todo el rango en que es generado el barrido sinusoidal, mientras la amplitud de la señal se mantiene constante. Esta es una herramienta que permite obtener la función de transferencia del altavoz.

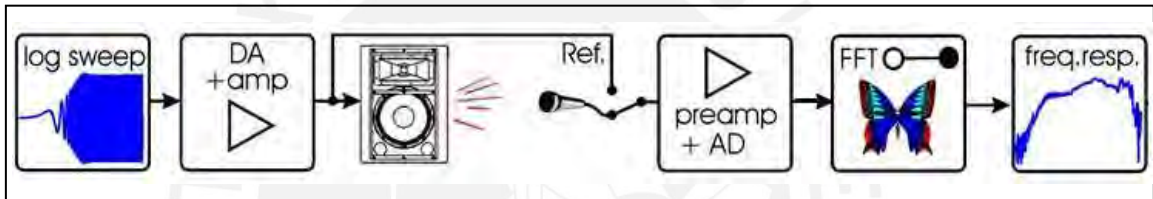


Fig. 2.3 Esquema de medición de la respuesta en frecuencia del sistema empleando un barrido sinusoidal logarítmico [29]

Este método trabaja todo el tiempo en el dominio de la frecuencia lo cual es una ventaja considerando que ya no se aplican digitalizaciones ni transformada de Fourier para obtener la respuesta en frecuencia buscada, además también presenta una buena relación señal a ruido. Hay que considerar que la aplicación de esta técnica implica generar una señal de barrido sinusoidal que mantenga constante la amplitud en todo el rango medido y que la medición se realice en las condiciones de recinto adecuadas.

d. **TDS: Espectrometría de retardo de tiempo**

TDS, o en español espectrometría de retardo de tiempo, es un método de medición de la respuesta en frecuencia de altavoces basado en barridos sinusoidales (*sweep tones*), este método diseñado originalmente por Richard Heyser también es aplicable en mediciones acústicas de salas o cualquier sistema *LTI* en general.

[31] Ante la problemática de la medición en ambientes reverberantes, el método TDS propone la implementación de un filtro de banda angosta sintonizada a la frecuencia de la señal captada por el micrófono, que varíe a la misma tasa de cambio que el barrido sinusoidal emitido. La frecuencia del pasabanda debe comenzar con un desplazamiento (*off-set*) que relaciona tanto la distancia entre emisor y receptor (X), así como la velocidad del sonido y en menor medida la temperatura del ambiente.

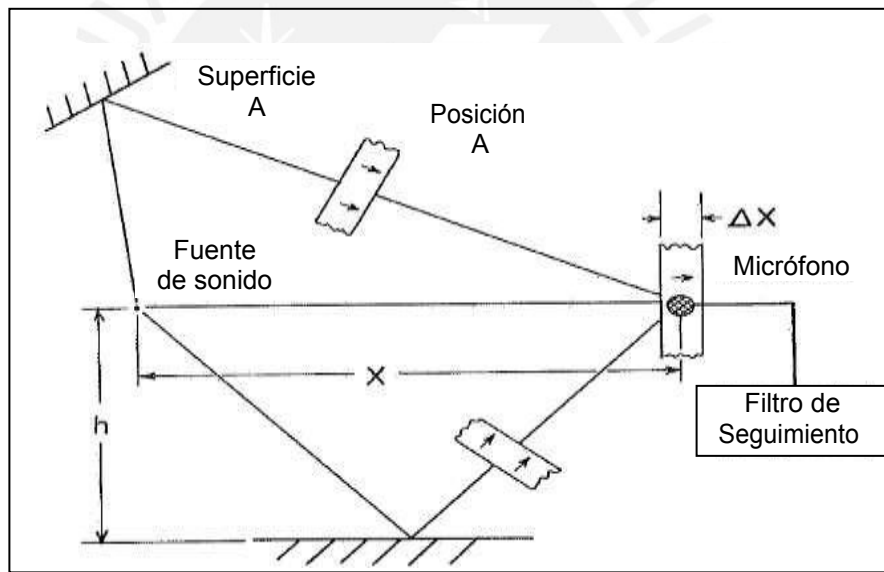


Fig. 2.4 Representación posicional de la onda de presión directa y reflejada [27]

Para asegurar una medición pseudo anecoica, incluso en ambientes reverberantes, la frecuencia del barrido emitido debe variar por lo menos el equivalente al ancho de banda del filtro sintonizado antes de que la primera reflexión sea captada por el micrófono [32]. En la figura 2.5 se presenta el esquema de medición mediante TDS.

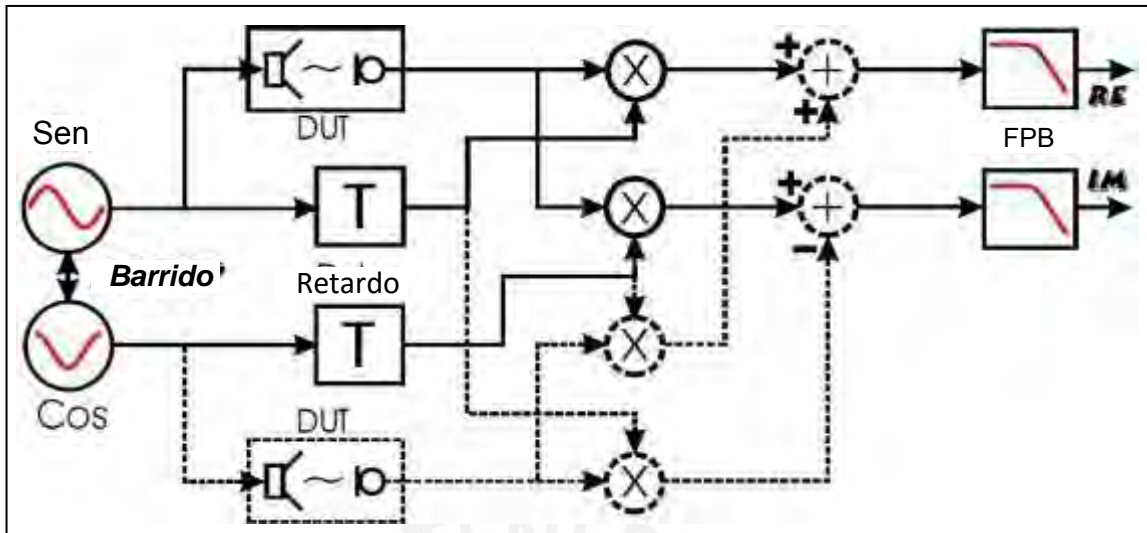


Fig. 2.5 Esquema de procesamiento de la señal mediante TDS [29]

e. MLS: Secuencia de máxima longitud

MLS, que en español es secuencia de máxima longitud, fue originalmente propuesto por Manfred Schroeder en 1979 y consiste básicamente en una secuencia pseudo aleatoria de pulsos binarios digitales enviados según una secuencia MLS, la auto correlación de esta secuencia resulta en un impulso Dirac. La Figura 2.6 presenta un esquema de generación de la secuencia de pulsos.

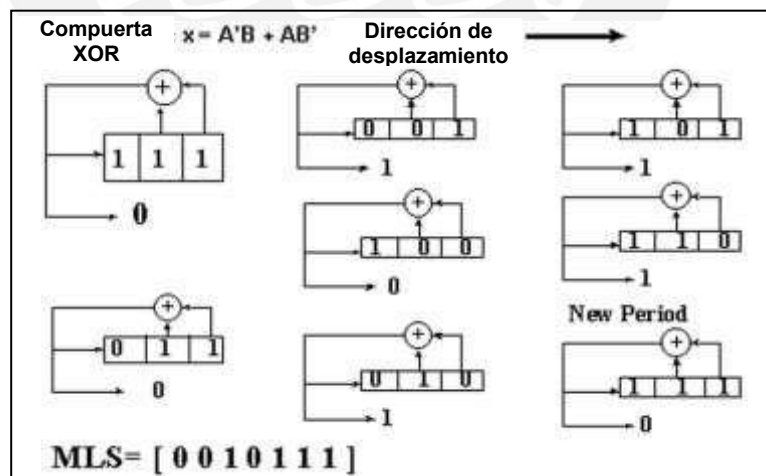


Fig. 2.6 Generación de secuencia de pulsos MLS [33]

En la figura se presenta una secuencia de $L = 7$, donde $L = 2^m - 1$ y m viene siendo el número de bits del registro de generación (orden de la secuencia), los valores 0 son reemplazados por (-1) para la secuencia de pulsos MLS. La respuesta impulsiva

del sistema es calculada mediante la correlación cruzada de la entrada con la señal captada por el micrófono, para esto se utiliza la transformada rápida de Hadamard (FHT). Todos los elementos y señales que viajan con el frente de onda quedan reducidos pues no presentan correlación con la señal enviada [33].

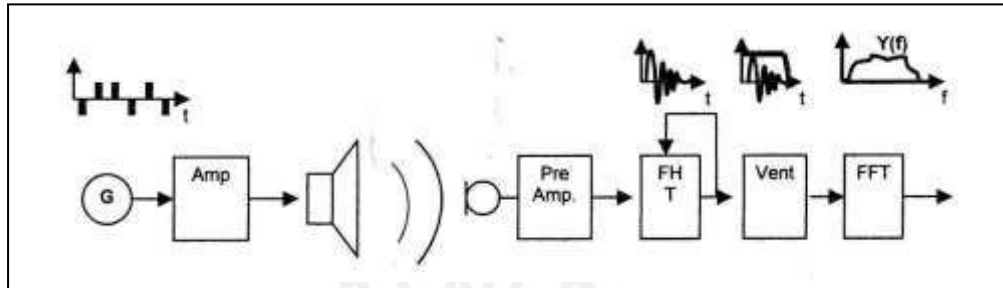


Fig. 2.7 Medición mediante MLS [14]

f. SSR: Respuesta del estado estacionario:

La respuesta en estado estable es un tipo de análisis que utiliza señales escalonadas sinusoidales para excitar el sistema y obtener respuesta de estado estable. Esta técnica es muy similar al barrido sinusoidal, con la diferencia que en este caso el barrido se realiza en frecuencias discretas escalonada, además de contar con algoritmos de funcionamiento que permiten controlar la relación señal a ruido requerida entre otros parámetros.

II. Acondicionamiento y entorno de medición.

a. Medición en campo libre

Esta técnica teóricamente se debe realizar en campo abierto, donde no existen superficies o entornos que produzcan rebotes o reverberación indeseados. Como se puede ver en la figura 2.8, el micrófono y el altavoz se ubican a 1 m de distancia y considerablemente alejados del suelo (15 m aproximadamente) para evitar lo que se conoce como “efecto tierra”, es decir reflexiones en el suelo a bajas frecuencias.

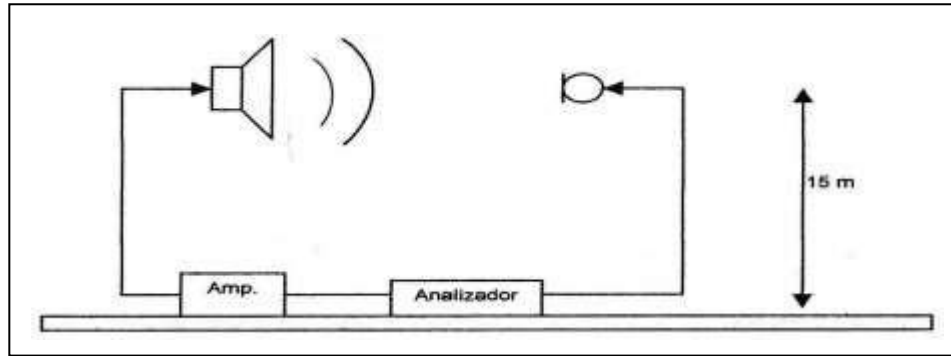


Fig 2.8 Medida en campo abierto [14]

b. Medición en cámara anecoica.

Este es un tipo de medición especial que se realiza dentro de una cámara aislada acústicamente y de vibraciones, cuyas superficies absorben los frentes de onda incidentes. Las dimensiones de la cámara determinan el ancho de banda de medición.

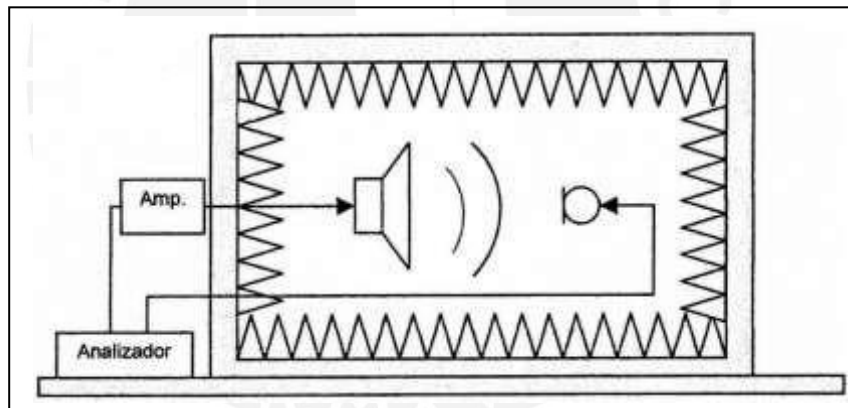


Fig. 2.9 Medición en cámara anecoica [14]

III. Procesamiento de data

A continuación se realizara el estudio de las principales técnicas y herramientas usadas en la industria actualmente en la generación, procesamiento y análisis de las señales para la medición del patrón de radiación:

a. MATLAB®

O en español laboratorio de matrices, es un lenguaje de computación técnico de alto nivel y de entorno interactivo para el desarrollo de algoritmos, visualización de data, análisis y computación numérica, es un programa matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio basado en C. MATLAB® puede ser usado en diversas aplicaciones tales como procesamiento de imágenes y señales, comunicaciones, sistemas de control, mediciones y pruebas, modelamiento financiero, entre otras cosas, gracias a su gran variedad de herramientas especializadas para diversas aplicaciones [35].

Entre sus principales características se encuentran:

- Lenguaje de alto nivel
- Desarrollo de entornos para manejo de código, archivos y data
- Herramientas interactivas
- Gráficas en 2D y 3D para visualizar la información.
- Herramientas para desarrollo de interfaces gráficas GUI (HMI)
- Compatibilidad con tecnologías de modelo objeto componente (COM)

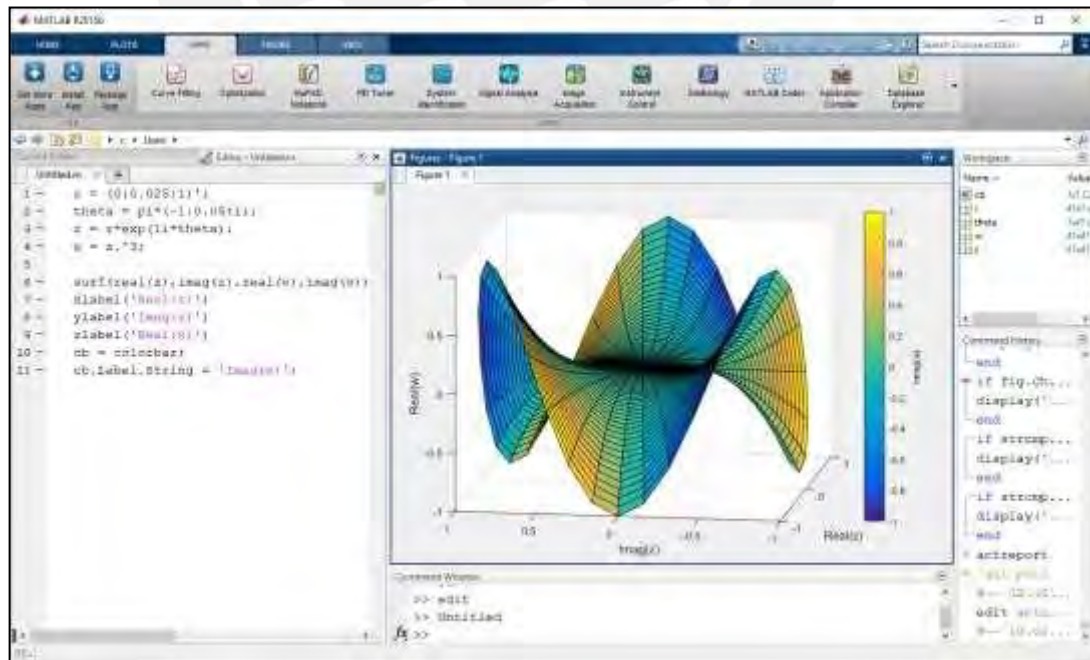


Fig. 2.10 Entorno grafico en MATLAB®. [5]

b. BRÜEL & KJÆR PULSE™

Es una plataforma de medición, desarrollada por la compañía BRÜEL & KJÆR para el análisis de sonido y vibraciones orientada a tareas; que presenta una solución avanzada para el análisis de audio y vibración. Esta plataforma cuenta con un entorno de control y programación de tareas llamado Lab Shop, así también con una interfaz de red LAN y un módulo de adquisición de datos con más de 300 canales de entrada [37].



Fig. 2.11 Plataforma de adquisición de datos BRÜEL & KJÆR PULSE™ [37]

El análisis de señales y sistemas usando PULSE™ involucra:

- Adquisición de información en el tiempo
- Medición del ruido y vibración
- Acústica básica y avanzada
- Análisis estructural

c. CLIO Sistema de medición

El sistema CLIO de la compañía AUDIOMATICA consta de una solución completa de parte física y programa para la medición y procesamiento de señales. El hardware interface es el *FireWare Audio FW-01* que ha sido diseñado para ser un analizador de audio de doble canal, se conecta por interface IEEE-1394 con la PC para darle al usuario un alto rendimiento. Este sistema es una de las tecnologías más avanzadas en equipos de audio y mediciones acústicas. Entre sus características se encuentran:

- 2 canales de 24 bit sigma-delta. Conversor digital-analógico
- Rango de frecuencia: $1\text{Hz} - 90\text{KHz}$
- Impedancia de salida: $660\ \Omega$
- Salida digital: SPDIF
- Compatible con el programa de control CLIO 10



Fig. 2.12 Plataforma de adquisición de datos CLIO FW [54]

IV. Mecanismos de posicionamiento angular

Esta es una de las secciones más importantes dentro del estudio del estado del arte pues se analizan los mecanismos y sistemas de posicionamiento de los parlantes para la medición respuesta del mismo en cada coordenada del espacio circundante.

a. Tornamesa

Es la herramienta mecánica más utilizada en la industria y el procedimiento estandarizado para la medición polar de las características de altavoces, esta técnica permite realizar posicionamientos angulares con el propósito de medir la respuesta del altavoz en cada ángulo del plano bidimensional

[21] La técnica consiste en fijar el altavoz al tornamesa, alineado con el eje, de tal manera que pueda rotar en un plano bidimensional; luego un micrófono es ubicado frente al altavoz en el campo cercano o lejano (dependiendo del tipo de medición) de manera fija, en 0 grados con respecto al altavoz o algún punto referencial; este

micrófono captará la respuesta del altavoz durante su rotación. La información es normalizada y almacenada en una tabla de frecuencia y ángulo vs. respuesta en magnitud. La figura 2.13 presenta un esquema del altavoz en un tornamesa dispuesto para realizar una medición.

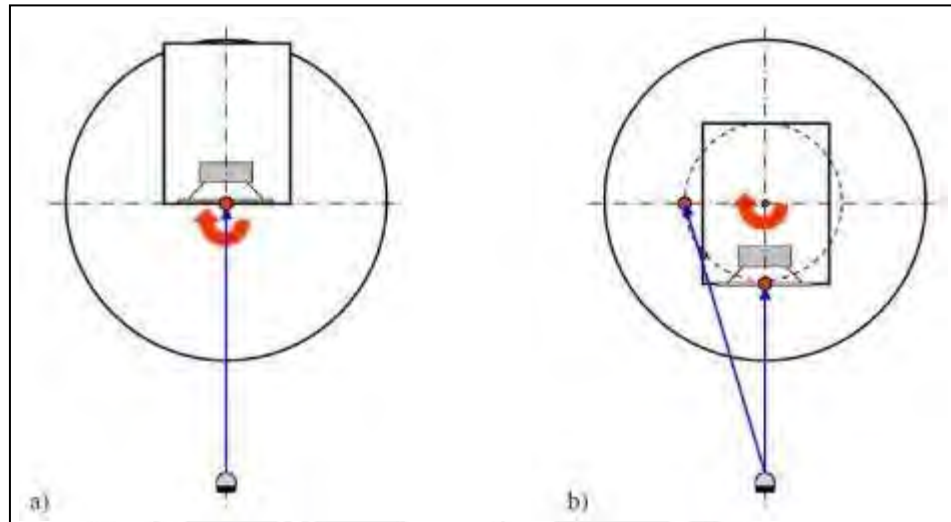


Fig. 2.13 Posicionamiento del altavoz en el tornamesa con diferentes referencias. [55]

Entre los fabricantes de tornamesas y modelos disponibles actualmente usados en la industria se tiene el OUTLINE ET250-3D, LINEARX LT360 EX y el BRÜEL & KJÆR TURNTABLE SYSTEM 9640.



Fig. 2.14 Tornamesa OUTLINE ET250 y en configuración 3D [56]

b. Arreglo de micrófonos

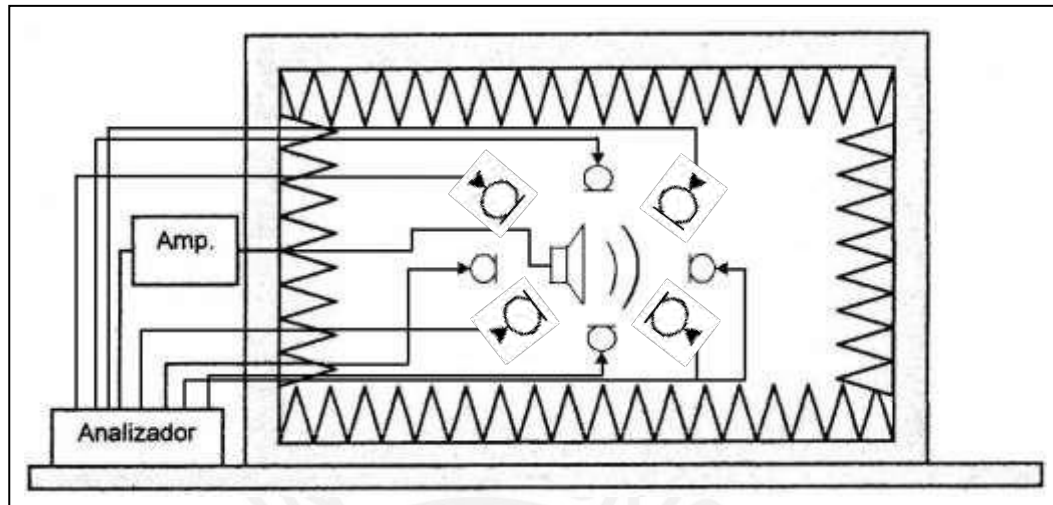


Fig. 2.15 Arreglo de micrófonos alrededor de un altavoz

Esta técnica consiste en desarrollar una arquitectura de micrófonos, posicionados alrededor de la fuente sonora, de tal manera que cada uno capte la respuesta del parlante en cada coordenada esférica (θ, ϕ, r) por cada micrófono instalado. [38] Mientras más micrófonos sean posicionados alrededor, aumentará la resolución y por tanto la precisión de la directividad graficada. El laboratorio NWAA implementó un sistema de este tipo para la medición de altavoces. La figura 2.15 antes presentada muestra un esquema básico para un arreglo de micrófonos.

Este método es bastante rápido a comparación del método del tornamesa, sin embargo presenta los siguientes limitantes:

- Se necesita un analizador con un gran número de entradas, para cada micrófono.
- Se requiere un gran número de micrófonos.
- Realizar la medición en cámara anecoica.
- Reconstrucción matemática de las coordenadas no alcanzadas por los micrófonos, en base a la expansión Fourier Bessel.
- Precisión y distribución simétrica de cada micrófono con respecto a la fuente sonora y entre micrófonos.

c. Micrófono rotatorio

Este método poco común es el proceso inverso del método del tornamesa; es decir, se hace orbitar un micrófono, alrededor de un parlante estático, en posiciones angulares concretas manteniendo una distancia uniforme para cada movimiento entre el parlante y el micrófono. En este caso no solo se debe monitorear los movimientos angulares, sino también que el micrófono describa una circunferencia perfecta teniendo como centro de la misma la fuente sonora. La figura 2.16 nos ilustra un esquema de cómo realizar este método.

El micrófono capta, en cada posición de su órbita, la respuesta del parlante con el propósito de graficar el patrón polar del mismo. Debido a que el micrófono describe un movimiento circular con radio diferente de cero (a diferencia del método del tornamesa), es posible incrementar la resolución de barrido angular a valores menores a 5° , lo cual aumenta la precisión de la gráfica; sin embargo, la técnica debe realizarse en cámara anecoica para evitar la reverberación y oscilaciones mecánicas que pueden traer problemas, además, se requiere una mayor precisión debido a la relación $L=\theta.r$ que aumenta la sensibilidad de los pasos angulares.

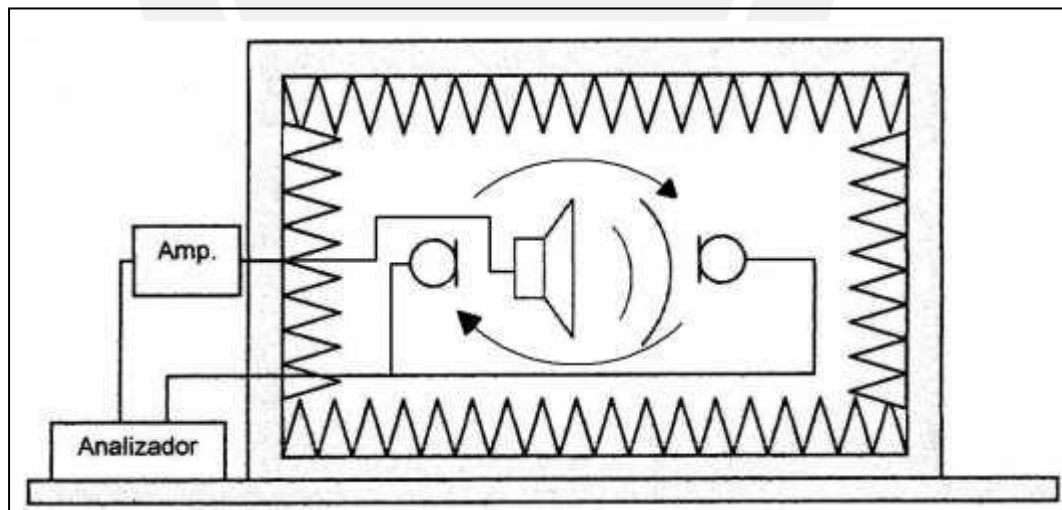


Fig. 2.16 Micrófono rotatorio alrededor de un parlante.

d. Mecanismos de posicionamiento esférico

Existe un método desarrollado por la compañía OUTLINE para obtener la respuesta esférica del altavoz el cual combina el manejo de tornamesas y la técnica del micrófono rotatorio para abarcar todas las coordenadas esféricas. La figura 2.17 presenta el esquema de medición usando un tornamesa para rotar el altavoz en ángulos polares (θ), y otro tornamesa adicional para orbitar un micrófono alrededor del altavoz y abarcar así los ángulos de elevación (Φ).

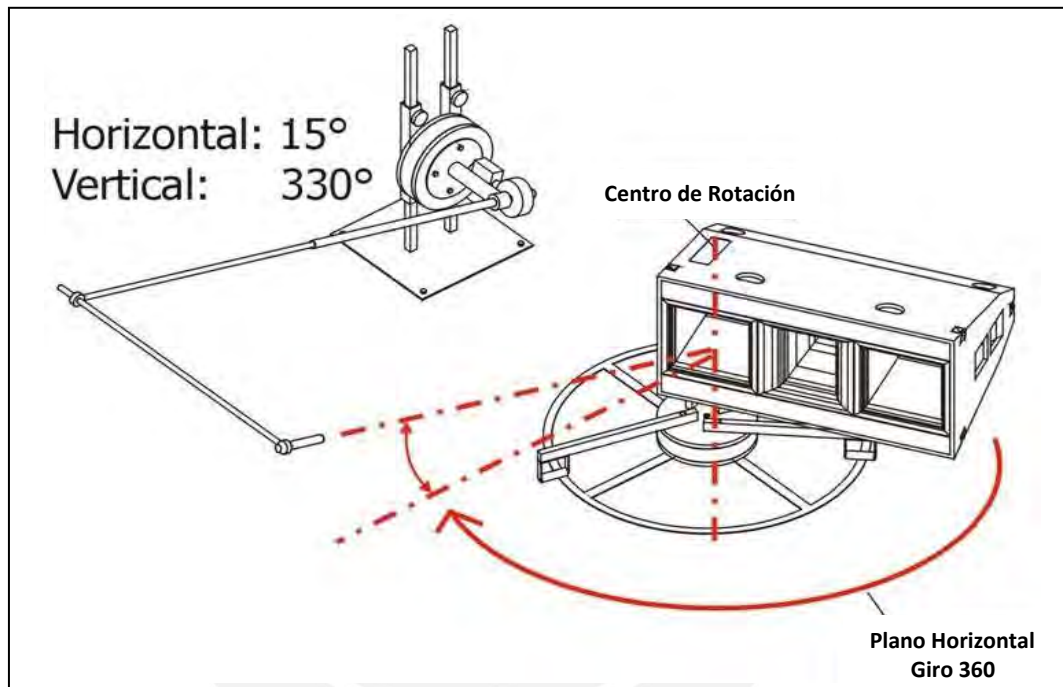


Fig. 2.17 Esquema de medición con dos tornamesas [65]

El sistema visto recientemente plantea un mecanismo de dos partes separadas pero con movimientos coordinados para poder alcanzar las coordenadas esféricas correctamente; el hecho de tener mecanismos separados agrega la complejidad de tener dos sistemas de control independientes que deben trabajar sincronizadamente entre sí. Una opción de solución es un sistema mecánico en el cual solo una de las partes sea el encargado de realizar ambos movimientos, es decir hablamos de un posicionador en 3 dimensiones. Existen diferentes alternativas de posicionadores de 3 dimensiones, dependiendo del tipo de movimiento que realizan estas se pueden clasificar en:

- De coordenadas angular (A)
Es aquel posicionador que basándose únicamente en movimientos angulares es capaz de alcanzar la posición o coordenadas deseadas, este tipo de posicionador es lo que comúnmente se le conoce como un brazo robot.
- De coordenadas esféricas (B)
Es aquel posicionador que basándose en 2 movimientos angulares y un movimiento radial puede describir una esfera. Sus coordenadas se dan en (θ, Φ, r) .
- De coordenadas cilíndricas (C)
Es aquel posicionador que basándose en 1 movimiento angular y 2 movimientos cartesianos puede describir un cilindro específico. Sus coordenadas vienen dadas en (θ, h, r)
- De coordenadas cartesianas (D)
Es aquel posicionador que basándose en 3 movimientos cartesianas puede alcanzar posiciones en el espacio tridimensional. Sus coordenadas vienen dadas en (d_1, d_2, d_3) .

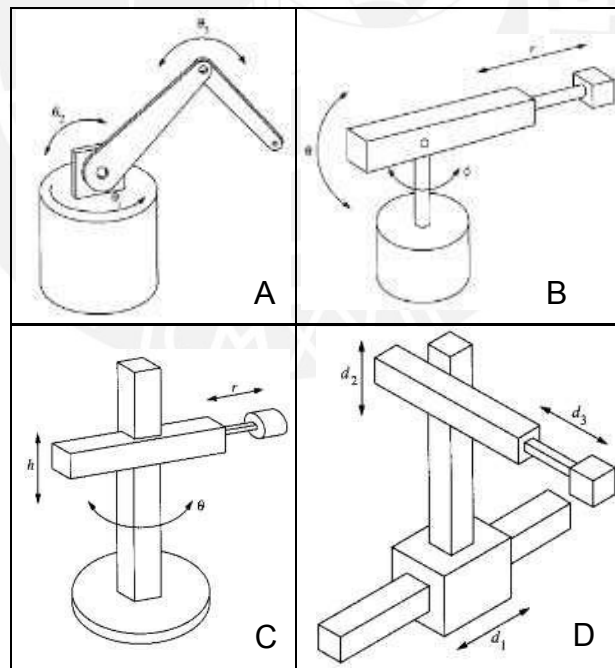


Fig. 2.18: Mecanismos de posicionamiento de 3 dimensiones [57]

2.1.3 Síntesis sobre el asunto de estudio

Luego de realizar un estudio ordenado y metodológico de las diversas tecnologías involucradas en la obtención del patrón de radiación, se desprenden algunas conclusiones sobre el asunto de estudio que servirán de pautas en el planteamiento del modelo teórico. A continuación se detallan dichos conceptos:

- Se manejan técnicas que buscan recuperar la respuesta impulsiva del sistema altavoz y el comportamiento espectral de la señal medida.
- La correlación y la FFT son herramientas matemáticas muy importantes en el procesamiento de señales de audio.
- Existe una gran preocupación por el aislamiento de la señal medida de la reverberación del ambiente.
- Las interfaces gráficas y de manejo de los equipos de medición están siendo cada vez más amigables, con mejores características y capacidades.
- Las plataformas de procesamiento y análisis deben manejar lenguajes computacionales de alto nivel con herramientas diseñadas para el procesamiento de señales, algoritmos matemáticos, adquisición de datos e interfaces gráficas.
- Los mecanismos y sistemas de posicionamiento angular están basados en tornamesa o arreglos de estos para alcanzar las coordenadas deseadas en el espacio circundante.
- Existe una serie de consideraciones, al momento de realizar el posicionamiento angular, que involucran la geometría de los equipos, los pasos angulares e incluso la temperatura a la que se realiza la medición.

Como se puede apreciar, la industria del audio viene desarrollando más y mejores técnicas con el propósito de simplificar y mejorar la performance del proceso de obtención del patrón de radiación. A partir esta información obtenida se analizarán los pros y contras, y así proponer la mejor solución a la problemática, utilizando las técnicas y metodologías apropiadas.

2.2 Conceptos y definiciones generales

- **Altavoz**

Transductor electro-mecano acústico por el cual ondas acústicas son generadas a partir de las señales eléctricas de excitación, además de tener la capacidad de irradiar las ondas de presión sonora en el medio.

- **Punto de rotación (PR)**

Punto en el eje de referencia del altavoz que es usado como punto en común de todas las direcciones angulares de medición en el sistema de medición.

- **Eje de referencia (RA)**

Es la línea que pasa a través del PR en una dirección definida. El eje de referencia debe ser usado como el eje de referencia cero para mediciones de la respuesta polar

- **Eje de medición (MA)**

Es la línea imaginaria que pasa a través del PR y el micrófono de la medición. La dirección del eje viene dada por las coordenadas angulares Teta (θ) y Fi (ϕ).

- **Plano de medición**

Plano definido por el eje de referencia y el eje de medición.

- **Teta (θ)**

Es el ángulo formado por el eje de referencia y el eje de medición sobre el plano de medición e indica la posición angular actual sobre el plano de medición.

- **Fi (ϕ)**

Es el ángulo formado por el plano de medición con respecto al eje de referencia. Toma el valor 0 cuando el plano de medición se encuentra en paralelo con la base horizontal del altavoz

- **Respuesta al impulso (IR)**

Es la respuesta lineal temporal del dispositivo bajo prueba ante un impulso unitario a la entrada del altavoz. En la práctica esta respuesta es obtenida de la data medida.

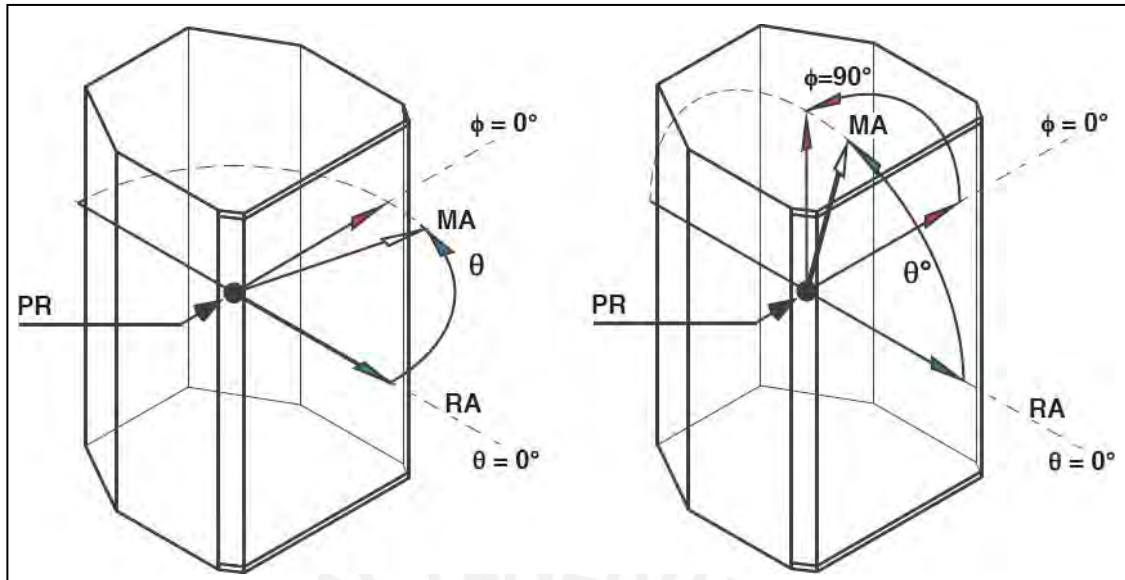


Fig. 2.19 Esquema de coordenadas angulares y ejes de trabajo [39].

2.3 Modelo teórico

El desarrollo de un sistema capaz de obtener el patrón de radiación espacial a partir de un posicionador automatizado supone una serie de conceptos y etapas que están ligados entre sí y que, de fallar o ausentarse alguna de ellas, alteraría directamente el resultado de la medición. A continuación se explica en detalle.

Lo primero a tomar en cuenta para cualquier medición o ensayo acústico es el ambiente de trabajo, el entorno que rodeará las partes involucradas en el procedimiento. Como se vio en el punto anterior lo ideal es situar el sistema en un lugar amplio, acústicamente aislado y que además impida los rebotes internos o reverberación (paredes, piso y techo absorbente), para este caso una cámara anecoica sería una opción perfecta que reduce casi en su totalidad los factores ajenos a la medición (ruido), sin embargo dicha cámara es muy compleja e inviable de fabricar. Ante esta circunstancia es necesario implementar técnicas de procesamiento de audio, filtros y aislamiento del ruido.

Para realizar el procesamiento de la señal y el análisis de audio, se utilizan equipos que permiten implementar las técnicas antes mencionadas, de una manera sencilla y eficiente. Uno de los más poderosos procesadores es el PULSE™ de la compañía BRÜEL & KJÆR, el cual permite implementar una gran variedad de

generadores de señal, analizadores y visualizadores gráficos; además de manejar periféricos y equipos externos gracias a su arquitectura basada en organizadores, lo cual facilita el trabajo del usuario.

En lo que respecta al posicionador mecánico del altavoz se necesita un sistema que permita obtener la respuesta impulsiva del parlante en cada coordenada en el espacio circundante a su alrededor. Es por ello que se utilizan tornamesas mecánicas, controladas electrónicamente, los cuales permiten la rotación del altavoz en coordenadas esféricas para lograr un mapeo tridimensional. Dicho sistema mecánico debe ser capaz de ubicarse en cualquier posición angular, alcanzando resoluciones de hasta 5 grados/paso como mínimo y manteniendo una estabilidad lo suficiente para que reduzca errores acumulados por posicionamiento angular.

Finalmente, con el propósito de poder automatizar todo el proceso de posicionamiento – medición – almacenamiento – ploteo del patrón de radiación, se implementa un algoritmo de control desarrollado en el entorno MATLAB® el cual es capaz de sincronizar y automatizar el proceso, controlando tanto el tornamesa como el analizador PULSE™, esto se verá en detalle en el siguiente capítulo del documento.

2.4 Definiciones operativas

Con el propósito de visualizar el progreso y el cumplimiento de los objetivos planteados, se presentan los siguientes indicadores cualitativos y cuantitativos:

2.4.1 Indicadores cualitativos

- Resolución angular: Grado de precisión con la que se puede ubicar en una coordenada angular.
- Graficas del patrón de radiación: La resolución de las gráficas polares obtenidas a partir de la medición del altavoz es un indicador cualitativo.
- Relación señal a ruido (S/R): Margen que existe entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe.
- Coherencia de la señal: Grado de similitud entre la señal enviada al parlante y la captada por el micrófono.

2.4.2 Indicadores cuantitativos

- Tiempo de medición: Hace referencia al tiempo que toma el proceso de obtención del patrón de radiación usando el sistema automatizado.
- Presupuesto del proyecto: Indicador del monto a invertir para la implementación del sistema diseñado.
- Rendimiento del sistema: Es la eficiencia del sistema, en qué tanto por ciento se realizan las funciones para las que fue diseñado el sistema



CAPITULO 3:

DISEÑO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO ANGULAR AUTOMATIZADO

La automatización es el proceso por el cual se implementan sistemas o elementos computarizados y electromecánicos para controlar maquinarias, procesos o equipos industriales sustituyendo a operadores humanos y controlar así la secuencia de las operaciones. El elemento principal en el proceso de automatización es el principio de la realimentación o lazo cerrado, lo cual permite dotar al sistema de la capacidad de autocorrección para alcanzar la respuesta deseada en el menor tiempo posible.

En el presente capítulo se aborda el diseño de la automatización del proceso de obtención del patrón de radiación de un altavoz convencional mediante un posicionador electro - mecánico, un programa sincronizador y una interfaz de control, la dos últimas desarrolladas sobre el entorno MATLAB®. El desarrollo del presente capítulo se realiza mediante un enfoque basado en las tres áreas principales del proyecto: electrónica, mecánica y programación, definiendo las técnicas y conceptos empleados según el análisis previo del capítulo 2.

3.1 Hipótesis

Luego de conocer la importancia del patrón de radiación y de realizar las investigaciones sobre los métodos y técnicas existentes para la obtención del mismo, estamos en la capacidad de poder emitir una hipótesis de solución empleando las herramientas y conceptos aprendidos en el camino.

3.1.1 Hipótesis principal

Es posible diseñar un sistema automatizado que sea capaz de obtener el patrón de radiación y directividad de un altavoz convencional mediante el control y sincronización de un posicionador mecánico de coordenadas esféricas en conjunto con un analizador de audio y los programas informáticos de control desarrollados; con esto se espera aumentar la precisión, la eficiencia y reducir los tiempos de procesamiento.

3.1.2 Hipótesis secundarias

- ¿Es posible alcanzar una alta precisión empleando un posicionador angular automatizado de coordenadas esféricas?
- ¿Se puede mejorar la S/R de la señal medida, obteniendo la respuesta promedio a partir de una serie de impulsos emitidos?
- ¿El desarrollo de un sistema secuencial automatizado de posicionamiento y medición reducirá los tiempos de procesamiento y mejorará la eficiencia?
- ¿La integración del proceso en un único sistema de posicionamiento/medición, minimizará las fuentes de error por intervención humana en la medición?

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo general

El presente trabajo tiene por objetivo principal desarrollar un sistema automatizado realimentado que permita obtener el patrón de radiación y la directividad de un altavoz, la respuesta en frecuencia de esta fuente sonora en cada coordenada espacial se obtendrá empleando el método de la respuesta impulsiva del sistema. A partir de la información almacenada se obtiene el valor en decibeles para una misma frecuencia en todos los ángulos polares y azimutales barridos, estos valores graficados como una superficie de coordenadas esféricas constituyen el patrón de radiación y representan la directividad de un altavoz para una frecuencia determinada.

El diseño del sistema propuesto incluye: el desarrollo de un posicionador automatizado de coordenadas esféricas; una configuración que permite la generación de señales, capturar el frente de onda y obtener la respuesta en frecuencia del altavoz; y una interfaz gráfica amigable que permita implementar la metodología movimiento-medición-movimiento, es decir sincronizar e intercalar el funcionamiento del posicionador de coordenadas esféricas con la obtención de la respuesta en frecuencia del altavoz.

3.2.2 Objetivos específicos

- Obtener la respuesta en frecuencia del altavoz para cada posición angular.
- Diseñar e implementar un posicionador electro-mecánico de coordenadas esféricas con sistema de control en lazo cerrado.
- Diseñar e implementar un sistema de control electrónico capaz de realizar los movimientos de posicionamiento y la comunicación con el programa de sincronización
- Desarrollar un programa de generación y procesamiento de señales en la plataforma PULSE™ de BRÜEL & KJÆR.
- Sincronizar los procesos de posicionamiento y medición mediante un programa
- Desarrollar un interface humano-máquina (HMI) que permita el control total del proceso y que sea de fácil manejo para el operario.

3.3 Sistema automatizado de obtención del patrón de radiación.

La obtención del patrón de radiación requiere de un sistema en el que se definen dos etapas principales: posicionamiento y medición. Estas etapas son independientes y se manejan de forma secuencial. La figura 3.1 nos muestra un esquema de medición mediante el tornamesa BRÜEL & KJÆR Tipo 9640 [40].

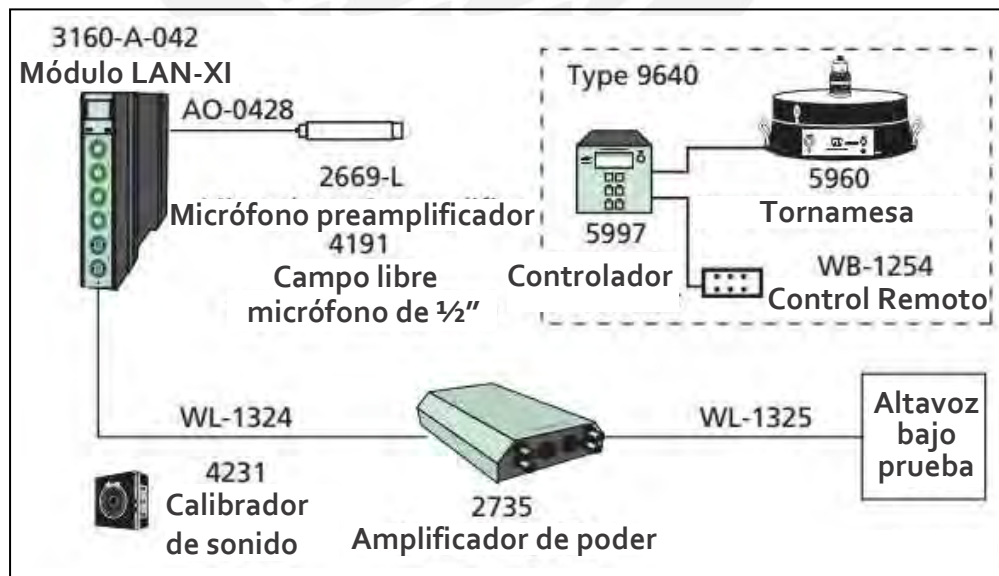


Fig. 3.1 Arquitectura de medición tradicional del patrón de radiación [40]

Con el conocimiento adquirido hasta este punto se desarrolla un sistema automatizado capaz de obtener el patrón de radiación y directividad de altavoces mediante el manejo y sincronización de una plataforma de posicionamiento angular de coordenadas esféricas y un analizador/generador de señales para la etapa de medición; para este sistema se usará la técnica de la respuesta impulsiva, la medición se realizará en un recinto con condiciones acústicas favorables, que en nuestro caso será el aula A100 de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la PUCP. En resumen se desarrollará un sistema de posicionamiento de coordenadas esféricas donde el análisis del audio se realizará mediante el PULSE™ BRÜEL & KJÆR en el cual se implementará en la entrada de micrófono un desplazamiento (*offset*), un disparador (*trigger*) y una ventana temporal para contrarrestar los efectos de la medición en recinto cerrado; y finalmente para la sincronización del sistema e interfaz de usuario se utilizará el programa MATLAB®. La figura 3.2 muestra el esquema en bloques de este sistema.

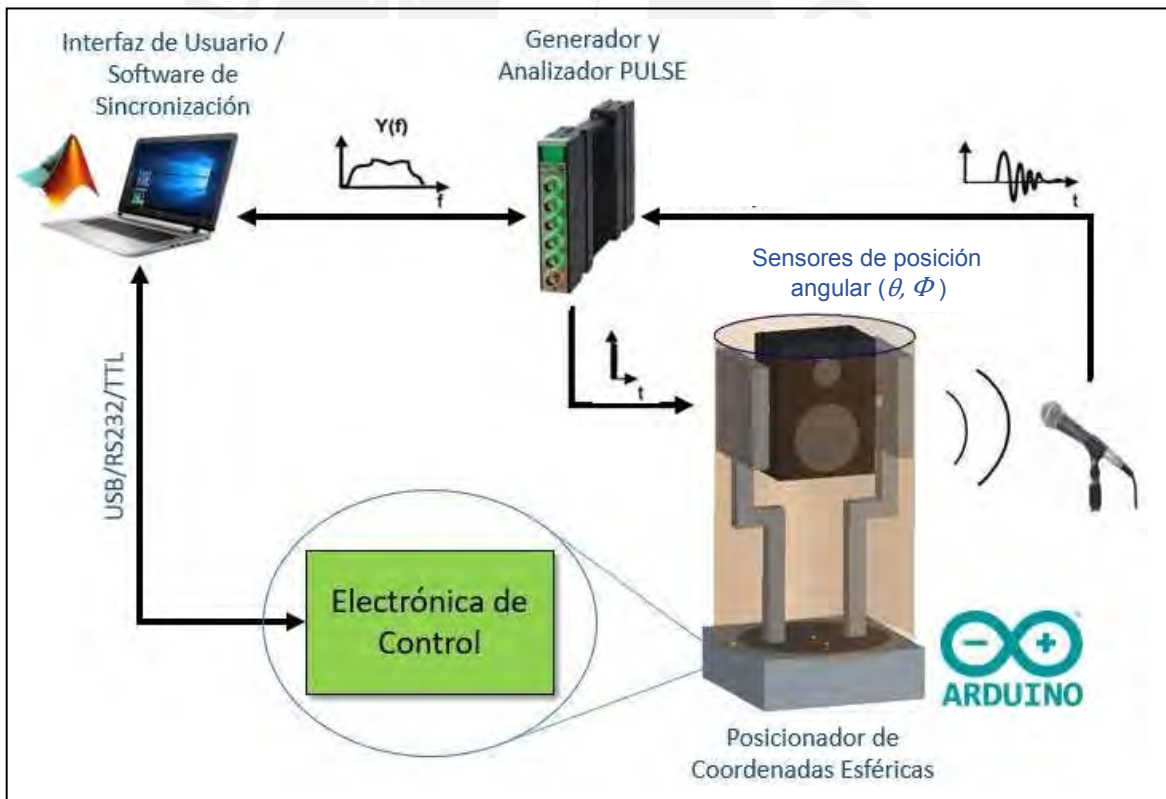


Fig. 3.2 Esquema básico de interconexiones del sistema automatizado

Dicho sistema constara de:

- Un posicionador angular de coordenadas esféricas, basado en 2 motores a pasos (*stepper motor*) realimentados capaces de ubicarse en coordenadas esféricas concretas (θ , Φ) entre 0° a 180° ; este posicionador angular contará con un sujetador (*gripper*) ajustable en x, y, z para diferentes altavoces.
- Un circuito de control cuya función principal será la de comunicarse con el sincronizador principal y controlar los motores del posicionador según los requerimientos del sincronizador.
- Un sistema de generación y análisis de señal implementado en una plataforma BRÜEL & KJÆR PULSE™ Type 3560 - C.
- Un programa de sincronización desarrollado en entorno MATLAB® cuya función es automatizar el proceso de medición del patrón de radiación, controlando el posicionamiento angular y, la generación y análisis de la señal medida por medio del PULSE™.
- Una interface gráfica (HMI) desarrollada en entorno GUIDE MATLAB® para la configuración de los parámetros de la medición y la presentación de la respuesta en frecuencia y el patrón de radiación a diferentes bandas de frecuencia.

3.4 Área electrónica

Esta es el área del proyecto dedicada al desarrollo de los circuitos y dispositivos electrónicos encargados de la alimentación eléctrica, comunicación, control y manejo del sistema prototipo mecánico. En esta sección se explicará el diseño de los circuitos, los componentes escogidos y los medios de comunicación empleados.

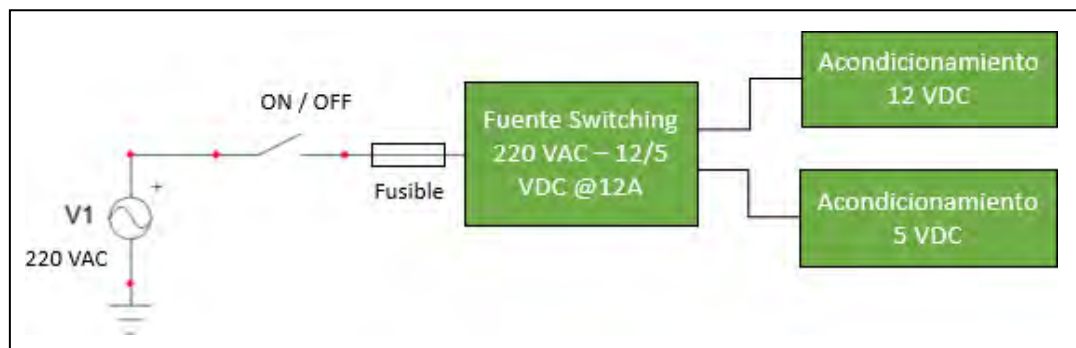


Fig. 3.3 Diagrama de bloques de la fuente de alimentación

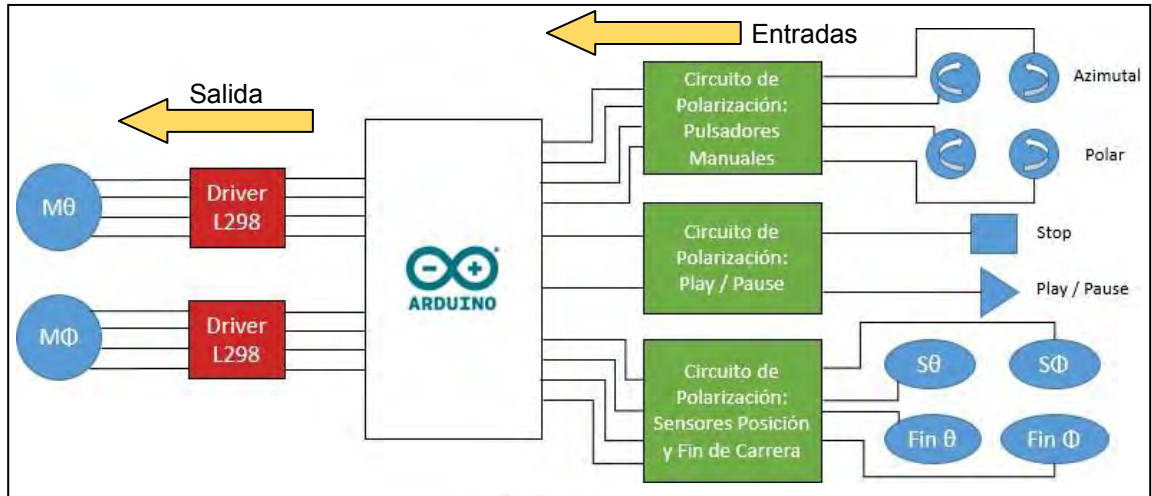


Fig. 3.4 Diagrama de bloques del posicionamiento y control

En el diagrama presentado en la figura 3.4 se puede apreciar el esquema general de la electrónica del sistema donde el centro de procesamiento es el bloque de ARDUINO® el cual recibe señales de entrada y envía respuestas de salida:

Entradas del ARDUINO®:

- Pulsadores manuales de movimiento x4
- Pulsadores manuales de stop y play/pause
- Sensores de posicionamiento angular (polar y azimutal)
- Sensores de fin de carrera (polar y azimutal)

Salidas del ARDUINO®:

- Pasos de control para movimiento de motores (polar y azimutal)

Es importante señalar que los circuitos de polarización de los pulsadores y sensores (entradas del ARDUINO®) trabajan con un voltaje de 5 VDC con lo cual las señales que reciba el micro controlador provenientes de estos circuitos de entrada estarán en el rango de 0 a 5 VDC , estas son señales de control; por otro lado, los circuitos controladores (*drivers*) L298 ubicados a la salida del microcontrolador se alimentan con 12 VDC , estos reciben como señales de control la secuencia de pasos proveniente de 4 salidas del ARDUINO® (bits de 0 a 5 VDC) y envían la misma secuencia al motor a pasos pero en niveles de voltaje de 0 a 12 VDC , estas señales son de potencia.

Según se puede apreciar el sistema electrónico necesita de una fuente de alimentación, para la etapa de control, que entregue niveles de 0 a 5 VDC para alimentar dispositivos de bajo consumo como son pulsadores y sensores (se analizará más adelante el consumo total de estos dispositivos); y por otro lado, este sistema electrónico requiere de una alimentación para su etapa de potencia que trabaje con niveles de 0 a 12 VDC entregando corrientes mayores a 1 A para alimentar a los actuadores que realizarán el movimiento de las cargas.

Tomando esto en consideración las fuentes antes mencionadas deben estar acondicionadas y aisladas entre sí, pues así como la fuente de 5 VDC alimenta a los circuitos de baja corriente (etapa de control) esta fuente también es un camino por donde se pueden introducir efectos de ruido electrónico y armónicos a dichos circuitos de control, estas corrientes nocivas provienen de la fuente de 12 VDC pues esta alimenta a la etapa de potencia encargada de ejecutar torques de movimiento y mantenimiento en la carga. Un correcto aislamiento entre las fuentes y tierras de estas fuentes evitaría que estos factores afecten a las etapas más vulnerables del sistema electrónico.

3.4.1 Fuente de alimentación de energía

Con el objetivo de suministrar el voltaje necesario se debe primero definir qué tipo de fuente se usará, para ello analizaremos el consumo de corriente total por cada etapa antes vista (control y potencia). El siguiente cuadro nos presenta en detalle:

| Descripción de circuito | Cantidad | Uso | Voltaje | Corriente x circuito | Corriente total |
|--------------------------|----------|-------------------------|---------|----------------------|-----------------|
| Pulsador dos estados | 2 | Stop y Pausa/Play | 5 VDC | 2 mA | 4 mA |
| Pulsador un estado | 4 | Movimiento manual | 5 VDC | 2 mA | 8 mA |
| Sensor de fin de carrera | 2 | Indica 180° recorridos | 5 VDC | 15 mA | 30 mA |
| Sensor optoacoplador | 2 | Codificador de posición | 5 VDC | 70 mA | 140 mA |
| L298 | 2 | Interface para motor | 12 VDC | 1584 mA | 3168 mA |
| Motor a pasos | 2 | Movimiento de carga | 12 VDC | 0 mA | 0 mA |
| | | | | Total: | 3350 mA |

Tabla. 3.1 Consumos de corriente del sistema electrónico

Como podemos apreciar la parte electrónica tendrá un consumo total de aproximadamente $3,3 A$; considerando que estamos trabajando con dos motores que moverán cargas por encima de los $20 kg$, la fuente de voltaje deberá entregar al menos $2 A$ más de lo indicado en el consumo de la tabla 3.1, es decir corrientes mayores a los $6 A$ para alimentar sin problemas el sistema.

Otro factor a tomar en cuenta para la fuente que se usará es que, además que debe tener una etapa de rectificación de AC a DC, esta fuente debe contar con una etapa posterior a la rectificación que se encargue de regular el voltaje en salidas fijas de $12 VDC$ y $5 VDC$, para alimentar tanto la etapa de potencia como la de control respectivamente; es importante destacar que estas salidas de voltaje DC fijas deben estar desacopladas y aisladas de los efectos de carga en la entrada de la red eléctrica alterna, de tal manera que dichos voltaje se mantengan constantes.

De acuerdo a las características que debe de cumplir la fuente, lo recomendable es usar una fuente de PC, la cual además de tener una etapa rectificadora de AC a DC, cuenta con salidas de voltajes fijas (DC) reguladas a partir de la misma fuente rectificada, es decir los voltajes de salida fijos de esta fuente comparten una misma tierra. Además esta fuente puede entregar hasta $12 A$ con lo cual queda cubierto el consumo máximo de los componentes y etapas electrónicas.



Fig. 3.5 Fuente Halion 12 / 5 VDC @ 12 A [58]

Considerando que los efectos de carga, ruidos y armónicos generados en la etapa de potencia no deben afectar a la etapa de control (ver 3.4), las salidas de voltaje y la tierra común de la fuente deben pasar por un acondicionamiento de protección.

3.4.2 Acondicionamiento de los voltajes de alimentación

Como ya se explicó anteriormente, la alimentación de la etapa de potencia será tomada de la salida de voltaje de 12 VDC proveniente de la fuente principal, sin embargo esta señal de voltaje debe ser acondicionada antes de ser distribuida a todos los circuitos que la usarán. El acondicionamiento para este circuito debe ser diseñado con el objetivo de absorber las componentes de ruido que se pueden generar en los motores y filtrarse en la fuente; para esto se utiliza un condensador de desacoplo con el fin de proporcionar un camino a tierra para todo componente en alterna, mientras que para las señales en continua el condensador presenta una reactancia prácticamente infinita. A continuación se presentan los cálculos realizados para la selección del condensador [50]:

En primer lugar, el condensador de desacoplo es ubicado en paralelo a la carga eléctrica que alimentará (figura 3.6), con el objetivo que las componentes no lineales ($f \neq 0$) que puedan existir en la red eléctrica no ingresen al sistema (a la carga), sino que dicha corriente fluya por un camino de baja impedancia formada por este condensador de desacoplo hacia tierra, por lo tanto el valor de la impedancia capacitiva del condensador debe ser menor que la impedancia de la carga que se alimentará. Por otro lado conocemos la ecuación de carga de corriente del capacitor en función del voltaje y el tiempo según la siguiente ecuación:

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad \text{A partir de esta ecuación se puede deducir el valor del capacitor}$$
$$C = I \frac{\Delta t}{\Delta V} \quad \text{en función del tiempo de elevación y voltaje máximo de rizado de}$$

la ecuación presentada se considera como criterio de diseño [50], donde el tiempo de subida tiene un valor no mayor a $\Delta t = 1\text{ ns}$, mientras que el voltaje de rizado es fijado en un valor máximo de $\Delta V = 1\text{ uV}$; además de lo visto en la tabla 3.1 la corriente máxima suministrada por la fuente de 12 VDC es de $I = 3200\text{ mA}$; con estos valores fijados y considerando su impedancia capacitiva el valor del condensador será:

$$C = (3200\text{ mA}) \frac{1\text{ ns}}{1\text{ uV}} = 3200\text{ uF}$$

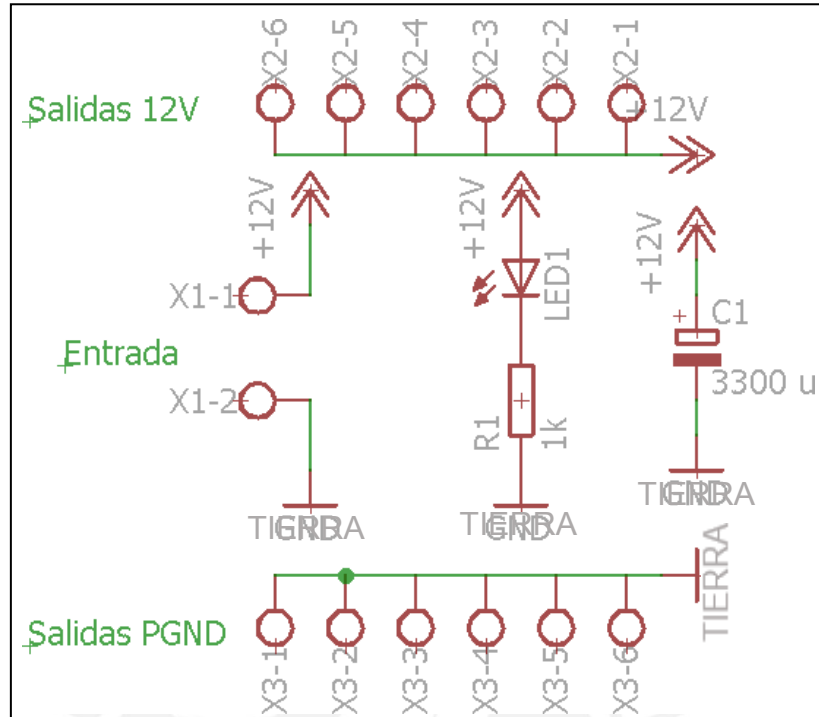


Fig. 3.6 Circuito de acondicionamiento de 12 VDC

Por otro lado la alimentación de la etapa lógica y de control se realiza tomando la señal de 5 VDC proveniente de la fuente principal; sin embargo esta señal, al igual que en el caso anterior de potencia, debe ser acondicionada previo a ser distribuida a los circuitos que la necesiten. Se debe tomar en cuenta que los circuitos que serán alimentados por esta fuente son sensibles a variaciones de voltaje y efectos de carga:

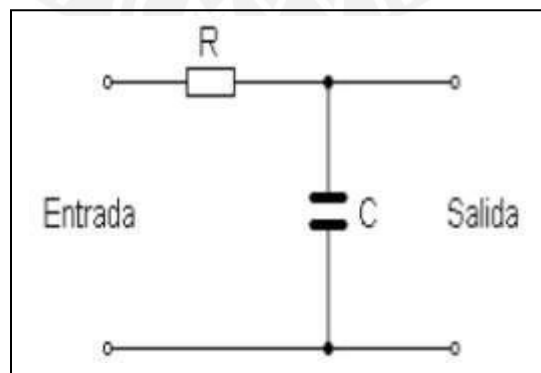


Fig. 3.7 Modelo de filtro pasa bajos pasivo [67]

La señal positiva de 5 VDC , antes de ser distribuida, pasa por un filtro pasa bajo pasivo constituido por un condensador electrolítico de $3300\text{ }\mu\text{F}$ y un diodo Schottky de respuesta rápida. Como es conocido en un filtro pasa bajos pasivo de tipo RC la frecuencia de corte de la banda de paso viene dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

De acuerdo a los ensayos realizados con el motor operando, el ruido presente en la fuente de alimentación se manifiesta de forma significativa a partir de 1 Hz en adelante, por lo que se busca que la frecuencia de corte $f_c < 1\text{ Hz}$. Para el circuito presentado usaremos un diodo Schottky 1N5711 en lugar de una resistencia convencional, esto debido a que el mencionado diodo tiene la principal propiedad de bloquear voltajes en reversa con una velocidad de conmutación menor a 1 ns , lo cual es conveniente para ruidos o perturbaciones latentes que intenten filtrarse en reversa. Este diodo Schottky tiene una impedancia aproximada de $R = 50\text{ ohm}$. De acuerdo a lo expuesto la formula quedaría así:

$$f_c = \frac{1}{2\pi(50)C} < 1$$

$$C > 3183\text{ }\mu\text{F}, \text{ entonces } C = 3300\text{ }\mu\text{F y } f_c = 0,96\text{ Hz}$$

La señal de tierra de la etapa de control está conectada a la tierra de potencia debido a que comparten la tierra de la fuente, es por ello que se incluye un bloque que impide el paso de señales ruidosas de una etapa a otra. En este caso se implementa una bobina de choque que interconecte en serie la tierra de potencia con la tierra de control; este dispositivo opera absorbiendo los picos y ruido de la componente no lineal que se filtra mediante el almacenamiento de su energía, es decir eleva su reactancia inductiva ante paso de señales en CA; mientras que para señales en CC la inductancia del dispositivo disminuye siendo aproximadamente cero. A continuación se presenta el circuito donde podemos apreciar la bobina de choque instalada entre la tierra de potencia y tierra de control:

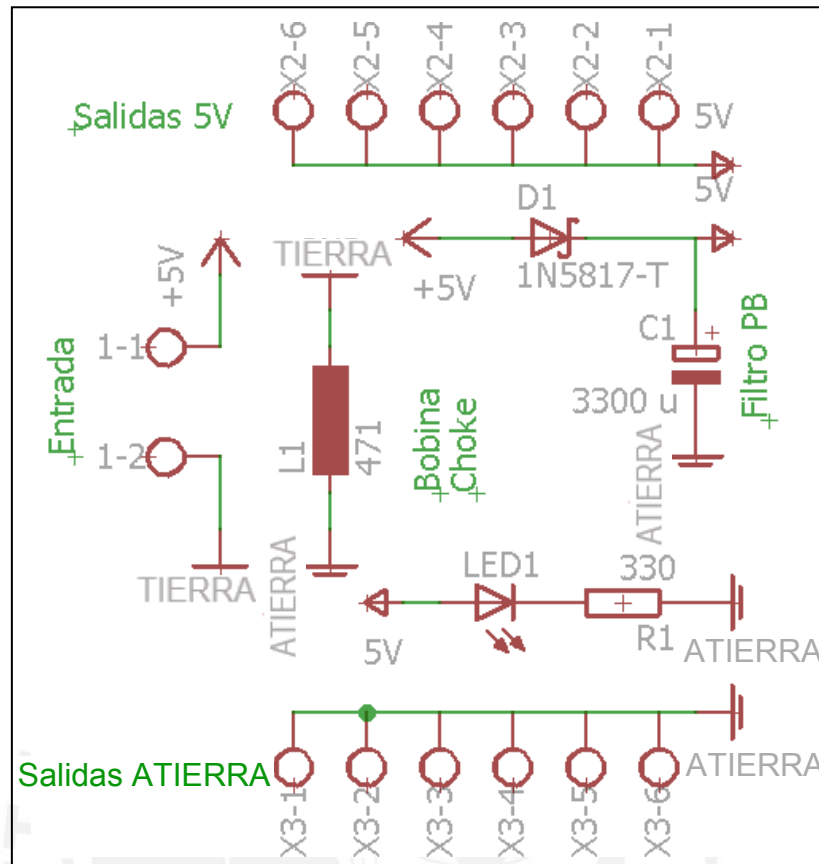


Fig. 3.8 Circuito de acondicionamiento de 5 VDC

La reactancia inductiva $X_L = 2\pi fL$ depende directamente de la frecuencia de la señal no lineal, en este caso del ruido entrante. Al ser dicha señal ruidosa muy variable lo más recomendable es seleccionar un valor de L tal que bloquee el ruido en todo el rango de frecuencias en que pueda presentarse. De los ensayos realizados con la etapa de potencia funcionando se puede concluir que una bobina de $L = 10 \text{ mH}$ presenta una impedancia capaz de consumir la energía de las señales ruidosas generadas tanto por el arranque como en el movimiento del actuador

3.4.3 Etapa de potencia

Esta es la etapa del sistema electrónico encargada de energizar los actuadores mecánicos, respetando y manteniendo la lógica de funcionamiento enviada desde la etapa de control. Para realizar esta labor se utiliza un dispositivo de acondicionamiento de señales conocido como puente H, dicho circuito recibe por entrada las señales de control que provienen del micro controlador ARDUINO®, enviando por sus salidas

señales de potencia que energizarán las bobinas de los motores de acuerdo a la lógica de control de la etapa del mismo nombre. El voltaje necesario para emitir dichas señales de potencia es obtenido de la energía del circuito de acondicionamiento de 12 VDC visto en la etapa anterior. La imagen 3.9 nos presenta el dispositivo L298 el cual será la tarjeta de acondicionamiento mencionada:

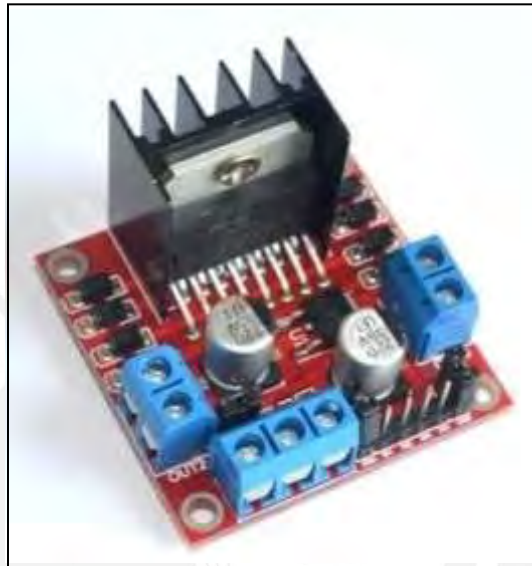


Fig. 3.9 Módulo de puente H L298 [59]

De acuerdo a los valores presentados en la hoja técnica de los motores a paso unipolares Mclennan P542-M48 2U que se usarán, la corriente nominal que consumen por fase dichos motores es de 230 mA @ 12 VDC, se debe tomar en cuenta que dicho consumo de corriente esta dado para un torque nominal de operación; a mayor torque mayor es la corriente por fase que exigirá el motor según la siguiente ecuación:

$$T_{ic} = \frac{p}{2\pi a} \Phi I_A$$

Dónde:

p : Número de pares de polos

a : Pares de conductores en paralelo en el inducido

Φ : Flujo magnético en el conductor

T_{ic} : Torque para un conductor del motor

Mientras que el torque para Z conductores se presenta de la siguiente manera:

$$T_i = \frac{pZ}{2\pi a} \Phi I_A$$

Teniendo en cuenta que p , a y Z son constantes la expresión quedaría así:

$$T_{ic} = k \Phi I_A$$

Para los valores nominales antes vistos ($T_n = 45 \text{ Ncm}$) la expresión se presenta:

$$45 \text{ Nm} = k \Phi (230 \text{ mA})$$

En las próximas secciones de este documento, dentro del desarrollo del área mecánica (p. 50), podremos apreciar el cálculo necesario y desarrollo para obtener la expresión del torque, en función de la aceleración angular, tanto para el movimiento polar como azimutal. A continuación usaremos dichas expresiones ya simplificadas:

Movimiento polar:

$$T_p = 0,96 + 16,99a \quad T_p: \text{Torque polar}$$

Usamos una $a = 0,035 \text{ rad/s}^2$

$$T_p = 1,55 \text{ Nm} = k \Phi_p I_p$$

Sabemos que:

$$T_i = 0,45 \text{ Nm} = k \Phi_n (230 \text{ mA})$$

Considerando un Φ constante para el mismo motor, la corriente máxima polar será:

$$I_p = \frac{(1,55)(230)}{0,45} = 792,22 \text{ mA}$$

Movimiento azimutal:

$$T_a = 0,58 + 8,1a \quad T_a: \text{Torque azimutal}$$

Usamos una $a = 0,035 \text{ rad/s}^2$

$$T_a = 0,864 \text{ Nm} = k \Phi_a I_a$$

Sabemos que:

$$T_i = 0,45 \text{ Nm} = k \Phi_n (230 \text{ mA})$$

Considerando un Φ constante para el mismo motor, la corriente máxima azimutal será:

$$I_a = \frac{(0,864)(230)}{0,45} = 441,34 \text{ mA}$$

De lo presentado se puede concluir que el consumo de corriente por cada fase del motor, tanto para polar como azimutal, es de $792,22 \text{ mA}$ y $441,34 \text{ mA}$

respectivamente, condición que cada interface L298 para cada motor (Fig. 3.4) es capaz de satisfacer, pues puede entregar hasta $1 A$ en cada una de sus salidas independientes. Es importante señalar que en los motores solo operan dos fases a la vez, esto debido a la secuencia de pasos en la lógica de movimiento (área de programación) con lo cual el consumo máximo total instantáneo es:

| Motor | Corriente de operación máxima por fase (mA) | Corriente total del motor (mA) |
|----------|---|--------------------------------|
| Polar | 792.22 | 1584.44 |
| Azimutal | 441.34 | 882.68 |

Tabla 3.2: Consumo de corriente de cada motor

3.4.4 Etapa de control de posición angular

La principal característica del sistema electrónico desarrollado es que, para asegurar la precisión en el posicionamiento angular, cuenta con un sistema de control de lazo cerrado tanto para los pasos polares como para los azimutales. [2] El sistema de control implementado es proporcional en el cual el controlador envía la orden de movimiento al puente H del motor hasta que el sensor incremental de posición angular indique que se ha alcanzado la posición deseada.

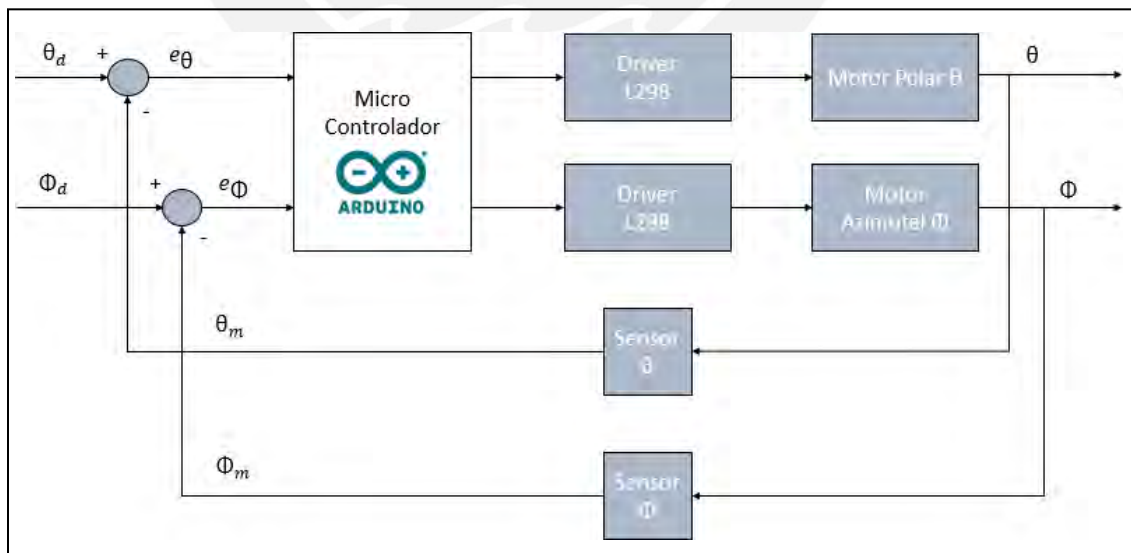


Fig. 3.10 Sistema de control

En la figura 3.10 se puede apreciar el diagrama de bloques general del sistema de control implementado. En resumen este sistema de control opera a partir del error de desplazamiento angular ($e_{\Delta\theta}$) el cual se obtiene a partir de la resta del desplazamiento angular deseado ($\Delta\theta_d$) con el desplazamiento angular medido ($\Delta\theta_m$) por el sensor codificador de pasos angulares; para poder analizar el sistema de control y sus características se necesita primero tener el modelo matemático de cada bloque, solo se analizará para el motor polar

Sensor angular: Este sensor convierte de manera lineal los grados angulares a la salida del sistema con los pulsos digitales que emite, manteniendo una correspondencia de un pulso por cada grado sexagesimal; dado esta relación la función de transferencia de este bloque es:

$$H(s) = 1$$

Puente H: Tal como se explicó en el punto 3.4.3 este bloque es el encargado de acondicionar las señales de control provenientes del controlador y entregar señales de potencia para poder energizar las bobinas del motor a pasos. Este bloque presenta un factor de conversión lineal multiplicativa, por lo que su función de transferencia es:

$$D(s) = \frac{12V}{5V} = 2,4$$

Controlador: Sobre este bloque reside el algoritmo de control implementado, el cual toma el error $e_{\Delta\theta}$ y le aplica una función de transferencia diseñada en base a controladores proporcionales k_p . El error en la diferencia de pasos es acondicionado en el algoritmo de control para luego ser multiplicado por el controlador proporcional k_p en el bloque C(s). A continuación se presenta el algoritmo y la función de transferencia:

$$e_{\Delta\theta 2} = (|e_{\Delta\theta 1}| + 1)^{-1}$$

$$C(s) = k_p = 20$$

Actuador: Este bloque es el que describe la función de transferencia del motor a pasos; para poder representar dicha función en una sola ecuación existen relaciones físico matemáticas que permiten modelar el comportamiento de este bloque, analizando las relaciones eléctricas y mecánicas de la misma. A continuación el desarrollo del modelamiento del motor

Modelo electrónico: Las fases eléctricas de un motor a pasos pueden modelarse, trabajando a frecuencias y corrientes bajas, como un circuito RL con una fuerza contra electromotriz *emf*

$$U = emf + R I(t) + L \frac{dI(t)}{dt} \quad (1)$$

Donde la fuerza contra electromotriz se puede modelar como:

$$emf_j = k_m \theta_m \text{sen}(p\theta) \quad (2)$$

Donde:

U: voltaje suministrado al motor

emf: Fuerza electromotriz

R: Resistencia de bobina

L: Inductancia de la bobina

k_m: Constante del motor

p: Número de pares de polos del motor

Modelo mecánico: La etapa mecánica del motor es modelada como un cuerpo rígido sometido a diferentes torques:

$$J \frac{d\theta_m}{dt} = T_m - T_b - T_L \quad (3)$$

Donde:

$$T_m = k_m I(t) \text{sen}(p\theta) \quad (4)$$

$$T_b = b\theta \quad (5)$$

$$T_L = m\theta r \quad (6)$$

De las ecuaciones presentadas, se sabe que:

J: Inercia del rotor y la carga

b: Constante de fricción de viscosidad del motor

m: Masa de la carga

r: Radio del sólido de revolución generado

Tomando en consideración que el lazo de control se aplica para todo el motor el conjunto y no como un control individual por cada fase del motor las ecuaciones del *T_m* y *emf* quedan de la siguiente manera:

$$emf = k_m \theta$$

$$T_m = k_m I(t)$$

Ahora procedemos a reemplazar las ecuaciones, tanto para el modelo electrónico como mecánico:

$$U(t) = k_m \theta_m + RI(t) + LI(t)$$

$$J\ddot{\theta}_m = k_m I(t) - b\dot{\theta}_m - mr\ddot{\theta}_m$$

A las ecuaciones antes expuestas se le aplica la transformada de Laplace, quedando como resultado:

$$U(s) = k_m s\theta(s) + RI(s) + sLI(s)$$

$$Js^2\theta(s) = k_m I(s) - bs\theta(s) - mrs^2\theta(s)$$

Luego:

$$U(s) - ks\theta(s) = (R + Ls)I(s)$$

$$Js^2\theta(s) + bs\theta(s) + mrs^2\theta(s) = k_m I(s)$$

Igualando las corrientes se desprende lo siguiente:

$$\frac{U(s) - ks\theta(s)}{(R + Ls)} = \frac{Js^2\theta(s) + (bs + mrs^2)\theta(s)}{k}$$

Finalmente quedando la función de transferencia como sigue:

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{k}{s[(J + mr)s + b](R + Ls)}$$

De la función de transferencia presentada podemos considerar que los efectos de la fuerza contra electromotriz son despreciables a comparación con los efectos de torque por la carga que soporta el motor, con lo cual la ecuación quedaría así:

$$emf = k_m \theta = 0$$

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{k}{s[(J + mr)s + b](R + Ls)}$$

Con los bloques explicados y desarrollados, el diagrama de bloques quedaría de la siguiente manera:

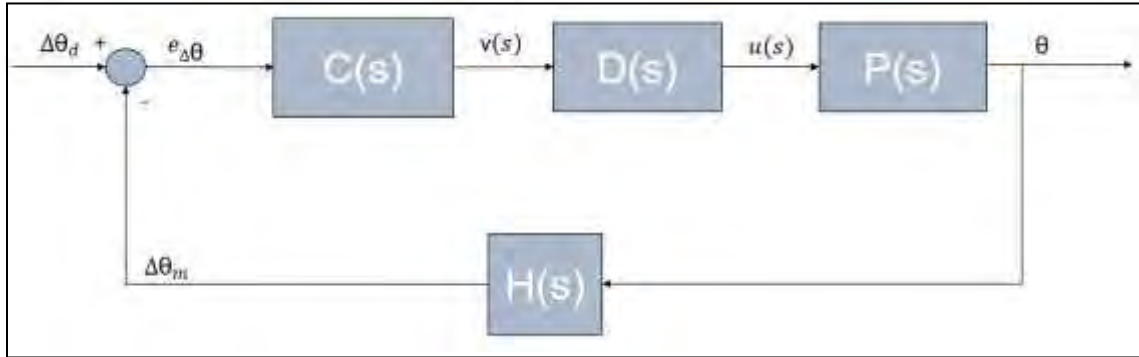


Fig. 3.11: Diagrama de bloques del sistema de control

Con este sistema de control diseñado, se procede a calcular los parámetros del sistema tales como tiempo de respuesta, sobre impulso y amortiguamiento; para esto primero se debe obtener la función de transferencia del sistema completo:

$$\frac{\theta(s)}{\Delta\theta_d(s)} = \frac{48k_T}{4k_T + s[(J + mr)s + b](R + Ls)}$$

De la ecuación presentada el valor de la inductancia L genera un polo que se encuentra muy alejado con relación al polo generado por $J + mr$, por lo tanto los efectos del polo de la inductancia no afectan a la estabilidad del sistema, por lo tanto la función de transferencia puede quedar de la siguiente manera:

$$\frac{\theta(s)}{\Delta\theta_d(s)} = \frac{48k_T}{(J + mr)Rs^2 + bRs + 48k_T}$$

$$\frac{\theta(s)}{\Delta\theta_d(s)} = \frac{48 \cdot k_T}{b} \frac{(J + mr) \cdot R}{s^2 + J + mr s + (J + mr)R}$$

Con lo cual, la frecuencia natural no amortiguada del sistema w_n es:

$$w_n = \sqrt{\frac{48 \cdot k_T}{(J + mr)R}}$$

Y el factor de amortiguamiento relativo del sistema ξ quedaría de la siguiente manera:

$$\xi = \frac{b}{2w_n(J + mr)}$$

Para resolver las ecuaciones planteadas necesitamos los valores experimentales de los parámetros del motor y sistema mecánico:

$$J = 3,2284e-6 \text{ kg.m}^2$$

$$m = 25 \text{ kg}$$

$$r = 0,583 \text{ m}$$

$$k_T = 0,0274 \text{ N.m/A (Constante de torque del motor)}$$

$$R = 4 \text{ ohm}$$

$$b = 3.507 \text{ N.m.ms}$$

Estos valores han sido tomados de los datos teóricos del motor a pasos utilizado, además de tomar valores experimentales de ensayos en laboratorio para definir el valor de la constante de torque [48], [49]:

$$w_n = 0,150199$$

$$\xi = 0,801$$

Con este valor de factor de amortiguamiento menor a 1 se puede decir que el sistema es sub amortiguado, con estos valores podemos calcular el porcentaje de sobre impulso y el tiempo de establecimiento:

$$PO = 100. e^{\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} = 1,3036\%$$

$$t_s = \frac{4}{\xi.w_n} = 33,25 \text{ ms}$$

Estos valores calculados nos indican que el sistema tiene un sobre impulso bajo, lo cual implica alcanza la posición deseada con un error reducido presentando un tiempo de establecimiento pequeño.

En relación al sensor de medición angular utilizado para monitorear la posición angular en cada grado de libertad, se trata de un MOCH22A, el cual es un optoacoplador tipo herradura que está instalado junto con un disco dentado con 180 muescas destinadas a marcar la posición:

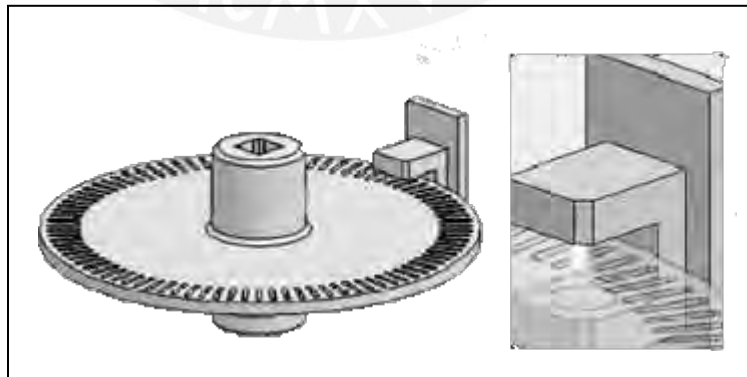


Fig. 3.12 Sensor MOCH22A y esquema con disco ranurado [60]

Es importante mencionar que para que estos sensores funcionen correctamente deben estar polarizados con el voltaje y corriente adecuados, para esto se elaboró un circuito de polarización que activa tanto el LED emisor del MOCH22A como el receptor fototransistor del mismo dispositivo optoacoplador. La figura 3.13 presenta el circuito de polarización desarrollado:

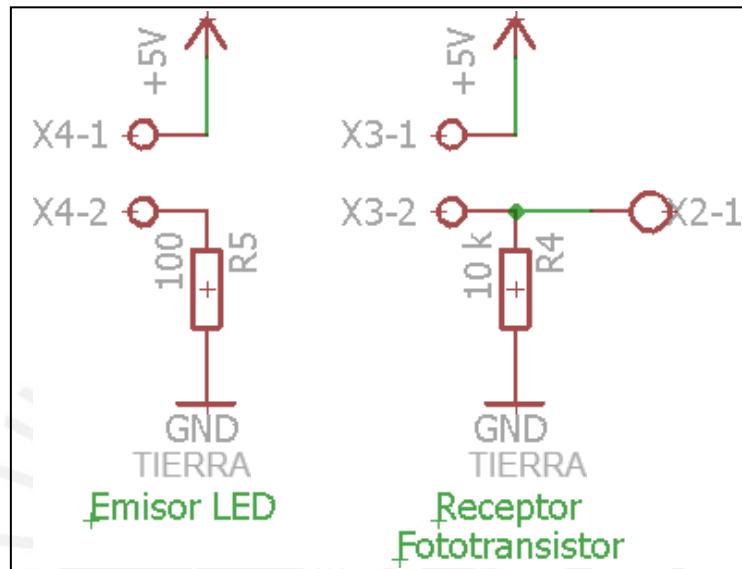


Fig. 3.13 Esquemático de polarización de sensor MOCH22A

El emisor LED se conecta en el borne X4 y esta polarizado con una resistencia de 100 ohms para asegurar la corriente adecuada para su máximo brillo, mientras que el receptor fototransistor se conecta en X3 y este presenta polarizado mediante un circuito de pull down, cuando el dispositivo se encuentre en corte se fijarán 0 VDC en X2 y en saturación 5 VDC , esta señal de X2 va directamente como realimentación al micro controlador.

3.4.5 Etapa de control manual

Esta es la etapa del sistema electrónico cuyo propósito es el de polarizar los pulsadores e interruptores que conforman el sistema de control manual del posicionador angular, como ya se ha visto anteriormente los circuitos de polarización son muy importantes pues regulan los niveles de voltaje y corriente que necesitan los dispositivos electrónicos para funcionar, en este caso se trata de circuitos con resistencia a tierra que serán útiles para fijar tensiones de 0 VDC o 5 VDC dependiendo

del estado de los pulsadores. En total son 6 pulsadores (4 de movimiento angular y 2 de inicio y parada) y 1 interruptor que indica la activación o desactivación del modo manual, cada uno de estos será polarizado por un circuito de resistencia a tierra como se presenta a continuación.

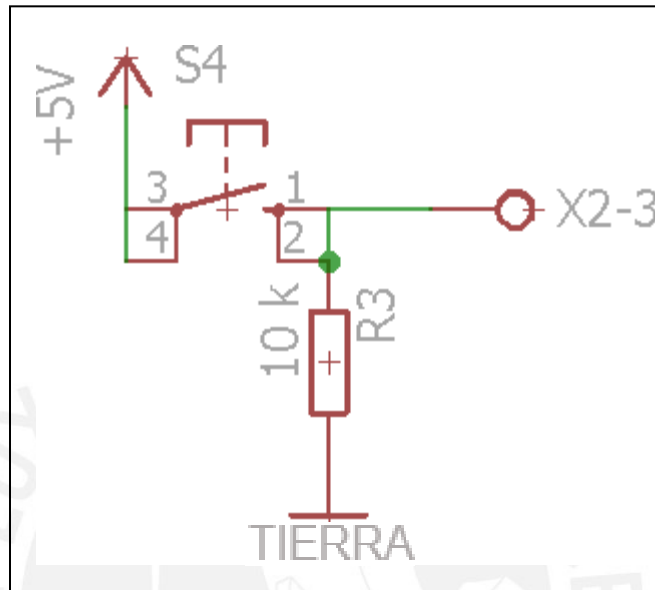


Fig. 3.14: Esquemático de polarización de pulsadores utilizando Pull-Down

3.4.6 Etapa de comunicación USB - RS232 – TTL

Gracias a la modularidad y flexibilidad del hardware ARDUINO®, es posible encontrar en el mercado dispositivos complementarios, de fácil conexión, que ayuden a implementar sistemas más complejos, tal es el caso del conector USB a serial TTL el cual cuenta internamente con un circuito que hace la conversión de los niveles RS232 a los niveles TTL CMOS para que puedan ser interpretados directamente por los pines Rx y Tx del ARDUINO®, de esa manera nos ahorramos algunas etapas de hardware que ya vienen incluidas en este práctico cable. Es importante resaltar que este cable conversor tiene esencial misión de ser el canal de comunicación bidireccional entre el programa de sincronización en MATLAB® y el circuito de control en ARDUINO®, esta comunicación es fundamental para la automatización del sistema completo.

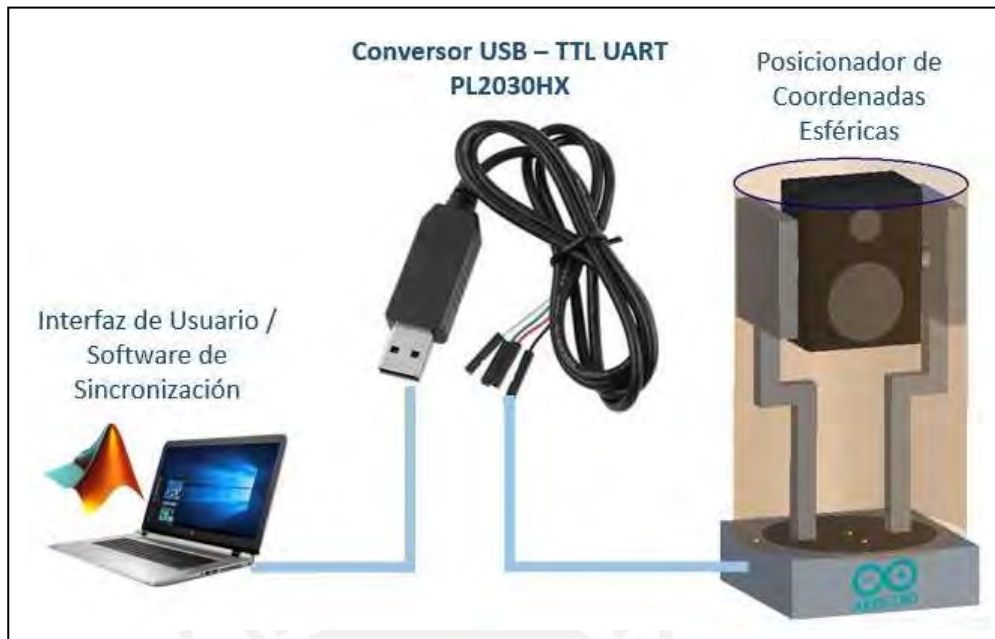


Fig. 3.15 Esquema de conexión USB-TTL

3.4.7 Etapa de micro controlador

Esta es la etapa principal de la electrónica del proyecto pues es donde podemos encontrar el micro controlador que se encarga de operar todas las funciones de la electrónica antes explicadas y además de permitir implementar el programa de control que analizaremos más adelante en el área de programación. La etapa del micro controlador ha sido implementada con una placa ARDUINO® MEGA 2560 [44], el cual está basado en el microcontrolador ATMEGA 2560 de la familia ATMEL®.



Fig. 3.16 Placa microcontrolador ARDUINO® MEGA 2560 [44]

3.5 Área mecánica

En esta etapa del proyecto se explica el diseño y selección de equipos, materiales y mecanismos involucrados en el desarrollo del prototipo de posicionador de coordenadas esféricas, teniendo como pieza principal los actuadores electromecánicos. Para el presente trabajo se utilizaron motores a pasos electromecánicos, los cuales ayudados por cajas de engranajes de reducción, son los encargados de realizar el posicionamiento angular en coordenadas esféricas del altavoz para la medición del patrón de radiación.

En las etapas anteriores se ha visto que para alcanzar las coordenadas esféricas necesarias para la obtención del patrón de radiación se necesita diseñar un posicionador de 3 dimensiones que logre la posición deseada de manera segura y en el menor tiempo posible, es decir hablamos de un posicionador de coordenadas esféricas que permite abarcar todas las posiciones angulares del espacio circundante describiendo así una esfera de radiación. El diseño de este posicionador se realizará en dos partes: analizando los mecanismos del posicionamiento polar y los del posicionamiento azimutal.

3.5.1 Cálculo y diseño del torque de movimiento

[45] Un factor determinante al momento de seleccionar el actuador es el torque necesario para mover la carga, para ello debemos calcular el torque de carga y el torque de aceleración de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T_M = (T_a + T_L) * k \quad (1)$$

Donde:

T_a : Torque de aceleración o torque de inercia

T_L : Torque de carga

k : Factor de seguridad (1,5~2)

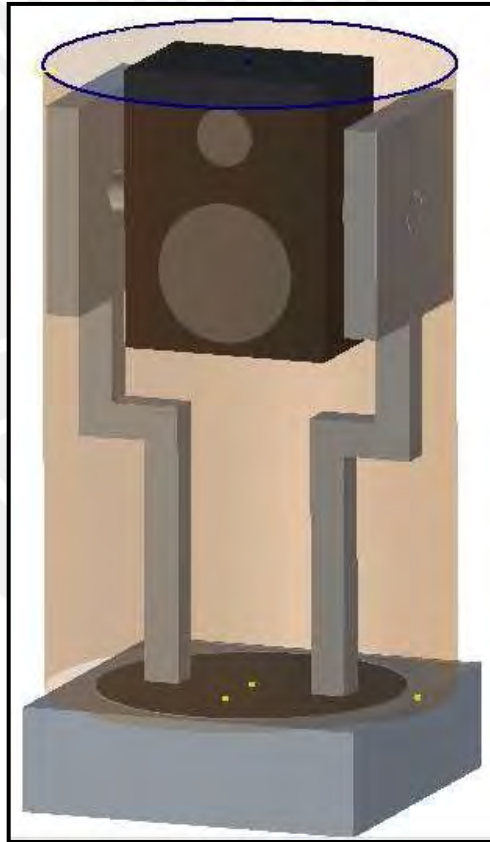


Fig. 3.17: Modelo del posicionador generando un cilindro de revolución

- **Motor de movimiento polar (θ)**

La carga que moverá el motor A (motor polar) y al mecanismo polar se define como un altavoz de 40 kg máximos los cuales se suman al sistema de movimiento azimutal de 10 kg de masa máxima, en cuanto a las longitudes se considera una altura máxima de $1,4 \text{ m}$ y un radio de $0,583 \text{ m}$ del cilindro de revolución similar a lo presentado en la figura 3.16. Los datos de la carga para el motor A serán:

$$M_1 = M_{spk} + M_\phi = 50 \text{ kg}$$

$$R_1 = 0,583 \text{ m}$$

$$L_1 = 1,4 \text{ m}$$

Para calcular el torque de carga usamos:

$$T_{L1} = \frac{F_1 * R_1}{n} \quad (2)$$

Donde:

F_1 : Fuerza para mover la carga L_1

n : Eficiencia del mecanismo $\approx 0,9$

$$F_1 = ma = \mu M_1 g \quad (3)$$

Además:

μ : Coeficiente de fricción entre superficies.

g : Aceleración de la gravedad $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$

Las superficies en contacto son el disco polar y la respectiva base sobre la que este reposa, en tal caso para reducir la fricción entre dichas superficies se usara un rodamiento axial de bolas cuyo coeficiente de rozamiento es $\mu \approx 0,0015$. Con esto el resultado de la ecuación (3) será:

$$F_1 = 0,74 \text{ N}$$

Entonces en (2):

$$T_{L1} = 0,48 \text{ N.m}$$

De (1), para calcular el torque de inercia T_a :

$$T_a = J_L a \quad (4)$$

Donde:

J_L : Momento de inercia

a : Aceleración del motor

El momento de inercia se calcula considerando a la masa M_1 como el cilindro de revolución antes mencionado:

$$J_L = \frac{1}{2} M_1 R_1^2$$

con lo cual:

$$J_{L1} = 8,49 \text{ kgm}^2$$

luego calculamos el T_a en (4):

$$T_{a1} = J_{L1} a = 8,49 a$$

Con esto el torque necesario en (1) para el motor A y considerando un $k=2$ (Se considera el k más alto para el peor de los casos) será:

$$T_{MA} = (0,48 + 8,49 a) k = 0,96 + 16,99 a$$

- **Motor de movimiento azimutal (Φ)**

El siguiente paso es calcular los parámetros del motor B (motor azimutal) el cual realiza el posicionamiento azimutal de la carga, este motor a diferencia del motor A sólo se encarga de rotar azimutalmente el altavoz (M_{spk}) el cual también genera un sólido de revolución de un radio R_2 de acuerdo a los siguientes parámetros:

$$M_2 = M_{spk} = 40 \text{ kg}$$

$$R_2 = 0,45 \text{ m}$$

$$L_2 = 0,6 \text{ m}$$

Con estos parámetros se calcula el torque de carga T_{L2} con las mismas ecuaciones vistas en el cálculo de los datos polares:

$$F_2 = ma = \mu M_2 g \quad (5)$$

Donde:

$$\mu: \text{Coeficiente de fricción del rodamiento} \approx 0,0015$$

Con lo cual en (5):

$$F_2 = 0,59 \text{ N}$$

Entonces en (2):

$$T_{L2} = \frac{F_2 R_2}{n} = 0,29 \text{ Nm}$$

Ahora se procede a calcular el torque de aceleración T_a , para lo cual calculamos en primer lugar el momento de inercia J_{L2}

$$J_{L2} = \frac{1}{2} M_2 R_2^2 = 4,05 \text{ kgm}^2$$

Con lo cual tenemos en (4):

$$T_{a2} = J_{L2} a = 4,05 a$$

Finalmente el torque necesario en (1) para el motor B y considerando un $k=2$ (Se considera el k más alto para el peor de los casos) será:

$$T_{MB} = (0,29 + 4,05 a) k = 0,58 + 8,1 a_2$$

Con los cálculos efectuados y las ecuaciones obtenidas tanto para el movimiento polar como el azimutal, es posible dimensionar el torque necesario a partir de la aceleración angular a la que trabajará de cada motor. Cabe mencionar que este torque será el necesario para el motor en el caso en que la carga esté conectada directamente al eje del motor, en caso de usar mecanismos de transmisión y/o transformación de movimiento, estos modificarán el torque que llega al motor.

3.5.2 Selección de motores

Ahora que ya conocemos los torques necesarios para mover las cargas podemos pasar a seleccionar los motores adecuados que se encarguen de efectuar dichos torques de movimiento, para esto debemos evaluar los tipos de motores existentes en el mercado comparando sus pro y contras.

A gran escala y de manera comercial los motores se pueden clasificar en motores de combustión interna, eólicos, hidráulicos, eléctricos, entre otro, el primer grupo de motores supone la implementación de un sistema de combustión interna lo cual es muy complejo para nuestra aplicación, por lo que el uso de estos queda descartado, de igual manera los eólicos e hidráulicos, por lo que lo más viable para nuestras condiciones es el uso de motores eléctricos.

Los motores eléctricos se clasifican en dos grupos principales: de corriente alterna y de corriente continua (AC y DC respectivamente), los cuales se diferencian no solo en el tipo de energía eléctrica que reciben sino también en el mecanismo que utilizan para generar el torque de movimiento y por consecuencia en las aplicaciones para cada uno. Los motores de corriente alterna generan su campo magnético giratorio

directamente de la corriente alterna que reciben sin el empleo de escobillas o anillos rozantes, presentan buen rendimiento y potencia durante largos periodos de tiempo; sin embargo, tienen la desventaja que trabajan a velocidades fijas y por ende requieren un equipo externo para controlar las velocidad; por otro lado los motores de corriente continua son máquinas que trabajan internamente con un conmutador el cual permite invertir el sentido de la corriente y así mantener el movimiento y torque del rotor; además poseen la ventaja de que pueden variar su velocidad proporcionalmente a la tensión de alimentación sin la necesidad de usar un variador de velocidad o similares.

Sabiendo esto resulta conveniente elegir un motor de corriente continua pues aunque presentan un mayor consumo de energía al disponer de un colector de delgas, estos motores brindan facilidades para el control de velocidad y el posicionamiento además de versatilidad de dimensiones lo cual resulta práctico para su acoplamiento al sistema mecánico. A continuación la tabla 3.3 nos presenta un comparativo de los principales motores DC:

| Motor | Velocidad | Torque | Voltaje | Control: Vel. y Pos. | Repetitividad | Usos |
|------------|--------------|--|------------------------------|---|---|---|
| DC | Altas | Bajo, requiere caja de reducción | Bajo, mediano y alto consumo | Vel. con PWM y Posición con control externo | Depende del control implementado | Altas RPM: Ventiladoras, ruedas de carro, etc |
| Servomotor | Altas | Bajo torque. Mayor torque son costosos | Mediano consumo | Posición precisa por PWM Digital | Sistema de control electrónico interno | Alto rendimiento: Brazo robot, control de timón, etc |
| Brushless | Amplio rango | Alto torque | Mediano consumo | Sistema de control externo para Vel. y Pos | Depende del control implementado | Equipos médicos, ventiladoras, taladros y equipos automáticos |
| A pasos | Media - Baja | Elevado torque | Mediano consumo | Posicionamiento por pulsos digitales | Alta y de gran precisión de posicionamiento | Lectoras de CD, Scanners, Impresoras y Plotters |

Tabla 3.3: Comparativo de motores de corriente continua.

[45] [46] En términos cualitativos, el sistema posicionador esférico en desarrollo necesita ser muy preciso, con un error máximo permitido de $\pm 0,5^\circ$ y que sea capaz de mover cargas de hasta 50 kg conservando la repetitividad y presentando un torque de mantenimiento elevado que brinde firmeza para obtener la respuesta del altavoz en

cada coordenada esférica. La velocidad es un factor secundario para esta aplicación. De lo presentado en la tabla anterior y de acuerdo a las necesidades mecánicas del sistema se elige usar un motor a pasos pues dejando de lado el factor de la velocidad, estos motores son capaces de mover grandes cargas (torque elevado) presentando una precisión importante debido su principio de fabricación con pasos electromecánicos fijos, lo cual favorece mucho a la repetitividad en el desplazamiento angular.

Finalmente es importante mencionar que la resolución angular máxima del motor viene dada por la cantidad de pasos mecánicos que tiene el motor, con lo cual el espaciado angular de cada paso del motor resulta de la división de 360° entre el número de pasos totales del motor. Los pasos angulares del posicionador son generados como un múltiplo de la resolución máxima del motor, mientras que cada paso del motor se logra enviando una determinada combinación de pulsos a las bobinas del motor de tal manera que energizar secuencialmente cada bobina del estator del motor hará que el rotor se mueva angularmente siguiendo los pasos mecánicos del motor. El envío de cada combinación de pulsos desde el microcontrolador para energizar secuencialmente cada bobina del estator permite el movimiento del rotor, por lo tanto la velocidad con que estas combinaciones de pulsos son enviados no varía la resolución angular de motor pero si su velocidad angular; recordemos que la resolución angular depende de los pasos mecánicos del motor.

3.5.3 Mecanismos de transmisión y movimiento

Con los motores ya seleccionados podemos pasar a diseñar los mecanismos necesarios para acoplar los motores y aprovechar de la mejor manera su energía de movimiento. Lo analizaremos por etapas:

- **Mecanismos de posicionamiento polar:**

El principal objetivo de los mecanismos en este posicionador es transmitir el movimiento del motor (*Stepper motor*) al disco polar para alcanzar las posiciones angulares requeridas, y para conseguirlo se identifican las siguientes partes:

Acople del motor con el eje

Es necesario transmitir el movimiento del motor eficientemente sin que se vea afectado por el peso de la carga o por las inercias de su propio movimiento y además que permita un fácil acceso al motor para mantenimiento o reemplazo; el motor seleccionado será acoplado mediante un mecanismo de transmisión para aliviar el torque y peso de la carga.

El optar por un acople directo tiene la ventaja de que se puede aprovechar toda la potencia del motor directamente sin embargo se toma la velocidad y torque tal como lo entrega el actuador pues no hay ningún elemento intermedio reductor o que aumente la velocidad. Las fuerzas de torsión pueden ser absorbidas por un acople dentado en el eje.

Un acople con mecanismo de transmisión tiene la ventaja que puede, dependiendo de los acoples usados, modificar la velocidad y el torque a la salida del motor, además que permite un fácil desmontaje del motor del sistema para temas de mantenimiento; sin embargo, el uso de varias etapas de acople genera pérdidas de energía debido a la eficiencia de cada mecanismos. Para el motor polar se usará un mecanismo de transmisión circular entre el rotor y el eje del disco polar, a continuación se evaluarán los tipos de transmisión circular existentes:

| Mecanismo | Ventaja | Desventaja | Ejemplo |
|-------------------------------|--|--|---|
| Ruedas de fricción | Sencillo de implementar | Deslizamiento, para trabajo de bajo torque |  |
| Poleas con correa | Transmisión de giro en el mismo sentido a mayor distancia | Pérdidas en la correa, desgaste |  |
| Engranajes rectos | Transmisión entre ejes paralelos | Pérdidas entre engranes |  |
| Engranajes helicoidales | Menos desgaste, transmisión gradual de empuje | Pérdidas entre engranes |  |
| Engranaje de tornillo sin fin | Transmisión entre ejes no paralelos, buena transmisión de movimiento | Reduce la velocidad |  |
| Engranajes con cadena | Transmisión de ejes paralelos a distancia | Requiere mantenimiento a la cadena |  |

Tabla 3.4: Cuadro comparativo de mecanismos de transmisión. [71]

De la información presentada en la Tabla 3.4 es necesario elegir un mecanismo de acople entre motor y eje de movimiento que permita transmitir la potencia de manera amplificada reduciendo para ello la velocidad; además, el mecanismo elegido debe evitar movimientos indeseados por efecto de la inercia de carga, es decir que sólo el motor puede mover la carga y mas no la carga haga mover al motor. De lo expresado hasta este punto el mecanismo más beneficioso para el objetivo de posicionamiento angular es el de piñón o engranaje helicoidal con tornillo sin fin, el cual si bien se caracteriza por un movimiento lento (reductor) presenta una alta potencia lo cual es ideal para trabajos con cargas pesadas, además de bloquear el movimiento en el sentido de piñón a tornillo sin fin.

Eje de transmisión

El eje de transmisión entre el sistema de engranaje y el disco polar debe tener las siguientes consideraciones:

- El momento de inercia de la carga agrega esfuerzos de torsión y flexión que afectan al eje de movimiento y lo que esté conectado a este.
- Presencia de esfuerzos de deformación cortante debido a cargas transversales.
- La necesidad de mantenimiento exige modularidad y facilidad de desmontaje.

Tomando en cuenta estas consideraciones se recomienda usar 2 ejes acoplados mediante un mecanismo dentado que permita aislar los efectos antes mencionados sin que afecten a los engranes, de esta manera el eje estaría compuesto por dos tramos unidos; sin embargo, debido a que la geometría del posicionador polar diseñado no requiere de un eje de transmisión de gran longitud, resulta siendo innecesario el uso de este acople dentado [47].



Fig. 3.18: Breda de ajuste y eje con canal chavetero [68]

Finalmente para la implementación del eje de transmisión se usará una barra de acero de 20 mm de espesor con una longitud 200 mm , la cual en uno de sus extremos descansará sobre una chumacera cuadrada y en el otro extremo se acoplará al disco polar usando una brida empernada. Para una mejor sujeción el eje tendrá un canal donde se podrá ajustar el prisionero de la brida (Figura 3.18)

Ensamblaje de eje con soportes y disco polar

Ahora que ya tenemos seleccionados los mecanismos que se utilizarán tanto para el acople del motor al eje, así como la forma de transmisión del movimiento mediante el eje, corresponde ver cómo se ensamblarían estas partes en el posicionador polar.

El posicionador polar es básicamente un tornamesa de disco polar el cual realiza la rotación de la carga conformada por el posicionador azimuthal y el altavoz en medición, este disco polar esta acoplado al eje de transmisión del motor, tal como se explicó anteriormente, y distribuye el peso de la carga en dos anillos concéntricos utilizando rodamientos axiales de bolas (Figura 3.21). A continuación se presenta un diagrama de corte de las principales etapas del posicionador polar:

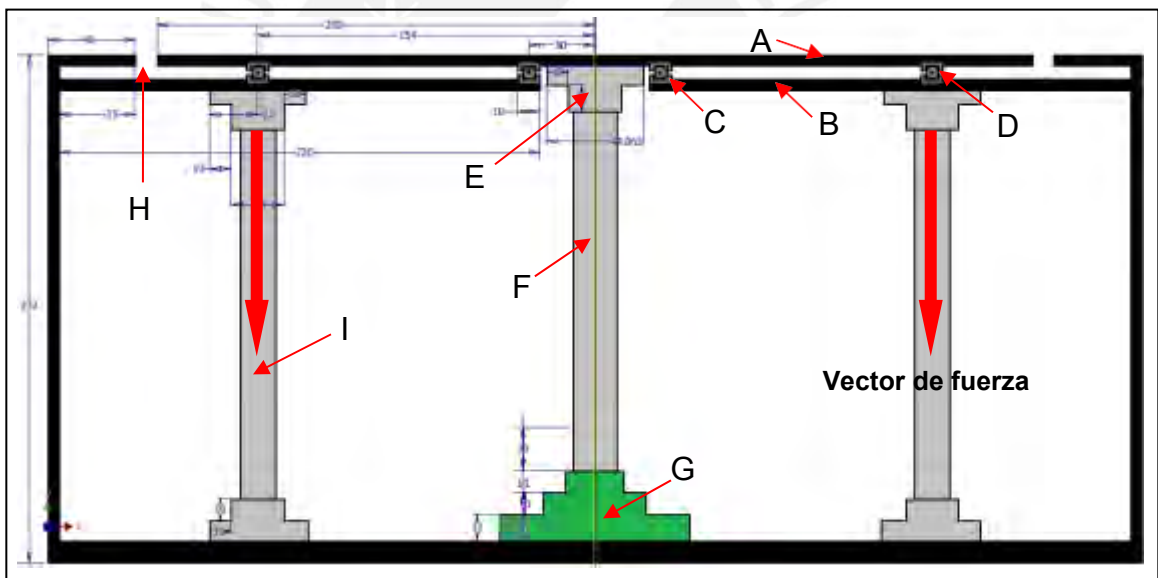


Fig. 3.19: Vista de corte posicionador polar

De lo presentada en la figura 3.19 se explica a continuación:

- A: Disco polar
- B: Falsa tapa de soporte en la cual reposa el disco y la carga azimuthal
- C: Rodamiento axial de radio menor
- D: Rodamiento axial de radio mayor
- E: Brida de acople entre eje y disco
- F: Eje de transmisión

- G: Chumacera cuadrada donde reposa el eje de transmisión
- H: Espacio entre disco y estructura donde se ubica el disco dentado para contar los pasos
- I: Pilar de soporte

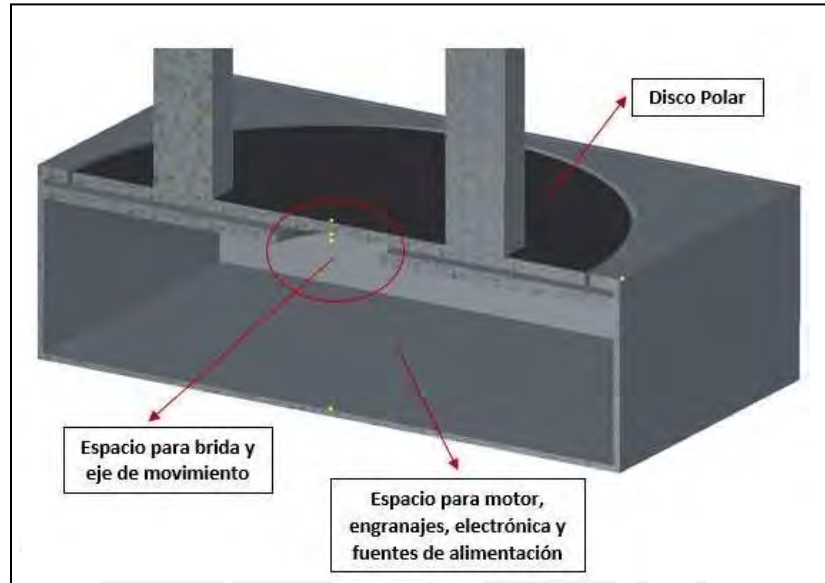


Fig. 3.20: Vista de corte 3D de posicionador polar

Según lo presentado se entiende que el disco polar distribuye el peso que soporta en 2 rodamientos axiales concéntricos (C y D), los cuales tienen la propiedad de permitir la rotación absorbiendo las cargas que inciden de manera axial a su eje de rotación; a su vez estos rodamientos están alojados sobre una falsa tapa (B) la cual descansa sobre 4 pilares (I) sujetos mediante bridas (E) al igual como se hace con el eje de transmisión, estos cuatro pilares trasladan el peso ya distribuido de la carga hacia la base del posicionador polar. De esta manera el torque del motor solo hace el trabajo de movimientos rotacionales sin ser afectado por el peso de la carga.



Fig. 3.21: Rodamiento axial de bolas [61]

- **Mecanismos de posicionador azimutal:**

Esta es la parte del mecanismo encargado de posicionar la carga en el eje azimutal y a la vez de sujetar la carga (altavoz) firmemente para realizar las mediciones. Este posicionador consta de los siguientes mecanismos:

- **Pedestal de base cuadrada para posicionador azimutal**

Con el propósito de servir de soporte y elevar el altavoz en medición, se implementa un mecanismo pedestal de base cuadrada que irá ensamblado sobre el disco polar; tomando en cuenta que el altavoz debe encontrarse a una altura mínima de $1,5 m$ para evitar las reflexiones con el suelo este pedestal deberá presentar una estabilidad suficiente que no permita que le peso de la carga incline el sistema en conjunto hacia algún costado

Frente a esta situación se plantea el diseño de un pedestal de base cuadrangular replicando los diseños exitosamente implementados en la industria de antenas parabólicas y radares, a continuación se presenta una imagen tomada del programa *Small Radio Telescope* del *Embry-Riddle Aeronautical University* (ERAU) [47].



Fig. 3.22: Pedestal del SRT en el lab del ERAU [47]

Este pedestal tiene capacidad para soportar grandes pesos además de presentar buena estabilidad y distribución de carga debido a su base cuadrangular, y al tratarse de una estructura no maciza reduce los problemas de difracción y reflexiones acústicas. Los cuatro puntos de contacto de la base serán ubicados en el disco polar sobre la circunferencia descrita por el rodamiento axial de radio mayor esto con el propósito de que el peso de la carga se vaya a través de los pilares internos en el posicionador polar visto en la sección anterior.

Sujetador del altavoz

Es de gran importancia para este proyecto implementar un mecanismo de sujeción eficiente para cargas de altavoces de hasta 20 kg pero que también sea capaz de sujetar altavoces pequeños de 5 kg por ejemplo; esto quiere decir que el mecanismo de sujeción debe poder adaptarse a diferentes dimensiones. Hasta este punto del diseño el mecanismo ya está en la capacidad de sujetar el altavoz y mantenerlo a una altura acústicamente adecuada para realizar la medición sin embargo aún no realiza la rotación azimutal que complementa al movimiento polar visto en la sección anterior, para esto se debe diseñar un mecanismo que permita distribuir el peso en dispositivos mecánicos que lo anulen de tal manera que el torque del motor B es utilizado en realizar el movimiento y no en soportar la carga.

Hecho este análisis, para que el altavoz pueda realizar desplazamientos angulares azimutales deberá realizar elevaciones en ϕ , los cuales se consiguen rotando la fuente sobre un eje horizontal como se pudo apreciar en la figura 2.20. Este eje horizontal debe pasar por el centro geométrico de la fuente de tal manera que el peso del altavoz sea distribuido angularmente en ϕ , a la vez que los extremos del eje descansan sobre rodamientos radiales.

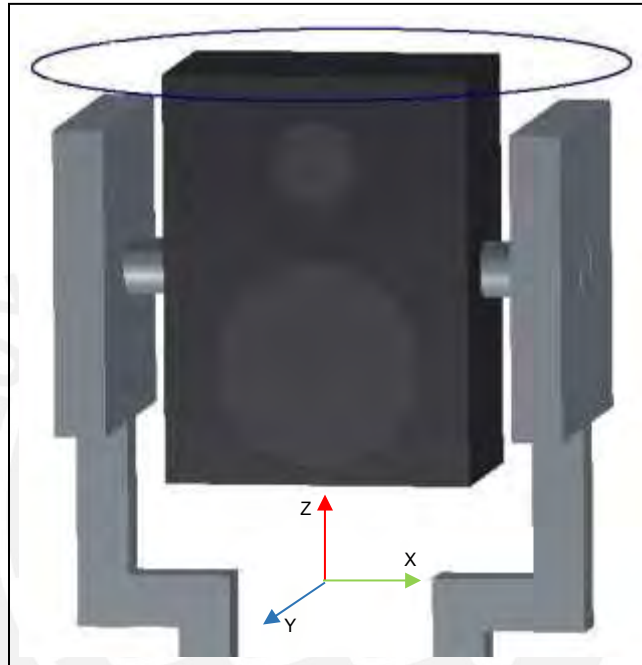


Fig. 3.23: Altavoz con eje de rotación azimutal

Como se puede apreciar en la imagen anterior el eje horizontal está atravesando al altavoz para conseguir sujetarlo desde su centro geométrico, a la vez que reposa sus extremos en dispositivos mecánicos de rodamientos radiales. Esto funciona en el diseño; sin embargo, en la práctica no es posible dañar la fuente sonora atravesando un eje, por lo cual se necesita un sujetador que cumpla esta función.

Ante esto se propone una solución en la cual el eje quede dividido en dos tramos, de tal manera que estos tramos puedan sujetar al equipo ejerciendo fuerzas opuestas por los laterales de dicho altavoz, quedando así la fuente sonora como una suerte de puente entre los dos tramos de eje. Esta solución permitirá que el altavoz pueda rotar con ángulos de elevación en ϕ distribuyendo uniformemente su masa de manera axial al eje horizontal.

Esta idea es útil; sin embargo el peso del altavoz, para cualquier ángulo en ϕ , se encuentra en el plano YZ , el cual es perpendicular a las fuerzas laterales que lo aprisionan en X y por lo tanto no es posible mantenerlo sujeto de esta manera. La solución es tener un mecanismo que también aprisione el altavoz en Y y en Z , para esto utilizamos un mecanismo tipo mordaza de torno de 4 garras concéntricas, este mecanismo estará en los dos laterales donde los tramos de eje aprisionan al altavoz, de esa manera cada garra de la mordaza soporta el peso de la fuente sonora en los ejes Y y Z . A continuación un ejemplo del mecanismo que se empleará para sujetar al altavoz:



Fig. 3.24: Mordaza de 4 garras concéntricas [62]

En resume, sujetar el altavoz con este mecanismo tipo mordaza de 4 garras, permite la rotación en ϕ de la fuente sin el inconveniente de que los pesos en los ejes Z e Y no estén compensados ni anulados; manteniendo así el altavoz en posición estática para la medición.

Transmisión de movimiento

Con el mecanismo explicado en el punto anterior ya podemos sujetar con confianza cualquier altavoz en el rango de masa desde los 5 kg a 20 kg , y en longitud de hasta 25 cm en Y o en Z , ahora lo que se necesita es poder alojar el motor e implementar el mecanismo que le permitirá transmitir el movimiento al eje dividido en 2 visto en la figura 3.23.

Un criterio al momento de diseñar sistemas de transmisión de movimiento es considerar al motor lo más cercano posible a la carga, con la menor cantidad de elementos mecánicos en el intermedio; en ese caso el motor debería estar acoplado a alguno de los lados del eje de la figura 3.23 y conectado directamente, esto en condiciones normales debería ser lo óptimo tal como se hizo para el posicionador polar sin embargo existen dos inconvenientes principales:

- El peso del altavoz que aplica en Y y Z , introduce fuerzas transversales al eje en un punto con brazo de palanca igual a la mitad de toda la longitud del eje (eje dividido en dos tramos). Si bien es cierto que los extremos del eje dividido reposan sobre rodamientos radiales el peso de la carga alojado a la mitad ejerce un brazo de palanca que afectaría el desempeño del motor acoplado en directa en un extremo del eje
- El movimiento del motor aplicado desde un extremo del eje tendría que pasar desde el tramo de eje más cercano, pasando por la carga sujeta por las mordazas y así llegar al segundo tramo de eje el cual reposa en otro rodamiento radial. Esta transmisión de movimiento a través de etapas no fusionadas, etapas que presentan ligeros juegos y tolerancias entre ellas, trae como consecuencia que el tramo más lejano del eje no se mueva ni a la misma velocidad ni con el mismo torque que el tramo más cercano; este es un problema que afectaría la sincronía de movimiento del altavoz haciendo que un lateral se mueva de manera diferente al otro. Esto podría ocasionar que las mordazas cedan y el altavoz caiga.

Las soluciones a estos puntos presentados se pueden encontrar aplicando mecanismos de transmisión y distribución de movimiento tal como se explica a continuación:

- Para que el peso de la carga no afecte transversalmente al eje del motor acoplado en directa, la solución es colocar el motor de manera paralela al eje de carga y transmitir el movimiento de un eje a otro mediante engranajes, cadenas, fajas, etc. Esto serviría también para poder alojar el motor sobre una base por debajo del altavoz y aplicar tensiones mediante cadenas.

- Para transmitir correctamente el movimiento del motor y que ambos tramos del eje de carga se muevan de manera sincronizada lo mejor es transmitir el movimiento del eje donde se encuentra el motor a cada extremo de tramo del eje de carga, es decir, el eje nuevo paralelo será un eje de igual longitud que el eje de carga y tendrá en su punto medio una corona helicoidal acoplada a un tornillo sin fin teniendo este como eje al eje del motor B. Este mecanismo es aplicado para mover paneles solares y antenas parabólicas de gran tamaño:



Fig. 3.25: Mecanismo de distribución de movimiento [69]

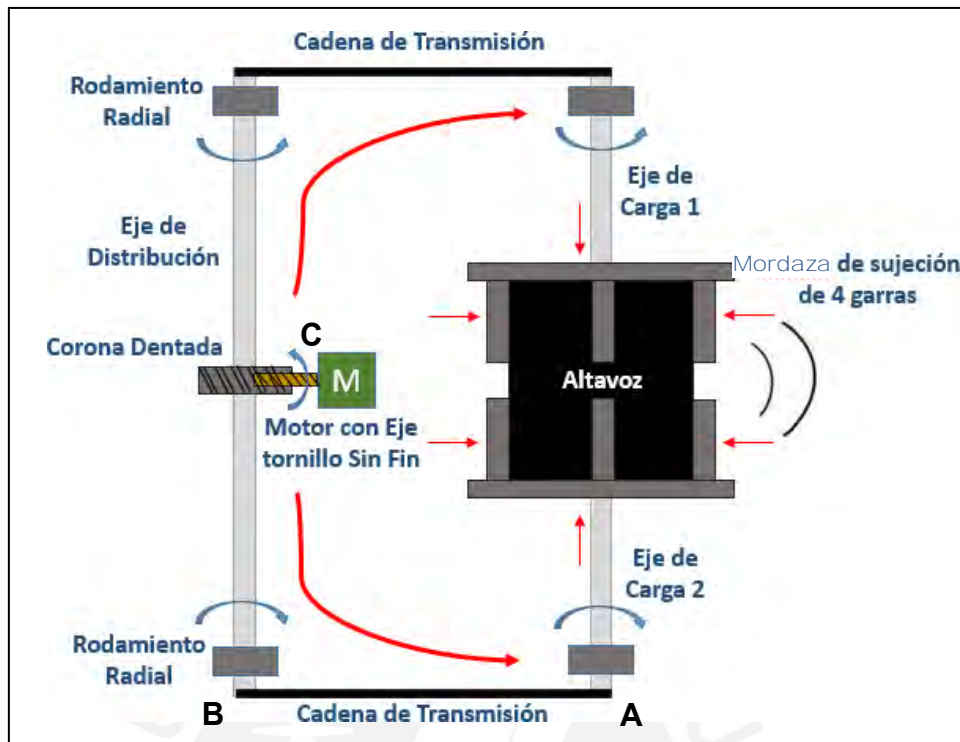


Fig. 3.26: Vista de planta de acople de motor, transmisión y sujeción

En la figura anterior se tiene una vista de planta del sistema mecánico de distribución y transmisión del movimiento desde el motor, en este diagrama se puede apreciar como el eje del motor se acopla a una corona dentada, emulando el diseño del panel solar visto anteriormente, de esa manera el eje de distribución realiza el movimiento que puede transmitirlo mediante las dos cadenas de transmisión en sus extremos de esa manera puede entregar el movimiento de manera uniforme y sincronizada a los dos tramos de eje de carga que sujetan al altavoz.

Transmisión de torque

Para el caso del movimiento azimutal, es importante mencionar que todas las etapas de transmisión de movimiento adicionadas al sistema mecánico ocasionan que el torque que experimenta el motor no sea finalmente el mismo torque que necesita la carga, cada etapa de transformación tiene una relación entre las velocidades y torques de entrada y salida de dicha etapa; con esto, el torque que fue calculado en la sección 3.5.1 para el peso del altavoz en el movimiento azimutal, corresponde al torque en el punto A de la figura 3.26 mas no es el torque que debe ejecutar el motor.

En este punto es conocido el torque debido al peso del altavoz en el punto A (calculado en 3.5.1) el cual es transmitido hasta el eje en el punto B mediante una transmisión por cadena, para este tipo de mecanismo la relación de torque viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{N_B}{N_A}$$

Según esto el torque en B depende de la relación entre los números de dientes en los engranajes de A y B, para el caso implementado $N_A=N_B$, con lo cual $T_A=T_B$.

El eje presentado en B transmite el mismo torque en toda su extensión, este eje está acoplado al eje del motor mediante un mecanismo de transmisión de tornillo sinfín y rueda dentada, siendo C el punto donde se encuentra y experimenta torque el eje del motor, la relación de torques viene dada por:

$$\frac{T_C}{T_{B'}} = \frac{1}{N_{B'}}$$

Donde $T_{B'}$ y $N_{B'}$ son el torque y número de dientes respectivamente de la rueda dentada que está acoplada al tornillo sinfín, mientras que T_C es el torque en el tornillo sinfín en C. Para este caso se ha usado una rueda dentada de 36 dientes con lo cual el torque aplicado en el eje del motor es multiplicado por 36; esto quiere decir que el torque que debe ejercer el motor es:

$$T_C = \frac{T_A}{36}$$

Por otro lado, para el caso del movimiento polar solo existe una transmisión tipo tornillo sinfín y rueda dentada entre el eje del motor y el eje que mueve el disco polar; y al igual que en caso anterior la rueda dentada es de 36 dientes con lo cual el torque que debe ejercer el motor polar es la 36ava parte del torque calculado en 3.5.1 para el movimiento polar.

3.6 Área de programación

La programación es la parte pensante de todo proyecto y que permite implementar la lógica que gobierna tanto la parte mecánica como electrónica, esta lógica se puede implementar en diferentes lenguajes, de alto o bajo nivel, y en diversas plataformas o entornos de programación dependiendo de la aplicación y periféricos que

se deseen manejar. Para el presente trabajo de tesis se realiza una programación de alto nivel basado lenguaje C para el ARDUINO®, de igual manera que para el sincronizador de MATLAB® y, lenguaje gráfico *LabShop* para la programación del analizador PULSE™. A continuación se explica en detalle las diversas lógicas y algoritmos implementados.

3.6.1 Controlador digital (ARDUINO® MEGA2560)

Se trata de un algoritmo de control implementado en lenguaje C para la placa ARDUINO® MEGA 2560. La lógica del controlador está basada en un sistema controlador proporcional de lazo cerrado el cual se encarga de generar la cantidad de pasos en secuencia de tal manera que los motores alcancen la posición deseada, este desplazamiento angular lo realiza de acuerdo a la indicación del sincronizador enviado desde el computador de forma serial.

Tal como se explicó en la sección del diseño mecánico, los motores utilizados para la presente tesis son motores a pasos los cuales necesitan una secuencia de pasos enviados a los hilos del motor. Esta secuencia de pasos se consigue enciendo secuencialmente las bobinas internas del motor a pasos de tal manera que internamente se hace avanzar el vector del campo magnético en sentido horario o anti horario, dependiendo del orden en que se enciendan las bobinas; es decir, secuencia de pasos en directa o reversa. En la presente tesis los motores a pasos seleccionados son del tipo unipolares debido a que las bobinas internas del motor tienen un terminal común, en este caso cada dos bobinas presenta un terminal común como se ve en la siguiente figura:

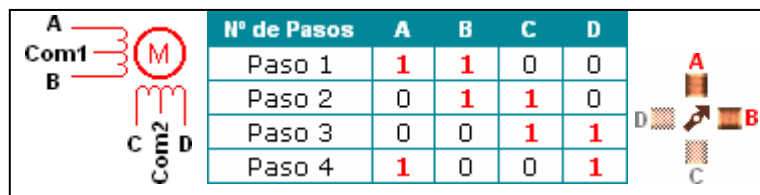


Fig. 3.27: Secuencia de pasos control de motor [66]

Los motores empleados son de 6 hilos, con 2 terminales comunes los cuales son conectados a tierra de tal manera que el control de los pasos se realiza

enciendiendo secuencialmente las bobinas de acuerdo al cuadro presentado en la figura 3.27.

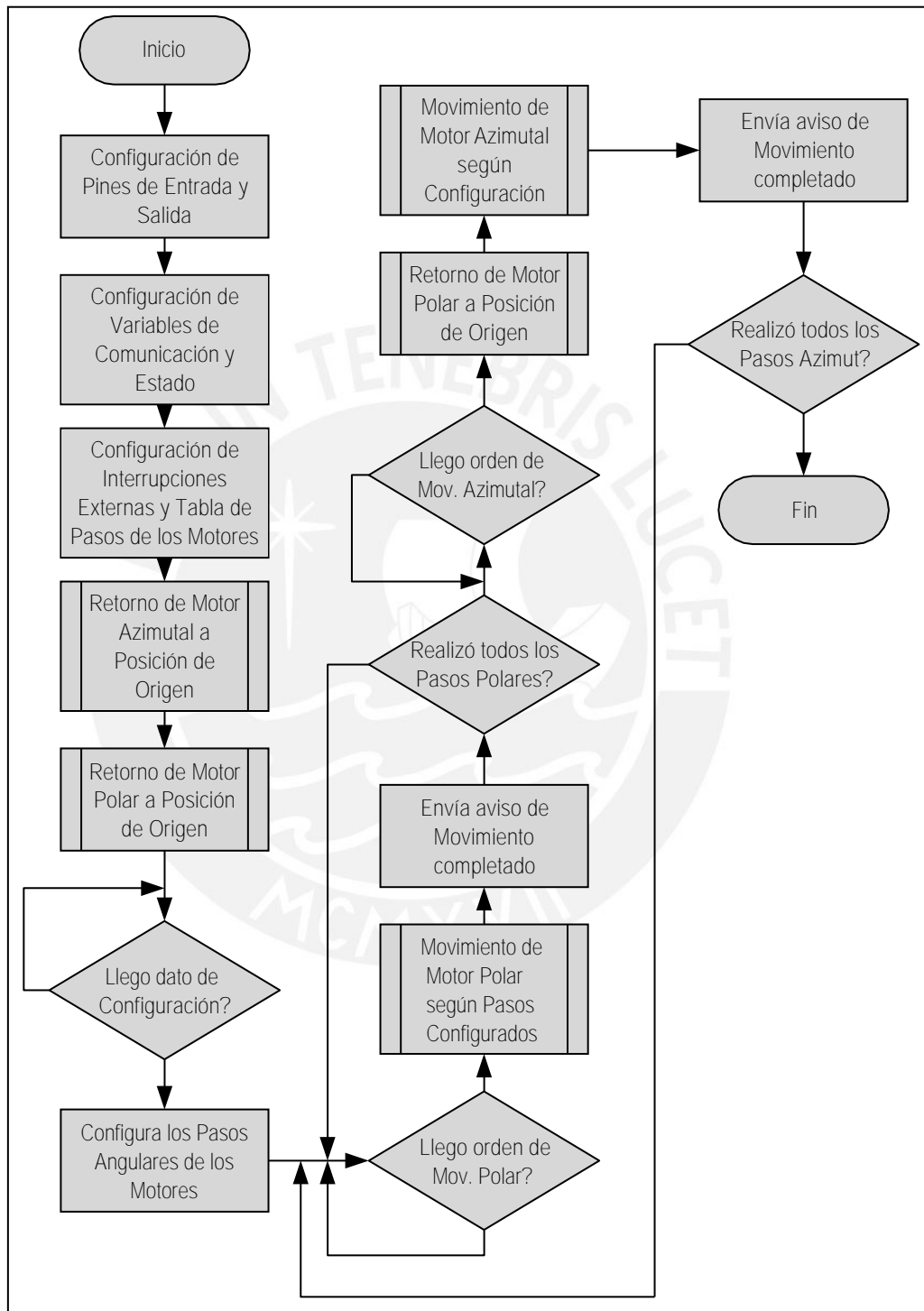


Fig. 3.28 Diagrama de flujo del controlador digital

A continuación se explica paso a paso el algoritmo de control implementado en ARDUINO® MEGA de acuerdo a lo presentado en el diagrama de flujo de la figura 3.29:

- Configuración de los pines de entrada y salida que serán utilizados en la placa del ARDUINO®:

Pines de entrada:

- Sensor de pasos polares: Pin2
- Sensor de pasos azimutales: Pin3
- Pulsador fin de carrera polar: Pin28
- Pulsador fin de carrera azimutal: Pin29

Pines de salida:

- Led rojo: Pin30
 - Led verde: Pin31
 - Bobina 1 motor polar: Pin4
 - Bobina 2 motor polar: Pin5
 - Bobina 3 motor polar: Pin6
 - Bobina 4 motor polar: Pin7
 - Bobina 1 motor azimutal: Pin8
 - Bobina 2 motor azimutal: Pin9
 - Bobina 3 motor azimutal: Pin10
 - Bobina 4 motor azimutal: Pin11
-
- Configuración de variables de estado y de comunicación serial con el computador (MATLAB®)
 - Configuración y habilitación de interrupciones externas por parte de los sensores de pasos angulares
 - En caso no se encuentre en su posición de origen en ϕ , llama a subrutina que realiza el retorno del motor azimutal hasta que se active el pulsador de fin de carrera.

- En caso no se encuentre en su posición de origen en θ , llama a subrutina que realiza el retorno del motor polar hasta que se active el pulsador de fin de carrera.
- Espera a que llegue por serial el dato de configuración de pasos angulares seleccionado por el usuario: 5° , 10° , 15° o 20° .
- Con el dato recibido realiza la configuración de los pasos que deberán realizar los motores cuando se ordenen sus respectivos movimientos.
- Espera la orden con la letra M del sincronizador para realizar el primer movimiento en el eje polar, mientras está a la espera el LED verde está parpadeando.
- Cuando llega el dato esperado realiza un paso angular de acuerdo a la resolución configurada, mientras se mueve mantiene el LED rojo encendido, controla que realice el desplazamiento correctamente aplicando el sistema de control explicado en la figura 3.9 de la sección electrónica.
- Cuando termina el movimiento envía por serial la letra D para avisar al sincronizador que ya termino el movimiento y puede realizar la medición y obtención de datos
- Si aún no completa todos los pasos polares configurados retorna a esperar la llegada de la letra M para realizar un nuevo paso angular.
- Si ya completó todos los pasos polares pasa a esperar la letra M para iniciar el movimiento azimutal. Mientras espera el LED verde se encuentra parpadeando
- Si llega el dato el dato primero realiza el retorno del motor polar al origen es decir mandar a $\theta = 0$.
- Acto seguido procede a realizar el paso angular configurado en el plano azimutal, este movimiento lo realiza de manera análoga al realizado en el movimiento polar.
- Cuando termina el movimiento envía por serial la letra D para avisar al sincronizador que ya termino el movimiento y puede realizar la medición y obtención de datos
- Si aún no completa todos los pasos azimutales configurados retorna a esperar la llegada de la letra M para realizar un nuevo ciclo de pasos polares.
- Si ya completó todos los pasos azimutales se estaciona en un bucle infinito.

3.6.2 Programación BRÜEL & KJÆR PULSE™

Esta sección explica el algoritmo implementado en la plataforma PULSE™ 3560, de la compañía BRÜEL & KJÆR que hace posible la medición acústica del sistema mediante la generación de la señal de excitación, la captura de la respuesta del parlante ante dicha señal y el procesamiento de la información, obteniendo así el comportamiento espectral del altavoz. Antes de entrar en detalle a la programación implementada, se explicará la arquitectura y funcionamiento del PULSE™ y el entorno de programación *LabShop*.

Como se revisó en el capítulo 2, PULSE™ es una plataforma de medición desarrollada por la compañía BRÜEL & KJÆR para el análisis del sonido y vibraciones orientada a tareas. Esta plataforma consiste de un programa PULSE™ *LabShop*, una computadora con interface de red LAN para la comunicación externa y un hardware terminal (*Front-End*) de adquisición de datos LAN XI 3050. Entre las principales características se encuentran [37]:

- 6 canales de entrada analógica y 2 canales de salida de hasta 51.2 KHz
- Frecuencia de muestreo de hasta 131 k-muestras/s .
- Entradas y salidas con ADC de 24 bits.
- Filtros *anti-aliasing*.
- Ancho de banda total desde DC hasta 51.2 KHz
- Rangos de voltaje de E/S de hasta 10 V_{pp}

El programa encargado del control de la plataforma de adquisición de datos PULSE™ es el *LabShop*; es sobre este sistema que se configuran los generadores, analizadores, equipos periféricos y visualizadores gráficos que se utilizarán. Para la presente tesis se implementará una medición basada en la respuesta impulsiva del sistema: se envía un tren de 10 impulsos y se obtiene la respuesta promedio, a dicha respuesta se le aplica un desplazamiento temporal para compensar el tiempo de arribo del frente de onda al micrófono, luego es enventanada en el tiempo para aislar la respuesta deseada de las reflexiones y finalmente se realiza una correlación entre la señal medida y la señal original y obtenemos así el H1 o función de transferencia del sistema altavoz, dicha función de transferencia espectral es la que nos interesa.

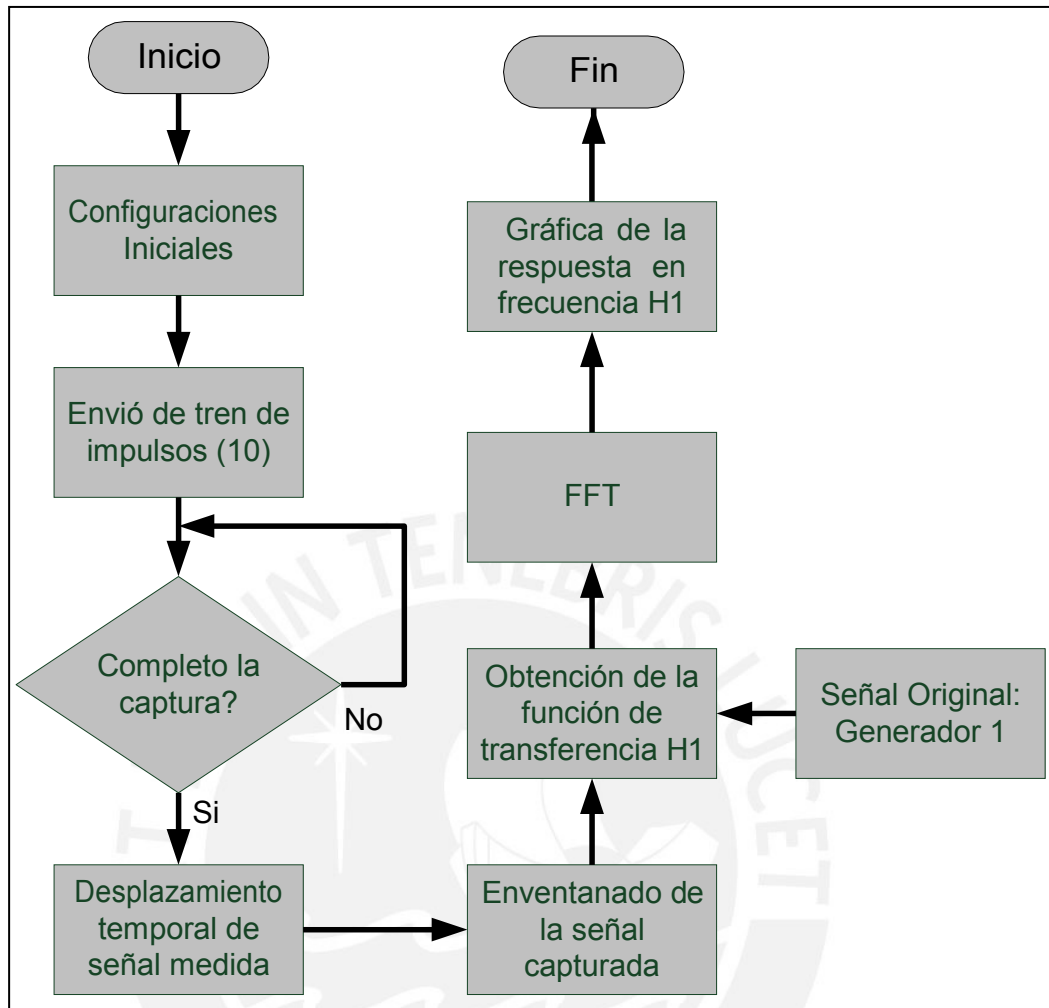


Fig. 3.29 Diagrama de flujo del BRÜEL & KJÆR PULSE™

- **Organizador de configuración:**

Es el organizador sobre el que se configuran las entradas y salidas del sistema, definiendo los transductores y micrófonos que se usaran como entrada y el canal por donde se enviará la señal generada. Adicionalmente se puede organizar la sensibilidad, el rango dinámico del canal, entre otros parámetros. Se configura como parámetro de entrada en Input 1 un micrófono BRÜEL & KJÆR 4189 con una trama de adquisición de datos inteligente (IDA) tipo 3560c para captar la respuesta del altavoz, y como un Input 2 el pulso que proviene como realimentación del Output 2 para ser comparado con la señal captada por el micrófono, realizar así la correlación y obtener la función de transferencia. La salida del Output 2 también es enviada al amplificador del altavoz.

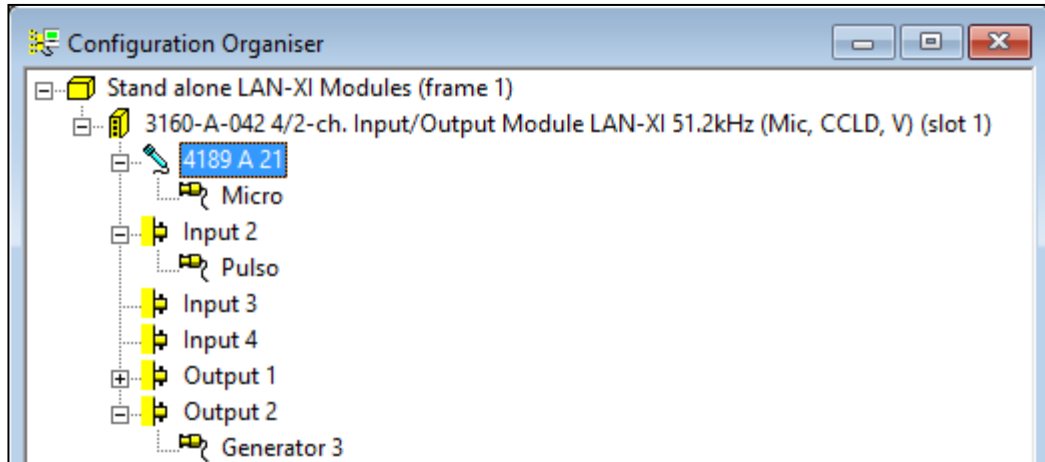


Fig. 3.30 Ventana de configuración

- **Organizador de medida:**

Configura los tipos señales de entrada y de salida en grupos de trabajo, en este entorno se crean los diferentes analizadores que procesarán las señales recibidas por los transductores, por ejemplo analizadores FFT, SSR o TDS configurando sus respectivos parámetros; y también se crean los generadores de señal para excitar el sistema acústico. En este caso se usa un análisis basado en respuesta impulsiva para lo cual se genera una señal tren de impulsos (10 pulsos) y un analizador FFT.

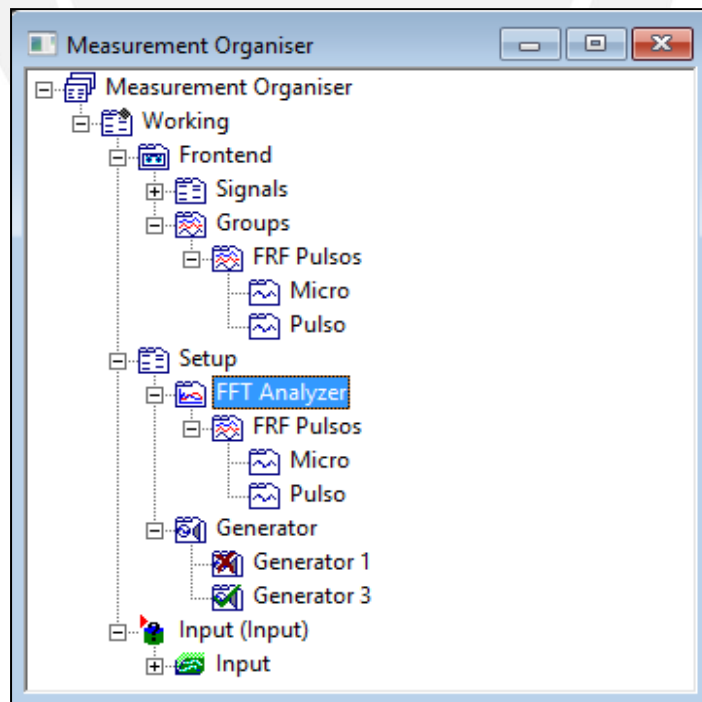


Fig. 3.31 Organizador de medición

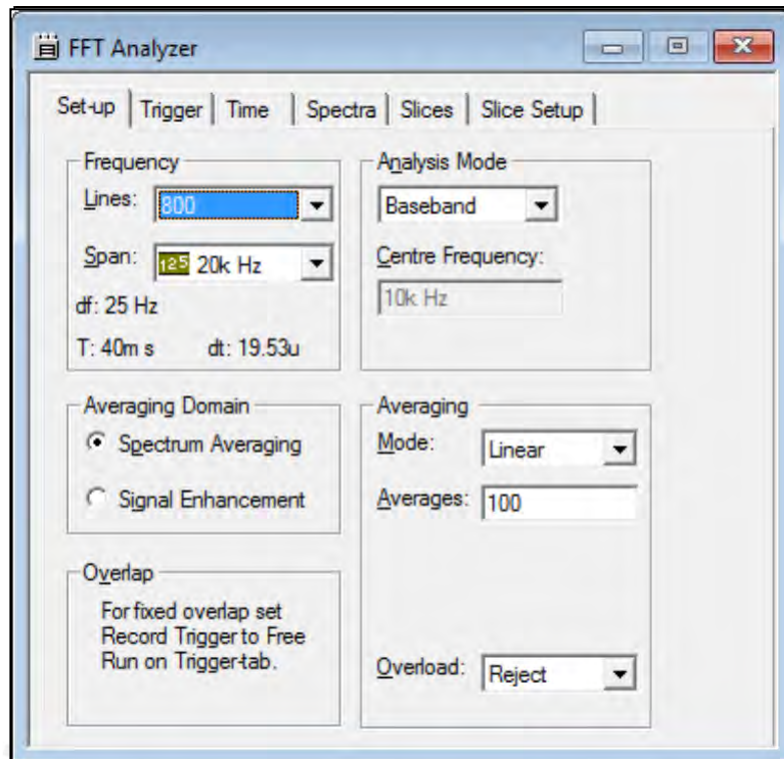


Fig. 3.32 Pantalla de configuración del analizador FFT

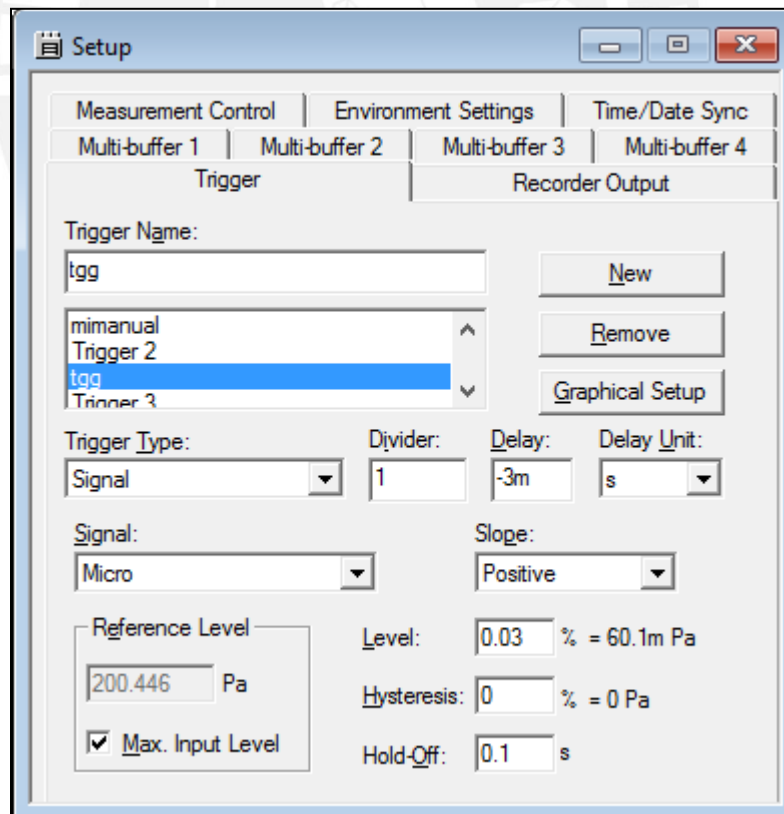


Fig. 3.33 Pantalla de configuración del disparador

Con el objetivo de evitar falsas capturas y que se filtre el ruido de fondo del recinto, configuramos un disparador (*trigger*) que filtrara los impulsos que son de interés dejando fuera el ruido de fondo de bajo nivel (Fig. 3.33). Este disparador activa o “dispara” la medición cuando el nivel captado supera al valor umbral definido en dicho disparador. Esta herramienta resulta siendo muy importante para un análisis de respuesta impulsiva ya que la medición la estamos realizando en un cuarto que presenta un nivel de ruido de fondo que se puede montar a la medición realizada. Usaremos un disparador de $0.03\% = 60.1 \text{ mPa}$.

Finalmente para tener una medición de calidad y obtener una función de transferencia H1 que nos permita caracterizar correctamente el parlante, aplicamos un desplazamiento temporal (*time delay*) a la señal de entrada en el micrófono para compensar el tiempo de arribo del frente de onda desde el parlante hasta el receptor, este tiempo es de 3 ms aproximadamente. A continuación la ventana donde configuramos el desplazamiento:

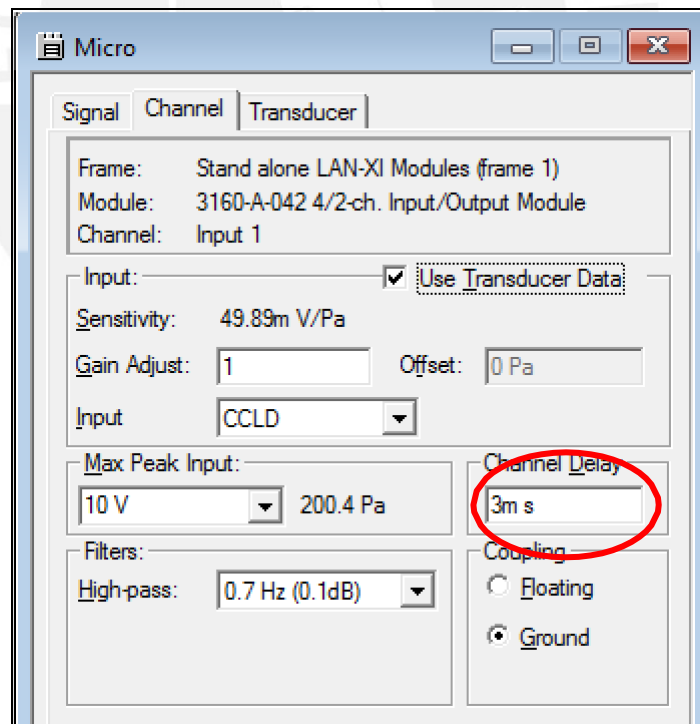


Fig. 3.34 Pantalla de configuración del desplazamiento en el micro

- **Organizador de funciones:**

En esta sección se definen los tipos de cálculos matemáticos que deberán realizar los analizadores como por ejemplo correlación o el auto espectro. Para el presente objeto de estudio se configuran las que están relacionadas en un mismo grupo de trabajo tales como la señal en el tiempo del micrófono y del generador, el auto espectro del micro, la señal en el tiempo de la ventana temporal (*Time Weighting*), y el H1 de la respuesta en frecuencia. En conclusión este organizador nos permite agrupar las funciones ya creadas y asociarlas para así analizar sus gráficas y compararlas entre sí.

También se configura la ventana temporal la cual es una ventana transitoria que inicia en 5 ms y tiene un ancho total de 2 ms , con un tiempo de subida de 200 us y de bajada de 1 ms . Esta ventana nos permite filtrar el frente de onda que nos importa de la reverberación del recinto no anecoico. La figura 3.35 nos presenta los parámetros usados para la configuración de este post procesamiento.

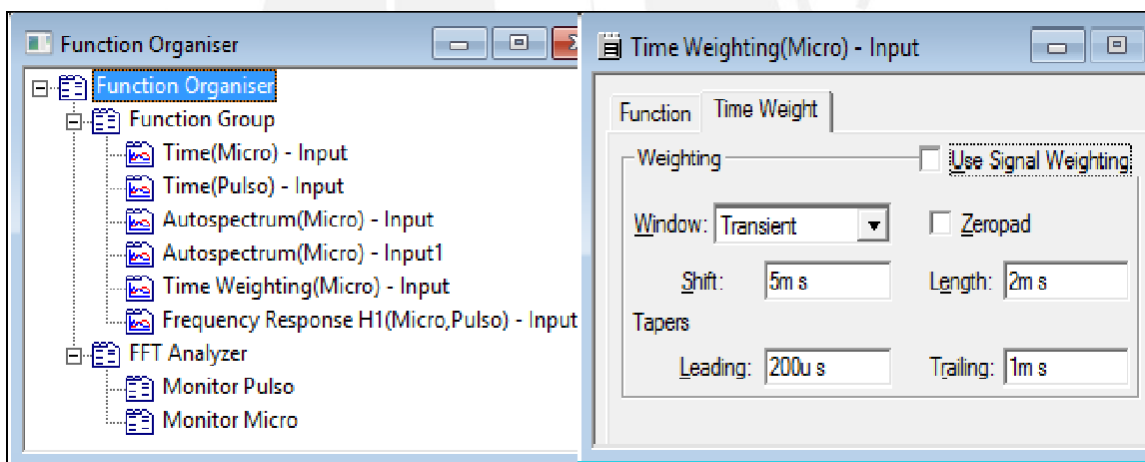


Fig. 3.35 Ventana de organizador de funciones

- **Organizador de visualización**

Esta sección permite configurar los visualizadores de los resultados, mediante este organizador se preparan las ventanas donde podremos analizar la señal que llega al micrófono, la que sale del generador y una tercera ventana de la función de transferencia H1. También se configuran parámetros tales como detalles de origen,

escalas de medición, tamaño de grilla, entre otros. Para el presente trabajo utilizaremos 3 ventanas principales.

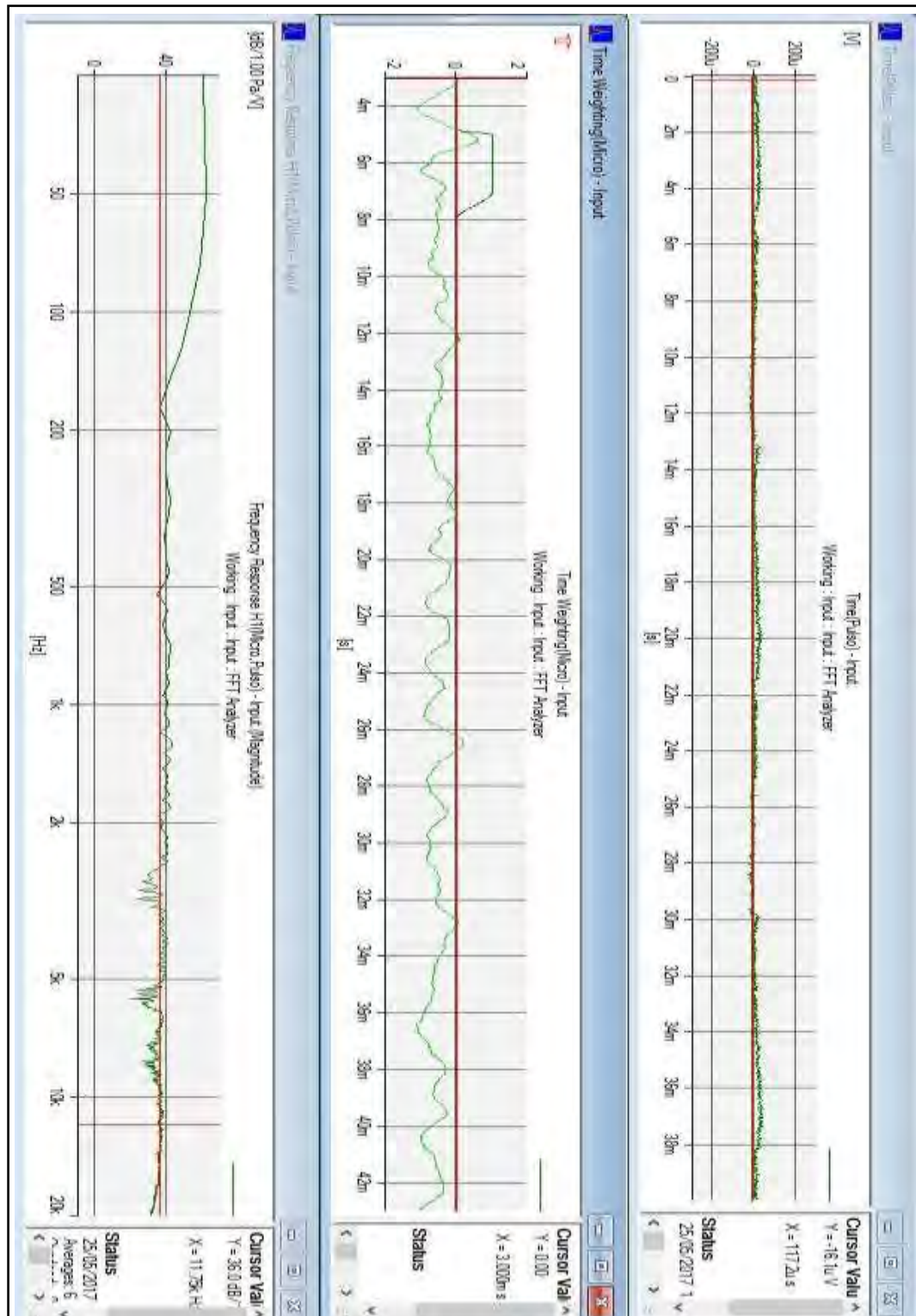


Fig. 3.36 Ventana de organizador de visualizadores

3.6.3 Sincronización MATLAB®

En las secciones anteriores se ha podido ver los algoritmos y configuraciones que gobiernan tanto el control de los actuadores con el ARDUINO® y el sistema de control, así como la medición de la respuesta en frecuencia del altavoz en el PULSE™ LabShop, ambos sistemas son programas independientes, con funciones diferentes pero complementarias para el objetivo común de obtener el patrón de radiación en coordenadas esféricas. Es en este punto que el algoritmo implementado en el entorno MATLAB® cobra su mayor relevancia pues es el sincronizador y principal artífice de la automatización del proceso

El objetivo principal del sincronizador MATLAB® es automatizar el proceso de obtención del patrón de radiación, estableciendo un orden secuencial entre los procesos de medición de la respuesta en frecuencia del PULSE™ y el posicionamiento angular en coordenadas esféricas del altavoz. Para lograr la comunicación con cada uno de ellos el sincronizador se vale de dos protocolos o tecnologías de comunicación: el “apretón de manos” (*handshaking*) de comunicación USB-TTL con el posicionador y el OLE 2.0 para la comunicación con el PULSE™ LabShop, estos puntos serán revisados posteriormente. La figura 3.38 presenta un esquema de funcionamiento y comunicación del sincronizador

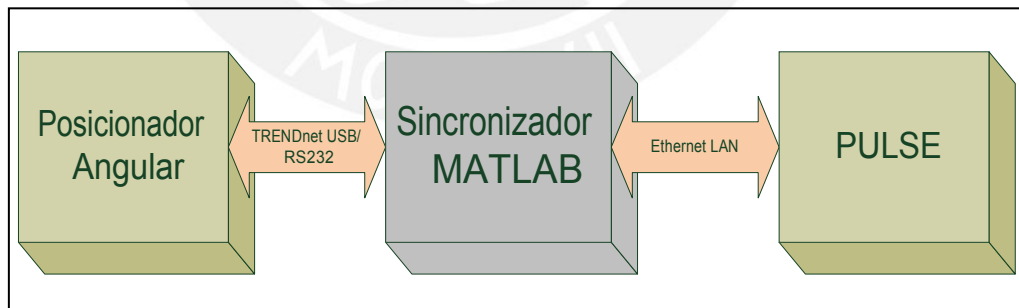


Fig. 3.37 Esquema de comunicación del sincronizador MATLAB®

Cabe aclarar que el sincronizador es presentado como parte de una interface gráfica desarrollada en el entorno GUI del MATLAB®, donde además se encuentra otras opciones de configuración de la medición del patrón de radiación que fácilmente

el operario podrá manejarlas, esto se revisará en detalle en el punto 3.6.4. La lógica del programa implementado se explica en detalle a continuación.

- Se genera la matriz de almacenamiento de la respuesta medida para cada posición según la configuración de pasos angulares (5° según norma AES)
- Se toma control del analizador FFT del *LabShop* para posteriormente analizar el estado de la medición.
- Envía la orden al *LabShop* para que emita el tren de impulsos a partir de los cuales se obtendrá el promedio de la respuesta impulsiva.
- Monitorea la variable '*Analyzer State*' que indica el estado de la medición.
- Cuando ya obtuvo la respuesta impulsiva, envía la orden para que detenga la medición y se acceda a los datos obtenidos de la misma.
- Se obtiene la información y se almacena en la matriz creada.
- En este momento se inicia el bucle de sincronización que se encarga de enviar la orden de movimiento al ARDUINO®, esperar a que el protocolo "apretón de manos" confirme que finalizó el posicionamiento angular y finalmente ordenar al PULSE™ que realice nuevamente la medición de la respuesta impulsiva.
- Este bucle de sincronización se repite tantas veces como lo indique el desplazamiento angular pre-configurado de cada paso hasta completar 180°
- Luego de finalizado este procedimiento se tiene almacenado en la variable 'Medición' todos los valores de magnitud para posteriormente graficar el patrón de radiación. Este último paso lo realiza la interface gráfica GUI.

La figura 3.38 presenta el diagrama de flujo explicado del algoritmo del sincronizador.

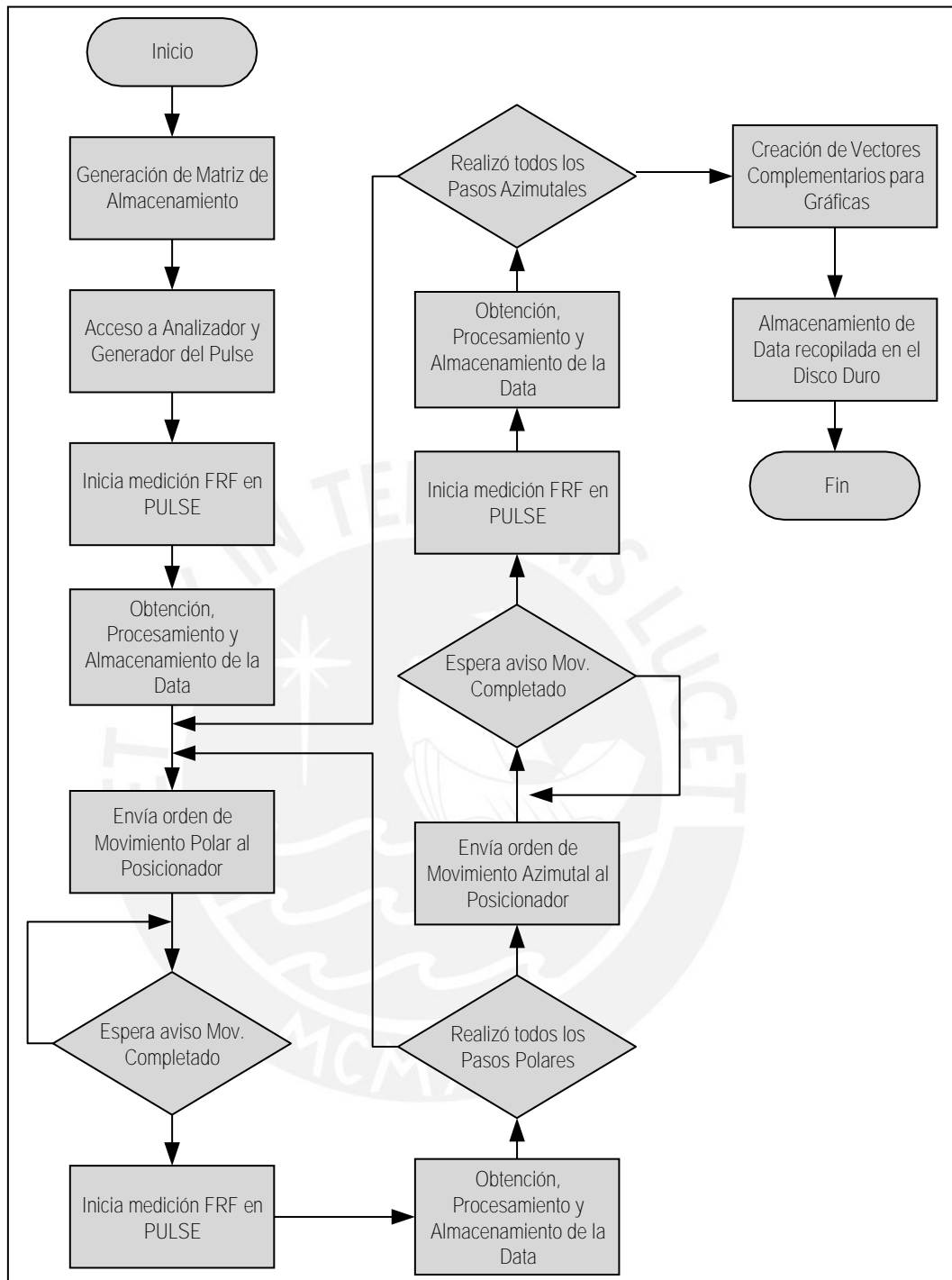


Fig. 3.38 Diagrama de flujo del sincronizador

3.6.4 Graficador de los patrones de radiación y polar

En este punto se explicará el procedimiento y algoritmo empleado para graficar el patrón de radiación y patrón polar para todo el espectro de frecuencias en que es medida la respuesta del altavoz; para esto primero debemos explicar los conceptos básicos de cómo es que se compone espacialmente el patrón de radiación

En primer lugar, como se ha visto en el capítulo 2, existen diferentes opciones y configuraciones mecánicas para el posicionamiento angular, cada cual con sus pros, contras y generando diferentes arreglos de datos; esta información es fundamental al momento de procesar la data pues el asignar coordenadas erróneas a los datos recopilados haría que la gráfica final sea totalmente falsa. Para este análisis centrémonos tan solo en el posicionamiento azimutal, en cómo es el desplazamiento angular en Φ para dos casos puntuales: micrófono rotatorio y altavoz rotatorio.

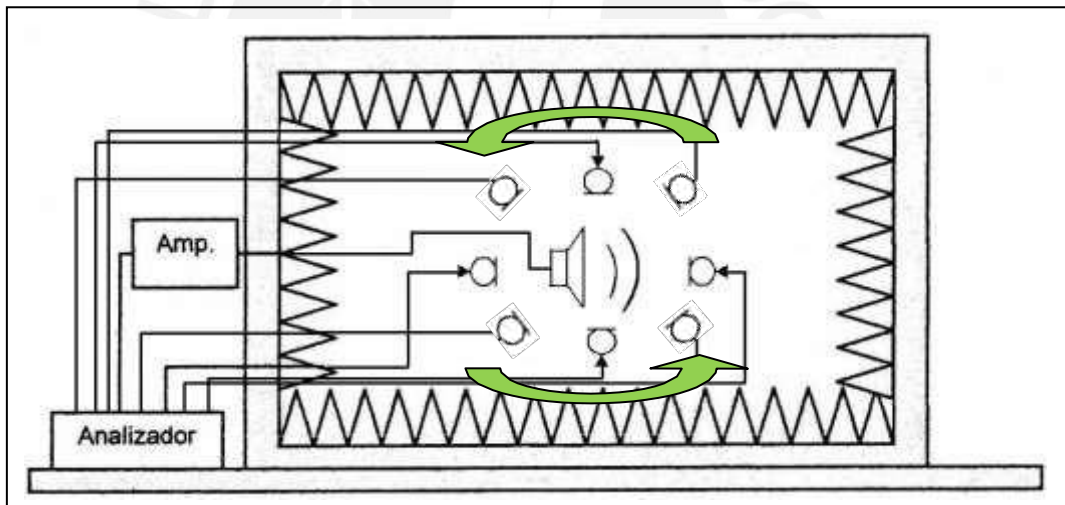


Fig. 3.39 Configuración de micrófono rotatorio

En el esquema presentado en la figura 3.39 se puede apreciar cómo es el desplazamiento angular Φ para el micrófono rotatorio, para cada estadio angular del micrófono el altavoz realiza un ciclo polar en θ , esto se hace manteniendo la lógica antes expuesta para barrer así todas las coordenadas esféricas, cada uno de estos ciclos polares recopila datos para cada posición en Φ , generando gráficas de la siguiente forma:

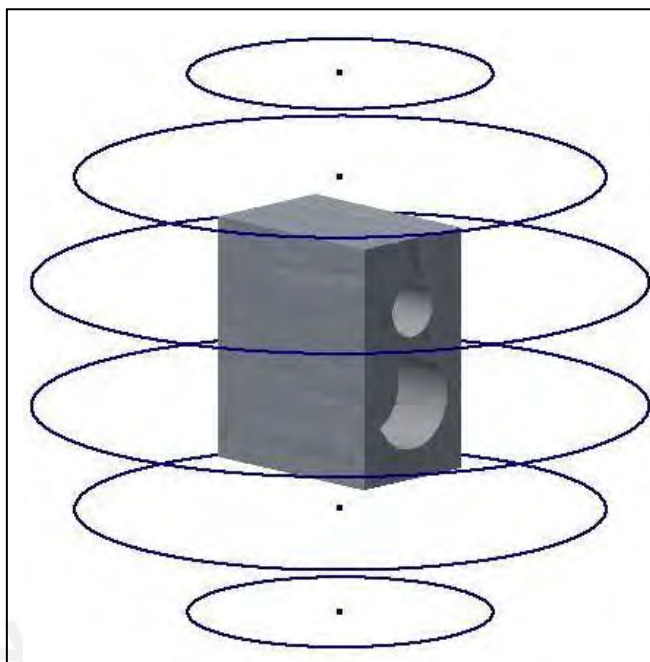


Fig. 3.40 Trayectoria de datos – posicionamiento micrófono rotativo

En la figura anterior se puede ver cuál es la secuencia que toman los datos registrados mediante el método de posicionamiento por micrófono rotativo; cada anillo de la gráfica representa los datos tomados en un barrido en el plano polar θ manteniendo una elevación angular o posición azimutal Φ constante; la cantidad de anillos depende directamente de la resolución en pasos angulares Φ con que se haga la medición. La principal ventaja de esta forma en que se presentan los datos es que para cada anillo todos los datos tienen la misma posición azimutal Φ pues el altavoz se mantiene sin rotar mientras que el micrófono orbita en paralelos alrededor de la fuente; como se ha visto en el capítulo 2 esta configuración tiene la desventaja que mecánicamente el posicionamiento del micrófono es más complejo que en el método del altavoz rotativo.

Para el caso desarrollado en esta tesis, usando el altavoz rotativo, el micrófono se mantiene estático mientras que el altavoz es rotado verticalmente en pasos azimutales, y al igual que en el caso anterior para cada ángulo azimutal Φ se realiza un barrido polar θ manteniendo constante la elevación azimutal del altavoz, sin embargo esta forma de posicionamiento angular genera un recorrido de datos totalmente diferente al presentado en la figura 3.40, analizamos a continuación:

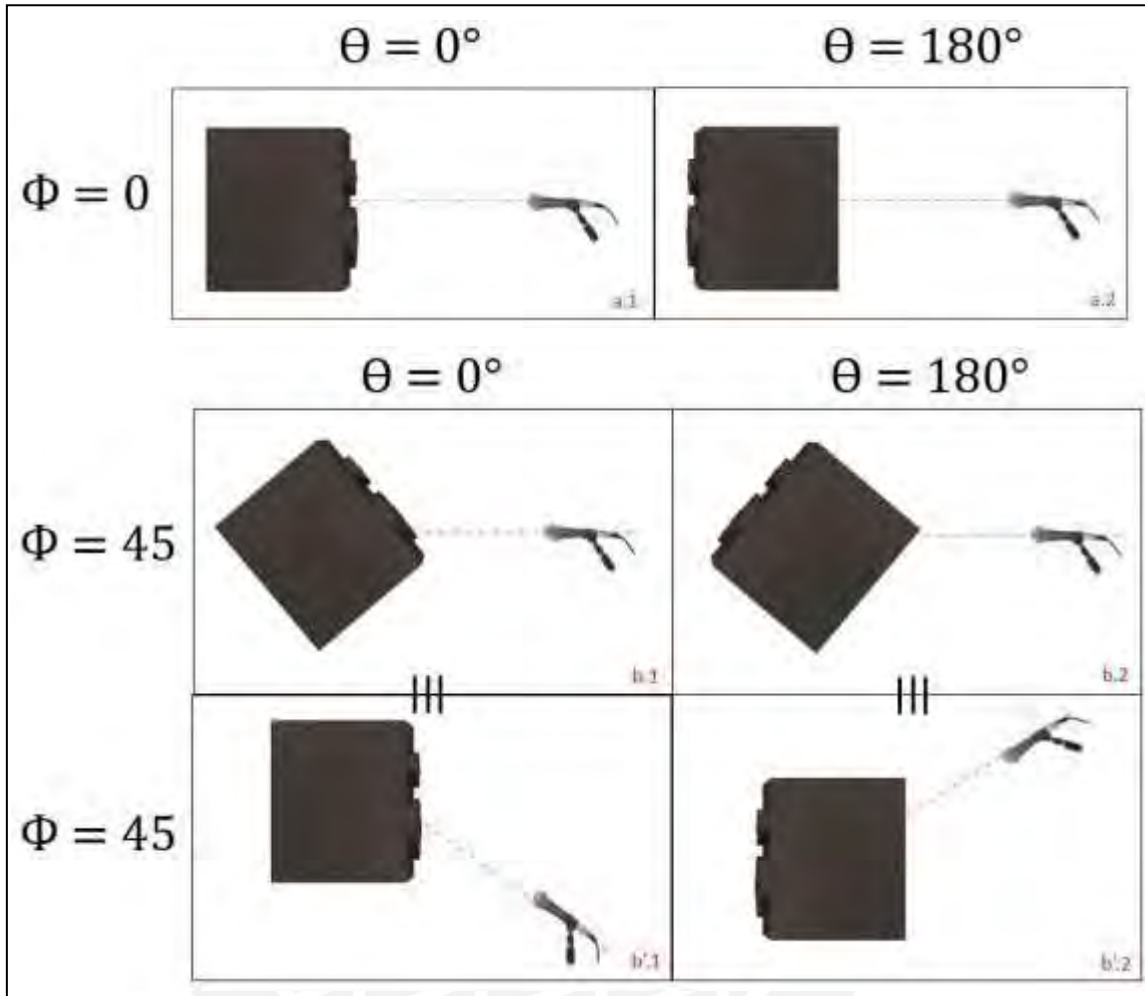


Fig. 3.41 Análisis de la trayectoria de medición

Según se puede ver en el esquema presentado, cuando el ángulo de elevación azimutal es de $\Phi = 0^\circ$ las condiciones y trayectoria de datos se mantiene de la misma manera que en la configuración de micrófono rotatorio, formando anillos paralelos; sin embargo, cuando el valor del ángulo azimutal es $\Phi \neq 0^\circ$ la trayectoria de datos para cada barrido polar termina siendo un anillo alojado en un plano oblicuo rotado acimutalmente en dicho ángulo Φ teniendo como eje de rotación el eje X cartesiano, esto se puede evidenciar en la figura anterior para el caso de $\Phi = 45^\circ$ donde para un valor inicial de $\theta = 0^\circ$ es posible afirmar que el micrófono está apuntando virtualmente al vértice inferior frontal del altavoz (b'.1 equivalente a b.1) y cuando ha completado media vuelta polar de $\theta = 180^\circ$ el micrófono está ahora apuntando al vértice superior posterior del altavoz, lo cual nos habla de que el micrófono ha pasado de estar inicialmente apuntando la parte inferior de la fuente a apuntar la parte superior de la

misma; por lo tanto se puede deducir que en cada paso polar (en su barrido de 0° a 180°) el micrófono virtualmente ha ido ascendiendo gradualmente siguiendo el plano imaginario oblicuo descrito por la línea punteada roja en la figura 3.41. Finalmente de acuerdo a este análisis, la trayectoria de datos en cada anillo de barrido polar para cada posición azimutal será de la siguiente manera:

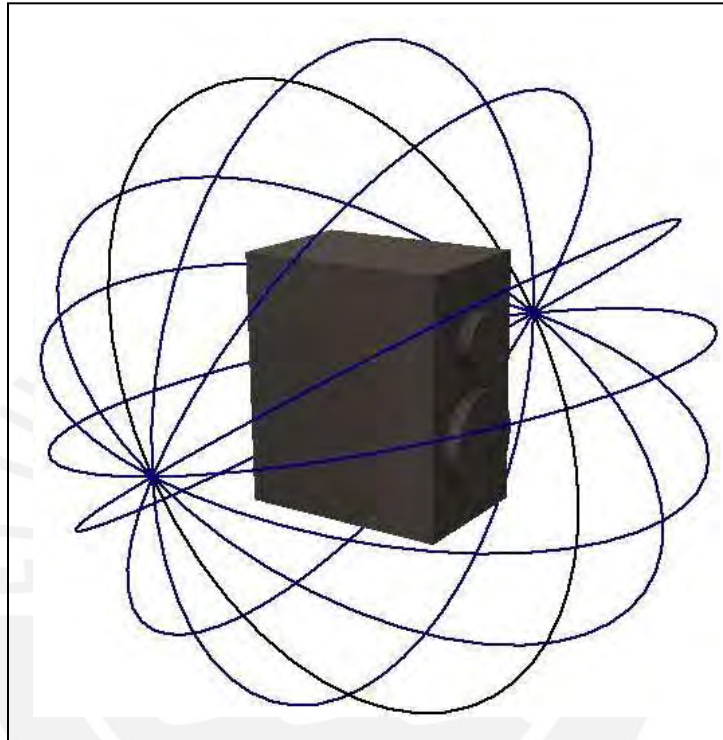


Fig. 3.42 Trayectoria de datos – Posicionamiento de altavoz rotativo

De lo presentado en la figura anterior se puede ver que bajo esta configuración de posicionamiento angular las trayectorias de los datos tomados se presentan en una forma similar a la de las órbitas de los electrones en un átomo, y en la medida que el desplazamiento angular azimutal Φ sea más reducido tendremos un número mayor de estos anillos, semejantes a órbitas, que formarán el patrón de radiación de la fuente.

Un factor fundamental a tomar en cuenta de este análisis realizado es que, para cada ángulo de elevación Φ del altavoz (plano con elevación Φ), los datos tomados en su correspondiente barrido polar no tienen por coordenada azimutal el mismo valor de Φ debido a que, como se explicó antes, los datos se presentan en órbitas oblicuas

donde el valor de Φ varía de manera constante; se debe tener un algoritmo que permita conocer la coordenada Φ para cada dato.

- **Almacenaje de la data**

Para este almacenaje de datos se crea una matriz denominada “*medición*”, la cual es una tridimensional compuesta por: el rango de valores de frecuencias en que se mide la respuesta al impulso del altavoz, el rango de valores de pasos polares θ y el rango de valores de pasos azimutales Φ ; para el caso de las frecuencias estas van desde 25 hasta 20 kHz lo cual equivale a 801 puntos muestreados, mientras que para los pasos angulares estos van desde 0 a 2π en intervalos definidos por el usuario, pudiendo ser estos de 5, 10, 15 y 20 grados. El siguiente esquema muestra cómo es la estructura de la matriz *medición*:

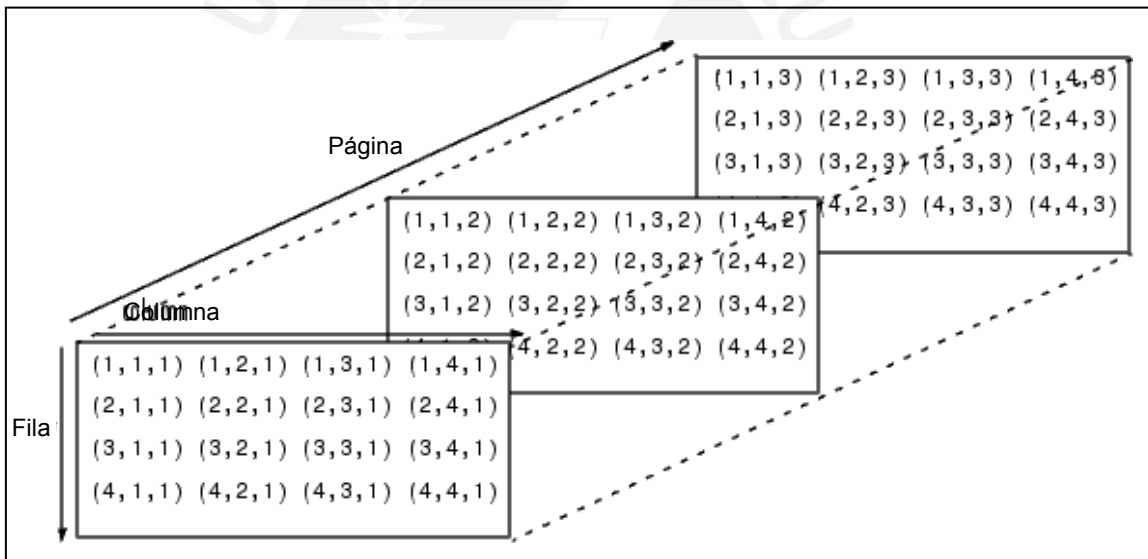


Fig. 3.43 Estructura de matriz medición [70]

Según se puede ver en la imagen 3.43 la matriz *Fila x Columna* se repite tantas veces como *Páginas* hayan; para nuestro caso estas son Frecuencias (801), θ y Φ respectivamente. Para cada valor de Φ la matriz de *Frecuencias x θ* tiene la siguiente estructura.

| | | | | | |
|-----------------|---|---|-------|-----|-----|
| frec \ θ | 0 | 5 | | 355 | 360 |
| 25 | | | | | |
| 50 | | | | | |
| | | | | | |
| 19975 | | | | | |
| 20000 | | | | | |

Fig. 3.44 Matriz de almacenamiento para cada ángulo Φ

De acuerdo a lo presentado en la figura anterior, en esta matriz se almacena de manera vertical (cuadrado rojo) cada medición obtenida de la respuesta al impulso en cada posición de θ y manteniendo el Φ constante. Por un principio de simetría geométrica del altavoz, el cuadrado rojo de la izquierda debe ser también ingresado en el último cuadrado de la mano derecha de tal manera que cada medición realizada en cada posición de θ debe ingresar datos tanto en la parte izquierda como derecha avanzando de afuera hacia adentro.

- **Creación de variables auxiliares**

Con la medición ya terminada en todos los puntos circundantes y la data almacenada tal como hemos visto en el punto anterior, corresponde desarrollar el algoritmo para graficar tanto el plano polar bidimensional así como el patrón de radiación en 3 dimensiones. Para poder desarrollar estas gráficas no basta con la data almacenada, la información debe estar acompañada de su ubicación en coordenadas esféricas, recordando que dichas coordenadas están compuestas por θ , Φ y r ; de las cuales en este punto ya contamos con los radios medidos y faltaría estructurar las coordenadas θ , Φ en las que corresponde cada valor medido y almacenado. A continuación presentamos los vectores auxiliares que servirán para el algoritmo.

$$Theta = [0 : \Delta\theta : 2\pi]$$

En pasos angulares definidos por el usuario.

$$Phi = [0 a 0]$$

Matriz de ceros de la misma dimensión que Theta

$$\text{Ángulos} = [0 : \Delta : \pi : \Delta : 0]$$

En pasos angulares definidos por cada tramo

Como se puede ver los vectores donde originalmente debería presentarse los estadíos o pasos angulares azimutales (Φ) solo se muestra un vector de ceros, esto debido a que los datos se presentan en órbitas oblicuas con valores de Φ variables durante todo el barrido polar θ por lo que los valores reales de las coordenadas azimutales se obtendrán usando un artificio con coordenadas cartesianas, para estos fines es necesario tener un vector inicial de $\Phi = 0$ con el mismo tamaño que Θ y Ángulos . El vector Ángulos tiene los valores de elevación y estadíos angulares azimutales y será usado como una herramienta para conseguir las coordenadas reales en el artificio antes mencionado. Con los vectores presentados se elaboran matrices con las mismas dimensiones que la matriz *medición*.

- **Obtención del índice de la matriz *medición***

La interface gráfica diseñada, que se explicará en el punto 3.6.5, tiene entre sus opciones un menú desplegable donde el usuario puede escoger en qué frecuencia desea visualizar el patrón de radiación y la respuesta polar, esta selección del usuario modifica en el programa el valor de un puntero que indica qué datos extraer de la matriz tridimensional *medición*. Finalizada esta selección por el usuario el puntero *Hertz* contendrá el número de fila al cual se debe apuntar en la matriz *medición*.

- **Retiro de datos de la matriz *medición***

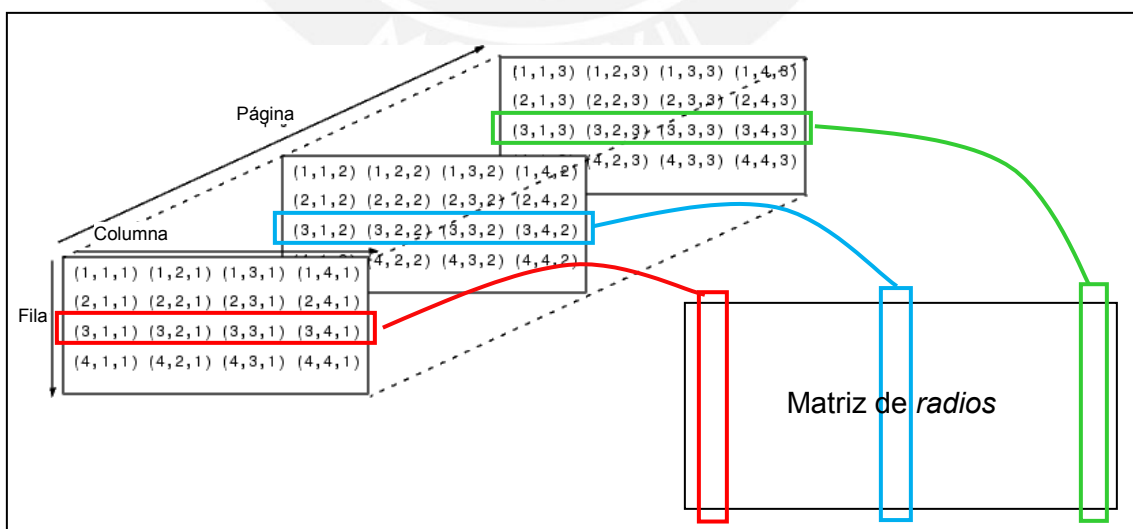


Fig. 3.45 Extracción de datos para formar la matriz Radios

Utilizando el puntero en la variable *Hertz* podemos extraer los datos de la matriz tridimensional *medición* y formar así la matriz *Radios* en donde se encontrará todos los datos de interés para graficar el patrón de radiación para la frecuencia seleccionada. Como se puede ver en la figura 3.45 el puntero *Hertz* indica que fila extraer para cada valor de Φ , con lo cual se tendría cada vector con datos tomados de barridos polares los cuales ingresan de manera vertical a la matriz *Radios*, dicha matriz almacenará los valores de los radios para cada posición esférica (θ, Φ) .

- **Normalización de los datos en *Radios***

De todos los datos presentados en la matriz *Radios* se obtiene el valor más alto el cual se usará como divisor de todos los datos almacenados en dicha matriz, quedando así todos los valores normalizados al valor máximo

- **Gráfica del patrón polar bidimensional**

En primer lugar es necesario tener un vector de referencia angular sobre el cual se plasmen los datos que se quieren graficar, este vector será: $Ang = [0 : \Delta\theta : 2\pi]$. Como resultado se presentan 2 gráficas polares, una en el plano *XY* que se grafica usando todos los valores para $\Phi = 0$ y otra en el plano *XZ* que es para todos los valores cuando $\theta = 0$; estos vectores se extraen de la matriz *Radios* pues como se sabe en esta matriz se almacenan los valores normalizados para todas las coordenadas (θ, Φ) .

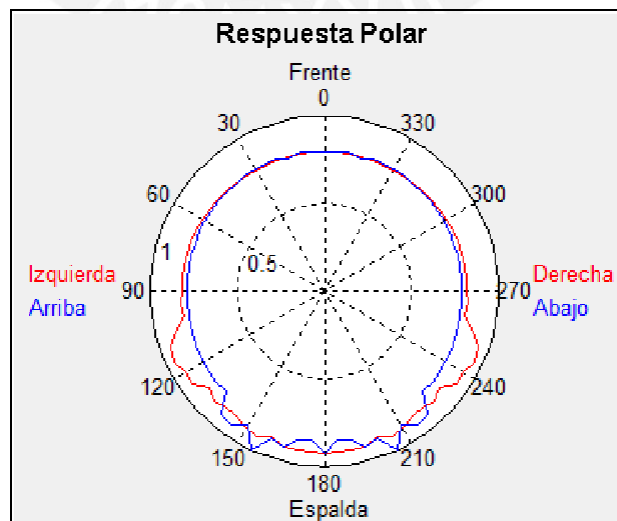


Fig. 3.46 Respuesta polar en horizontal y vertical

- **Gráfica del patrón de radiación tridimensional**

Para poder graficar el patrón de radiación se necesita la información de los radios o valores de presión sonora medidos y las coordenadas esféricas en que fueron tomados dichos valores, es decir en (θ, Φ) ; sin embargo, de acuerdo a lo expuesto en los puntos anteriores se sabe que la trayectoria de los datos describen órbitas oblicuas (figura 3.42) por lo que para cada elevación Φ del altavoz no se tiene la misma coordenada azimutal en cada barrido polar θ , en resumen esto implica que los valores de cada columna de la matriz *Radios* no corresponden a un mismo valor de coordenada azimutal Φ sino que esta es una función de θ , describiendo una órbita oblicua.

| $\theta \backslash \Phi$ | 0 | 5 | | 180 | | 5 | 0 |
|--------------------------|---|---|------|-----|------|---|---|
| 0 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 355 | | | | | | | |
| 360 | | | | | | | |

Fig. 3.47 Matriz de radios con sus posiciones (θ, Φ)

Como se puede apreciar en la figura anterior la matriz de *Radios* en teoría debería tener un único valor de Φ para cada columna, por ejemplo la primera columna nos muestra todos los valores de un barrido polar (θ de 0° a 360°) manteniendo un valor de $\Phi = 0^\circ$, para este caso particular si se cumple esta afirmación sin embargo para las siguientes columnas esto ya no es así, tal como se pudo analizar en la figura 3.39, ahora corresponde tener los valores reales de Φ aunque quizás en otro sistema de coordenadas.

En la figura 3.48 se presenta un diagrama que explica a detalle el problema antes mencionado de la variabilidad del ángulo Φ para las trayectorias de tipo órbitas oblicuas, para el caso del punto 1 su coordenada Φ coincide con el ángulo de elevación del plano (ángulo de elevación del altavoz) esto debido a que la recta que une el origen O con dicho punto es paralelo al plano mismo, esto se cumple para $\theta = 0^\circ$; sin embargo, si variamos el ángulo θ como en el caso 2, la recta R que une el

origen O con el punto 2 ya no es paralelo al plano la coordenada Φ de este punto ya no es igual al ángulo de elevación del plano, esto se cumple para cualquier punto tomado en la curva con coordenada $\theta \neq 0^\circ$. La solución es obtener las coordenadas del punto a partir de rectas paralelas al plano, ya que estas rectas si mantienen el mismo ángulo de elevación, tal es el caso de la recta N que va desde el eje hasta el punto 2 donde las coordenadas de dicho punto pueden ser expresadas en cartesianas de tal manera que:

$$X = N \cdot \cos(35^\circ)$$

$$Z = N \cdot \sin(35^\circ)$$

En este caso los ángulos polares son conocidos, si consideramos que la coordenada Φ de todos los puntos es 0 entonces se podría decir que todos los anillos oblicuos estarían sobre el plano XY y se podría aplicar una transformación de coordenadas esféricas a cartesianas, obteniendo $X = R \cdot \cos(\theta)$, $Y = R \cdot \sin(\theta)$ y $Z = 0$ según:

$$X = R \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\Phi)$$

$$Y = R \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\Phi)$$

$$Z = R \cdot \sin(\Phi)$$

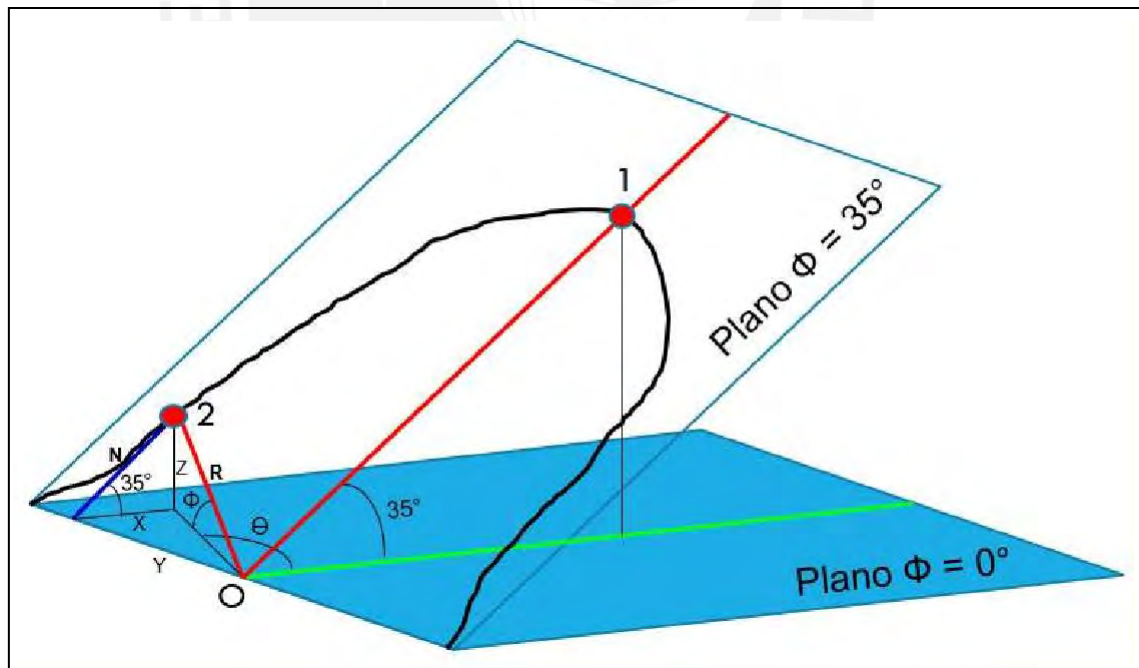


Fig. 3.48 Variaciones angulares por cambio de coordenadas

De esta transformación de coordenadas obtenemos los valores de N e Y , mientras que el valor de Z resulta siendo 0, recordemos que estos valores los hemos

tomado asumiendo un $\phi = 0$, ahora corresponde aplicar la misma elevación que el plano ya que ahora tenemos los datos en coordenadas cartesianas, para ello se aplican las siguientes fórmulas ya vistas:

$$X = N * \cos(35^\circ)$$

$$Z = N * \sin(35^\circ)$$

Por su parte el valor de Y se mantiene constante ya que esta elevación no afecta los valores en dicho eje; de esta manera ya se tiene finalmente las coordenadas cartesianas del punto buscado, esta técnica debe aplicarse para toda la matriz de θ , ϕ y de $Radios$ con lo cual se tiene las matrices de coordenadas X , Y , Z de todo el patrón de radiación, si aplicamos una gráfica tipo *plot* a estos datos nos arrojará la gráfica de órbitas, a esto se le debe aplicar una función que una superficialmente las órbitas (*surf*) generando así el patrón de radiación.

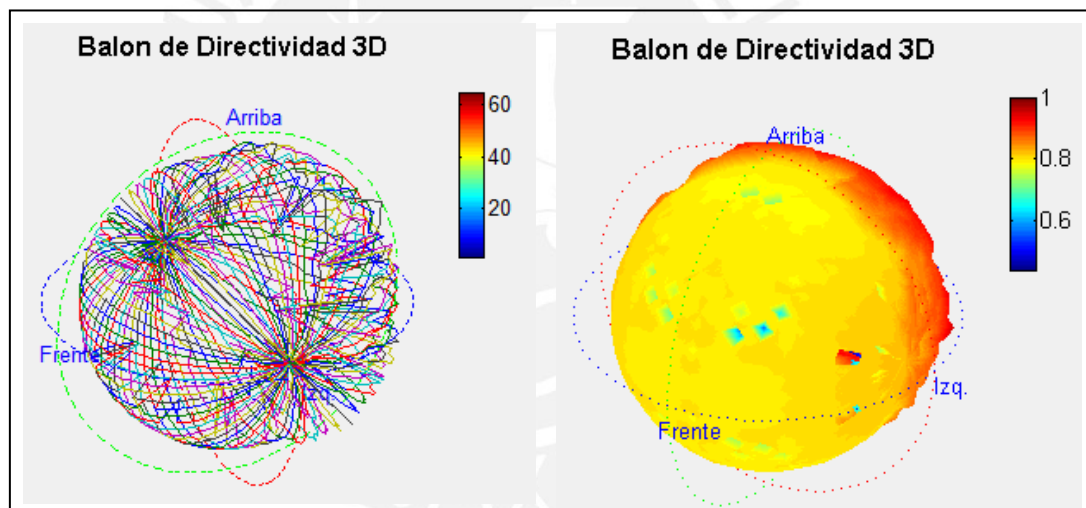


Fig. 3.49 Patrón de radiación en orbitas y con superficie

3.6.5 Interface gráfica GUI

Una interface gráfica usuario, conocida también como *Graphical User Interface* (GUI) es un programa informático que utiliza un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles de un algoritmo o lógica funcional. Su principal uso consiste en proporcionar un entorno visual sencillo que permitir la comunicación del usuario con el sistema operativo de una máquina o computador.

La plataforma MATLAB® presenta una aplicación GUI sobre la cual se pueden desarrollar interfaces gráficas de fácil manejo para el usuario final, sin la necesidad de que este sepa cómo funciona el programa internamente o tener quizás nociones de programación informática, este entorno es el GUIDE de MATLAB®.

Para el presente trabajo se ha desarrollado una interface gráfica amigable, intuitiva y de fácil manejo, en la cual el usuario, con tan solo hacer *click* en unos botones, podrá obtener el patrón de radiación del parlante y balón de directividad que desee. Este es uno de los objetivos principales de la tesis, de desarrollar un entorno de fácil uso, que simplifique los procesos en la obtención del patrón de radiación. La figura 3.50 que veremos nos presenta la interface gráfica que usaremos en nuestras mediciones y una explicación detallada de la misma.

- A. En este pequeño cuadro de diálogo se ingresa el número de puerto USB donde se conectará el cable USB-TTL para la comunicación con el posicionador.
- B. Una vez que se coloca el número de puerto, se presiona el botón “*Conectar*” con lo cual se establece la comunicación serial con el posicionador y el sistema Cliente-Servidor con el PULSE™.
- C. En estas opciones se configura la gradiente y resolución angular que tendrá la medición del balón de directividad y patrón de radiación.
- D. Esta barra de menú permite seleccionar la frecuencia a la que se quiere visualizar las gráficas. Los valores se presentan en 1/3 de octava.
- E. Botonera clásica para el control de la medición.
- F. Plantilla donde se presenta el balón de directividad.
- G. Plantilla donde se presenta el patrón de radiación del altavoz medido.

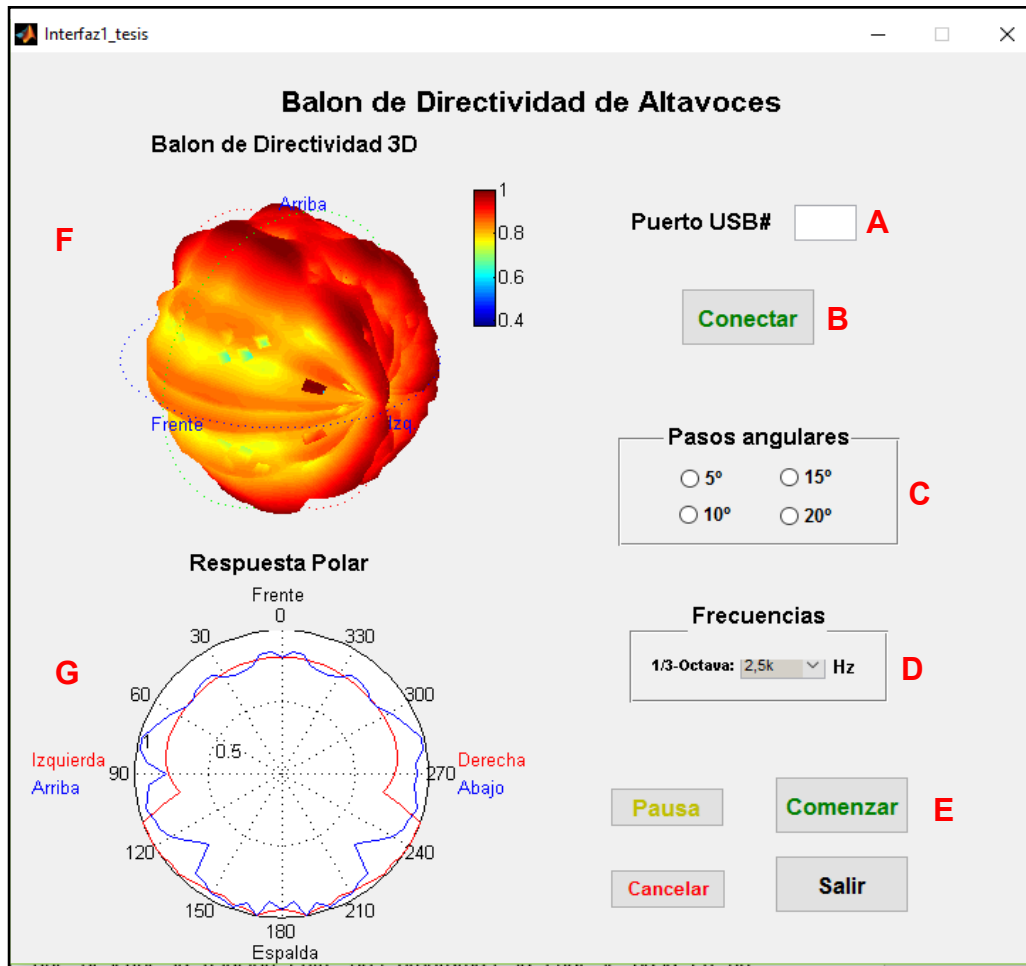


Fig. 3.50 GUI graficador de la directividad y patrón de radiación

3.6.6 Comunicación Cliente - Servidor OLE 2.0

El modelo Cliente - Servidor es un modelo de desarrollo de aplicaciones de programa que describe la relación entre dos programas (*softwares*), la cual se basa en un requerimiento por parte del “cliente” hacia otra aplicación “servidor” quien atiende el requerimiento. Este modelo es de gran importancia entre aplicaciones que residen en un mismo computador.

Con el avance tecnológico se han desarrollado nuevos métodos de implementar dicho modelo, uno de los más populares es la tecnología COM, la cual hace referencia a las tecnologías OLE, OLE Automation, Active X, COM++, DCOM. Los programas escritos y desarrollados en lenguaje C++ son programas orientado a objetos y por lo tanto compatibles con las tecnologías de objeto componente. Una de estas tecnologías

es la OLE 2.0 la cual permite que, programas desarrollados en lenguajes compatibles con OLE (como el caso de C++), puedan controlar y manipular funciones de otros programas también compatible con OLE, en una suerte de comunicación objeto Servidor / Cliente.

Para el presente caso de estudio, el PULSE™ LabShop es compatible con la tecnología OLE 2.0, lo cual permite que un objeto dentro de PULSE™ pueda ser manipulado por un programa externo basado en C++, como es el caso del MATLAB®, es mediante esta tecnología que se logra establecer la comunicación entre MATLAB® (Cliente) y PULSE™ (Objeto Servidor).

3.6.7 Comunicación USB – RS232 tipo “apretón de manos” (*Handshaking*)

Para el presente trabajo se implementa un protocolo de comunicación basado en una comunicación tipo “apretón de manos” (*handshaking*), el cual es utilizado en las industrias de redes y telecomunicaciones para asegurar una comunicación segura y confiable. En la figura 3.51 se presenta un esquema de este tipo de comunicación.

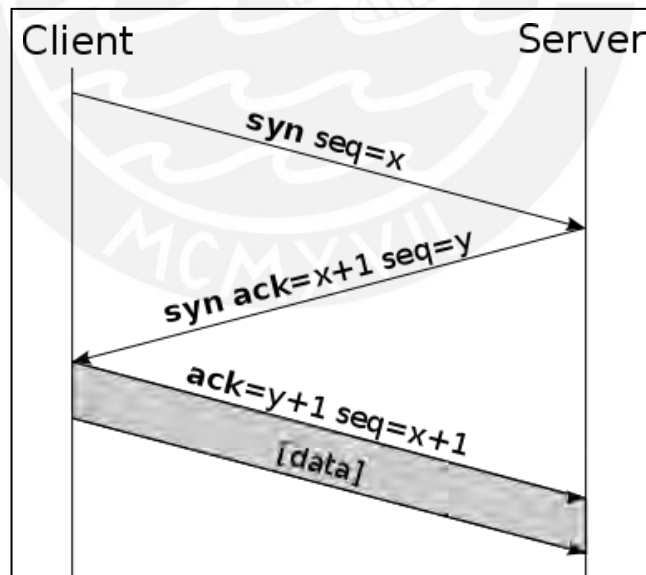


Fig. 3.51 Protocolo de comunicación Handshaking [63]

Como se vio anteriormente, este protocolo es usado para la comunicación entre el sincronizador MATLAB® y el ARDUINO® del posicionador de coordenadas esféricas, y entre el MATLAB® con el PULSE™ LabShop, manteniendo una estructura Cliente – Servidor en ambos casos. Este arreglo de comunicación está basado en el envío de señales de confirmación (*Acknowledge* o *ack*), las cuales son enviadas de receptor a emisor para, como su nombre lo dice, confirmar una recepción satisfactoria de tal manera que la comunicación se realice de forma satisfactoria y con la seguridad de que se ha recepcionado la información completamente. Este tipo de comunicación se ha explicado a más detalle en cada diagrama de flujo explicado anteriormente.



CAPITULO 4:

PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo final de la tesis se presentan las pruebas y análisis realizados al sistema prototipo diseñado en el capítulo III, presentando en la primera parte la preparación y set-up para las mediciones, seguido de una explicación de las pruebas propiamente dichas que se realizan en el sistema, presentando los resultados finales y un estudio analítico de estos. Esta investigación final es concluyente en cuanto a las hipótesis y objetivos planteados a inicios del documento.

4.1 Preparación de la medición

La preparación de la medición del patrón de radiación implica la implementación e integración de las tres áreas principales del proyecto presentadas anteriormente, con elementos complementarios al sistema tales como transductores, parlantes y cableado para la interconexión de los equipos. A continuación se explica la preparación del sistema para la medición.

- Primero se debe colocar el emisor y receptor a 1 m de distancia entre cada uno, el micrófono debe estar en el mismo eje horizontal con el centro del altavoz, y dicho altavoz ya debe encontrarse sujeto por el posicionador de coordenadas esféricas en su posición de origen.
- En caso el posicionador no se encuentre en la posición de origen al momento de encenderlo este automáticamente volverá a su posición inicial tanto en polar como azimutal.
- Ubicamos en un lugar seguro el analizador PULSE™ y cerca de este a la PC, es el momento de realizar la interconexión entre los dispositivos: La PC se conecta mediante cable LAN con el PULSE™ Front End, y a su vez la PC se conecta con el posicionador angular mediante el cable USB-TTL. El siguiente esquema ilustra las conexiones que se deben realizar

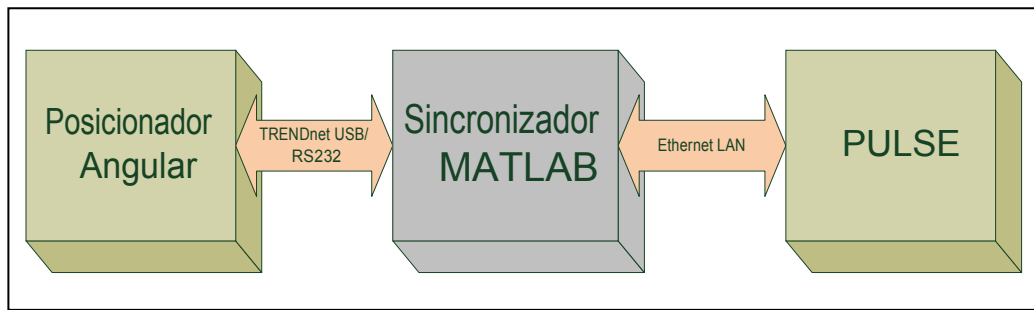


Fig. 4.1 Interconexión de PC con PULSE™ y posicionador.

- Lo siguiente será energizar los equipos con la red eléctrica $220\text{ VAC } 60\text{Hz}$, para tal propósito cada equipo cuenta con su propia fuente regulada de voltaje según las especificaciones de cada una.
- El siguiente paso es ubicar el emisor y receptor de la medición según las especificaciones del AES [39]. El parlante utilizado es el monitor AUDIX PH25, mientras que para la recepción se utiliza el transductor BRÜEL & KJÆR 4189. La figura 4.2 presenta los equipos descritos.



Fig. 4.2 Parlantes AUDIX PH25 y Micrófono BRÜEL & KJÆR 4189 [64]

- A continuación debemos colocar la llave maestra USB del PULSE™ en la PC para tener la licencia de usar los simuladores y analizadores de audio, energizamos el PULSE™ y esperamos a que el hardware realice su secuencia de inicialización y reconocimiento.
- Ahora en la PC debemos abrir el interface gráfico GUI desde el MATLAB® para configurar los parámetros de la medición y se dar inicio al proceso. Al momento de conectar el posicionador en la PC se debe verificar el puerto COM al cual se

está conectando el cable USB-TTL, ese mismo número de puerto debe colocarse en la interface en el recuadro *Puerto USB#* y darle *click* al botón *CONECTAR*, debe esperar unos momentos (Al hacer *click* en conectar, debería abrir el programa PULSE™ LabShop automáticamente sin necesidad de abrirlo manualmente, esto gracias al protocolo de comunicación OLE 2.0).

- Ahora que ya se estableció la comunicación debemos configurar los pasos angulares a los que se realizará la medición, la interface soporta pasos de 5° , 10° , 15° y 20° , al momento de seleccionar alguno de ellos se encenderá el LED rojo en el posicionador, debemos esperar a que este vuelva a verde parpadeante



Fig. 4.3 Sistema listo para la medición



Fig. 4.3 Sistema listo para la medición

4.2 Pruebas de sistema prototipo

A continuación se presenta una descripción de las principales pruebas realizadas sobre el sistema prototipo automatizado.

4.2.1 Prueba de posicionador angular

El objetivo de esta prueba es verificar el control del posicionador angular desde un programa desarrollado en el entorno MATLAB®, para la comunicación se utiliza el cable USB-TTL. En esta prueba el programa desarrollado envía mediante el cable especial señales de control de dos tipos al ARDUINO® (posicionador): Señales de configuración de rotación y de orden de rotación

Las señales de configuración son las que llevan los parámetros de la medición al ARDUINO®, tales como desplazamiento angular para el posicionamiento, dicho desplazamiento está determinado según el estándar del AES [39], el cual presenta el tipo de medición tradicional de pasos angulares de 5° . Por otro lado, las señales de orden de rotación son las encargadas de dar la orden al posicionador de que mueva los actuadores o motores a pasos para que realicen desplazamientos angulares tanto en el plano polar como en el plano azimutal según la configuración previamente realizada, esto se logra mediante el envío de un dato que el microcontrolador interprete como una señal de movimiento; para este caso se envía el carácter *M*.

Como resultado se puede apreciar que el posicionador realiza los movimientos angulares cada vez que el sincronizador MATLAB® envía el carácter *M*, hay que tener en cuenta que previamente se debe haber establecido la comunicación serial con el botón CONECTAR del interface

4.2.2 Prueba de respuesta en frecuencia

Estas pruebas tienen por objetivo verificar si es posible obtener la respuesta en frecuencia y la función de transferencia de un altavoz, utilizando para ello las técnicas de caracterización seleccionadas del capítulo II. Como se ha indicado anteriormente el sistema desarrollado obtiene la respuesta en frecuencia a partir del envío de un tren de impulsos

La prueba consiste básicamente en realizar una medición manual, desde la pantalla principal del LabShop, y obtener la respuesta en frecuencia H1 del altavoz, manteniéndose este inmóvil y con el posicionador apagado. Para la prueba se debe

verificar que el altavoz emita 10 impulsos consecutivos, el micro captura dichos impulsos (siempre y cuando superen el nivel del disparador), les aplica el desplazamiento temporal (*Time Delay*) a cada uno, enventana la señal deseada (*Time Weighting*) y aplicándoles la correlación con la señal pulso proveniente del generador obtiene las funciones de transferencia H1 del altavoz para cada uno de los 10 impulsos las cuales son promediadas con el objetivo de mejorar la medición. En el capítulo anterior en la figura 3.33 a puede apreciar un ejemplo de esta respuesta en frecuencia H1.

4.2.3 Prueba de sistema automatizado

Esta es la prueba definitiva del proyecto que busca corroborar las hipótesis y los objetivos centrales planteados al comienzo del capítulo III, obteniendo el patrón de radiación de un altavoz convencional mediante un sistema automatizado controlado desde en una interface gráfica desarrollada en MATLAB®. Para esta prueba se integran las etapas de medición y posicionamiento del altavoz, teniendo como sistema administrador y sincronizador al programa desarrollado en MATLAB®; este se presenta en una interface gráfica de fácil manejo para el usuario.

4.3 Análisis de resultados

Culminadas las pruebas antes mencionadas se obtienen los resultados del posicionamiento angular, de la respuesta en frecuencia y del patrón de radiación obtenido utilizando el sistema prototipo automatizado implementado; estos resultados proveen de la información para emitir una conclusión final del proyecto y, si fuese el caso, unas recomendaciones a futuro. Para un mejor análisis, los resultados obtenidos serán divididos según el tipo de prueba que le corresponde, a continuación se presenta en detalle:

4.3.1 Resultados del posicionador angular

Tras las pruebas realizadas se pudo observar lo siguiente:

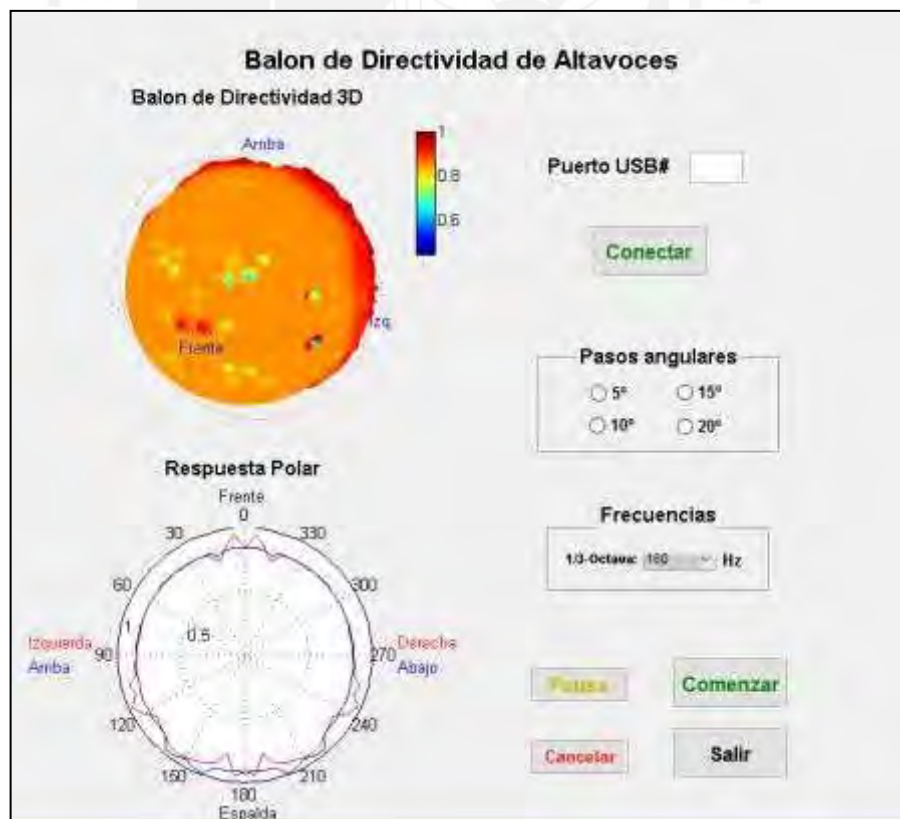
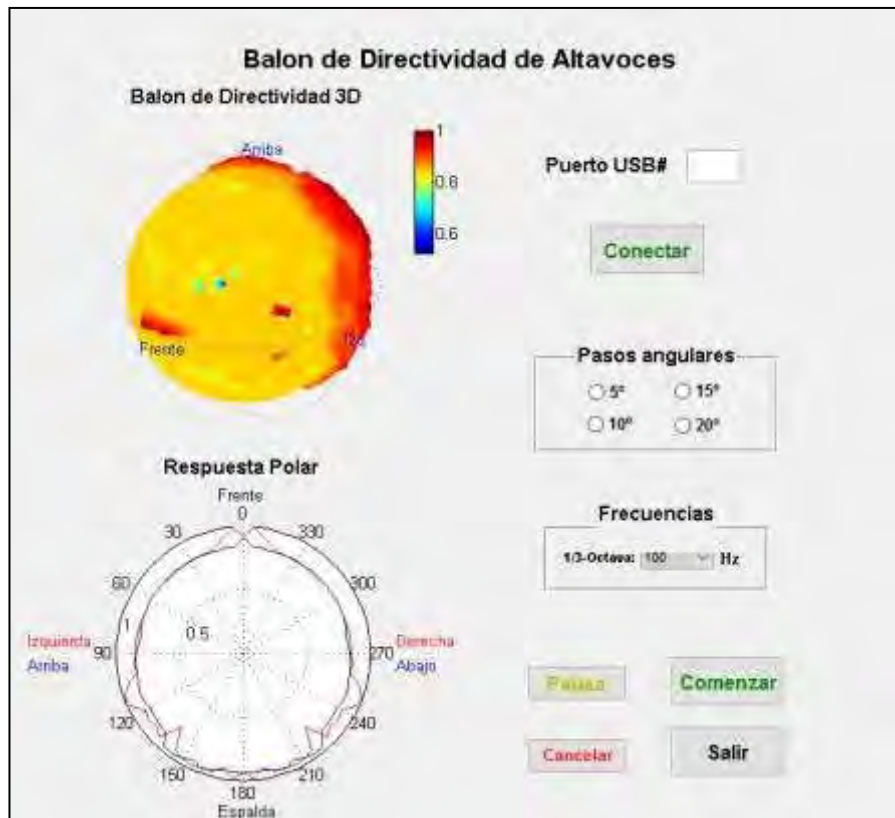
- El sistema se configura correctamente según las señales de configuración enviadas, varía su desplazamiento angular entre *5*, *10*, *15* y *20* según se requiera.
- El posicionador responde a las señales de orden enviadas por el sincronizador, efectúa el movimiento y posicionamiento angular cada vez que se le envía el carácter *M*, la velocidad de posicionamiento en azimutal es menor la velocidad en el posicionamiento polar.

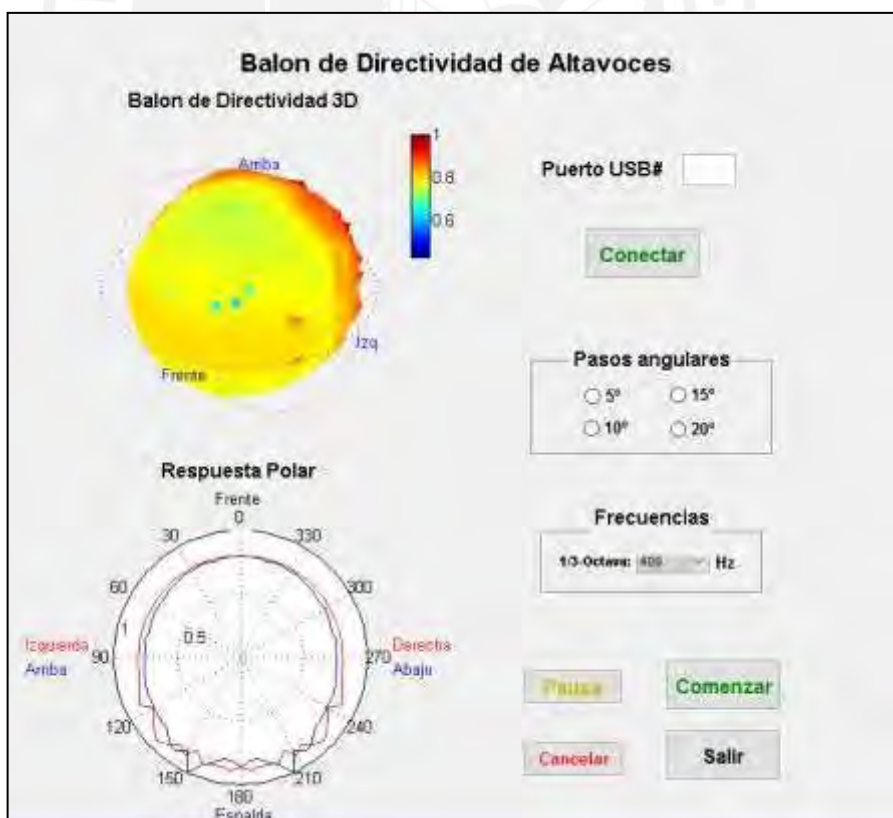
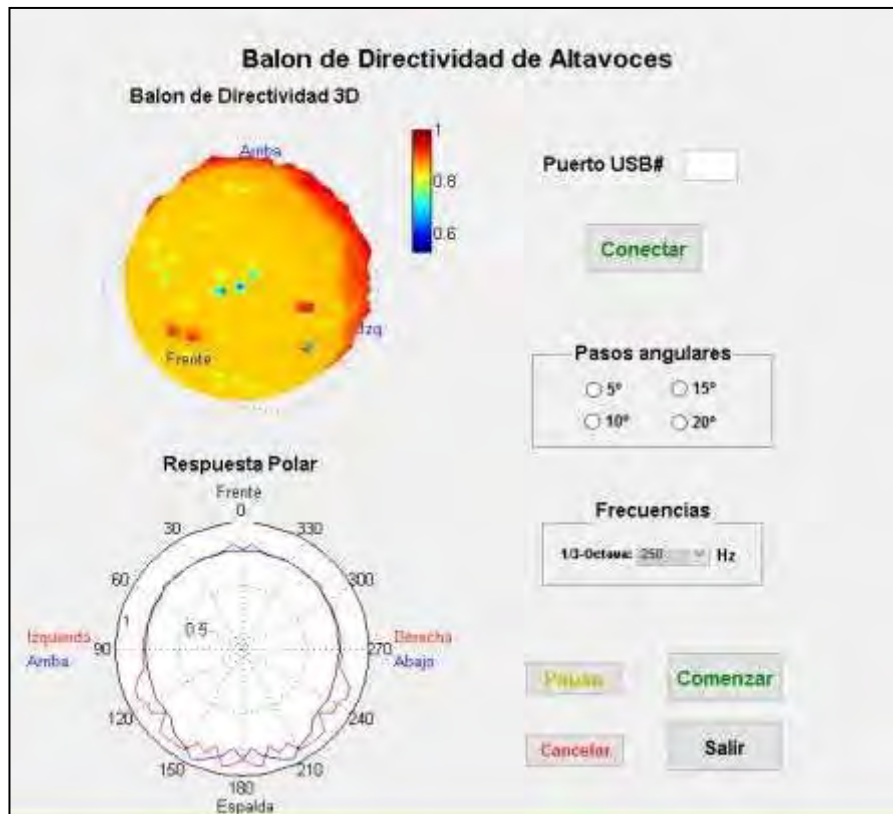
4.3.2 Resultados de la respuesta en frecuencia

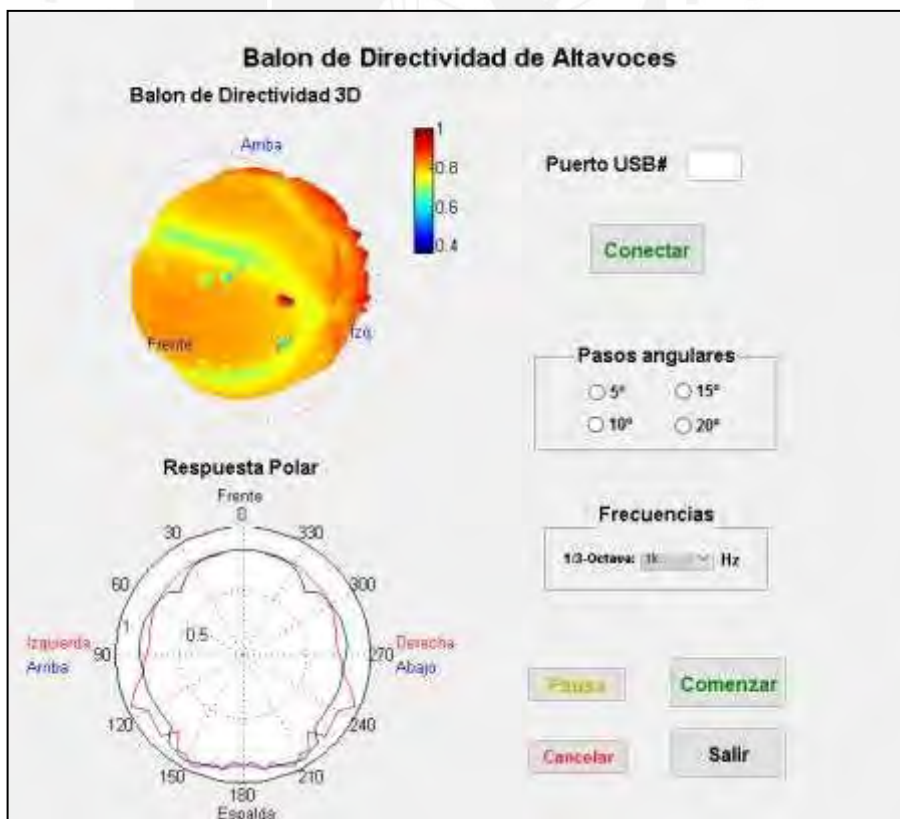
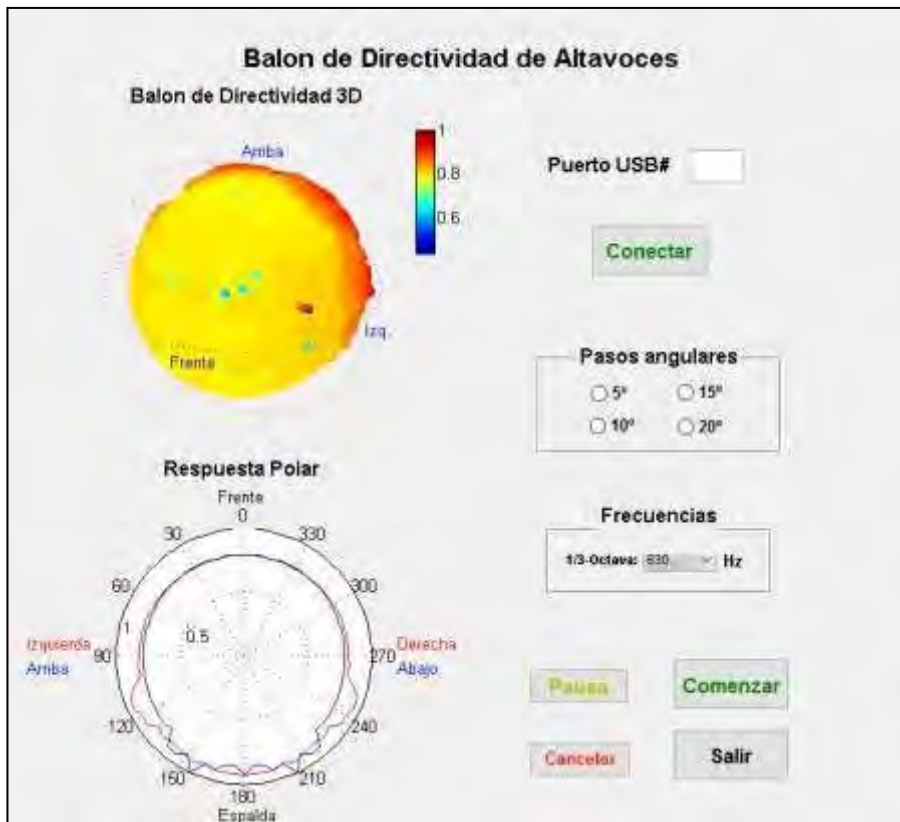
Luego de realizar las pruebas pertinentes, se comprueba que efectivamente se obtiene la respuesta en frecuencia y la función de transferencia del altavoz, resultado de un promedio de 10 respuestas impulsivas consecutivas; y que la implementación de un disparador (*trigger*), un desplazamiento temporal (*Time Delay*) y un enventanamiento en el tiempo (*Time Weighting*), contribuyen en gran medida para aislar la señal deseada del ruido de fondo y la reverberación propia del recinto. La respuesta en frecuencia final sin embargo presenta ciertas imperfecciones, pequeños sobre impulsos inesperados y alguna señal ruidosa montada sobre la señal deseada.

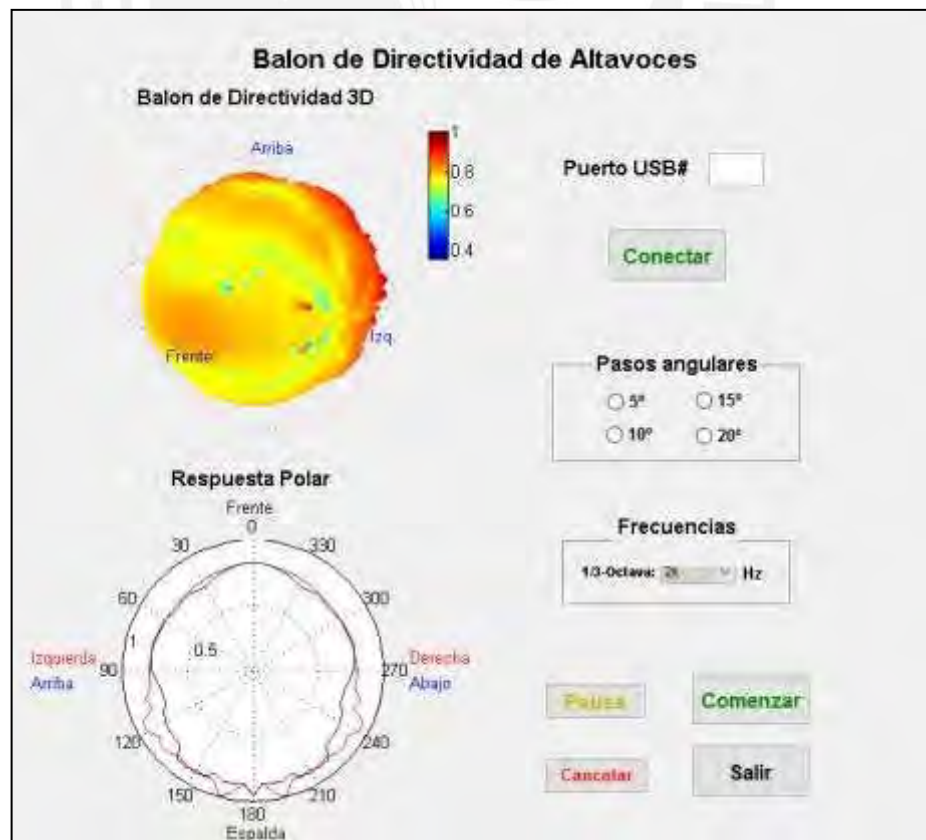
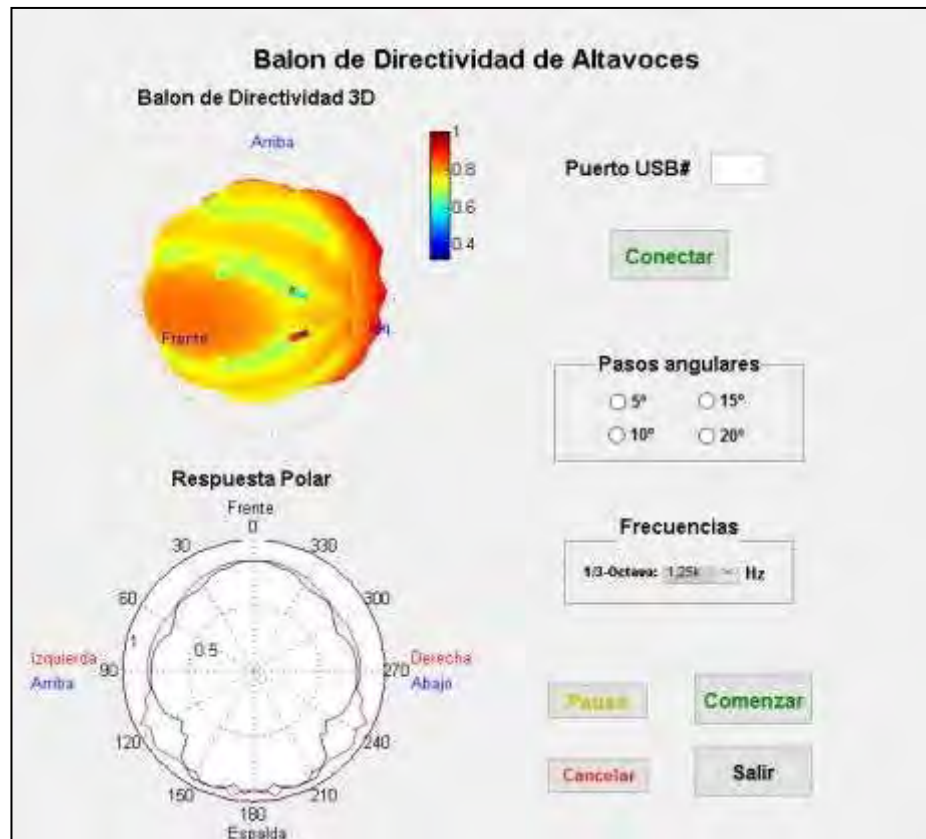
4.3.3 Resultados del sistema automatizado

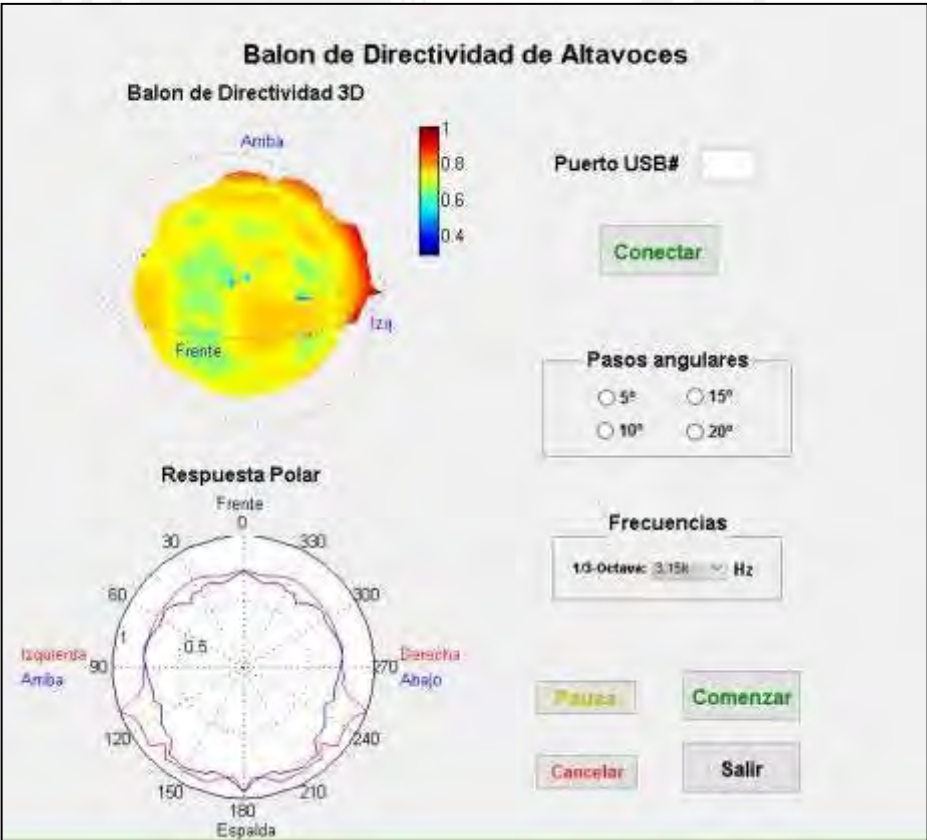
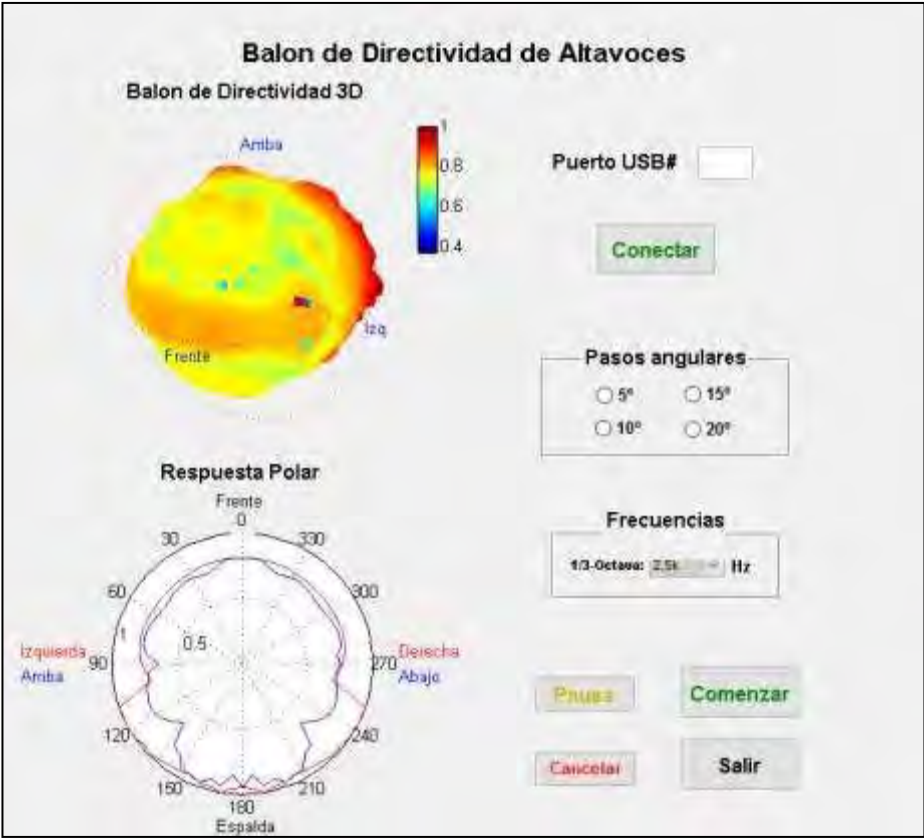
Se realizó un ensayo a pasos angulares de 5° , usando análisis de respuesta impulsiva promediado de 10 impulsos emitidos. Se mantuvieron todos los parámetros mencionados anteriormente y con los equipos presentados en el punto 4.1; se obtuvo los siguientes patrones de radiación desde *800* a *19.2 kHz*.

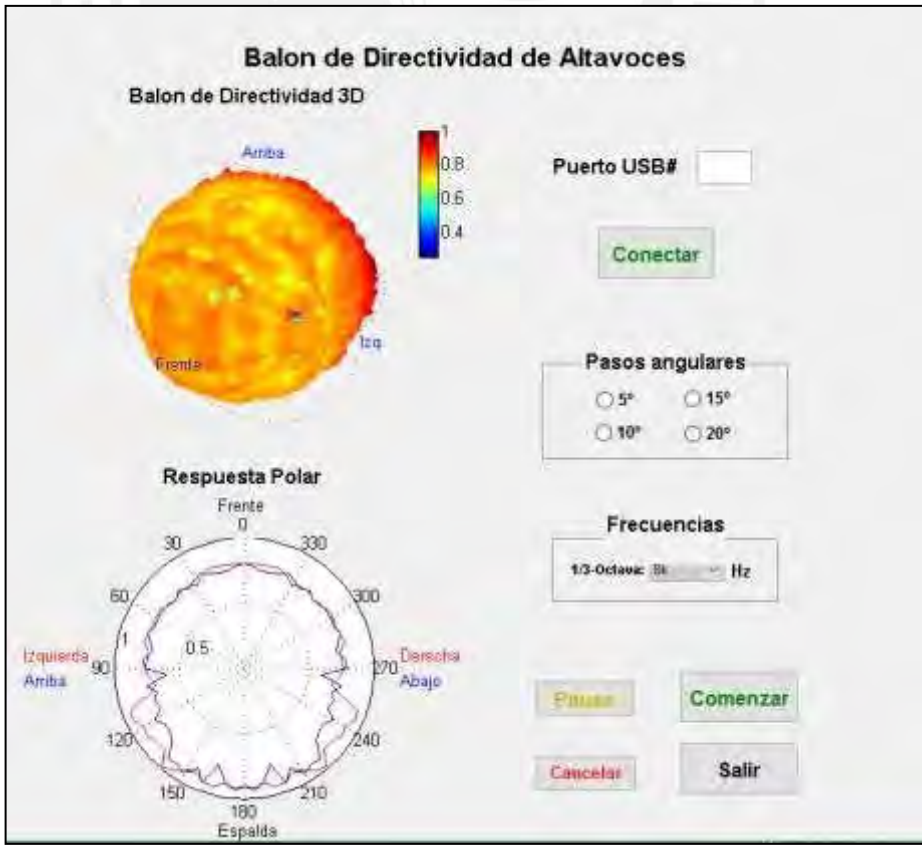
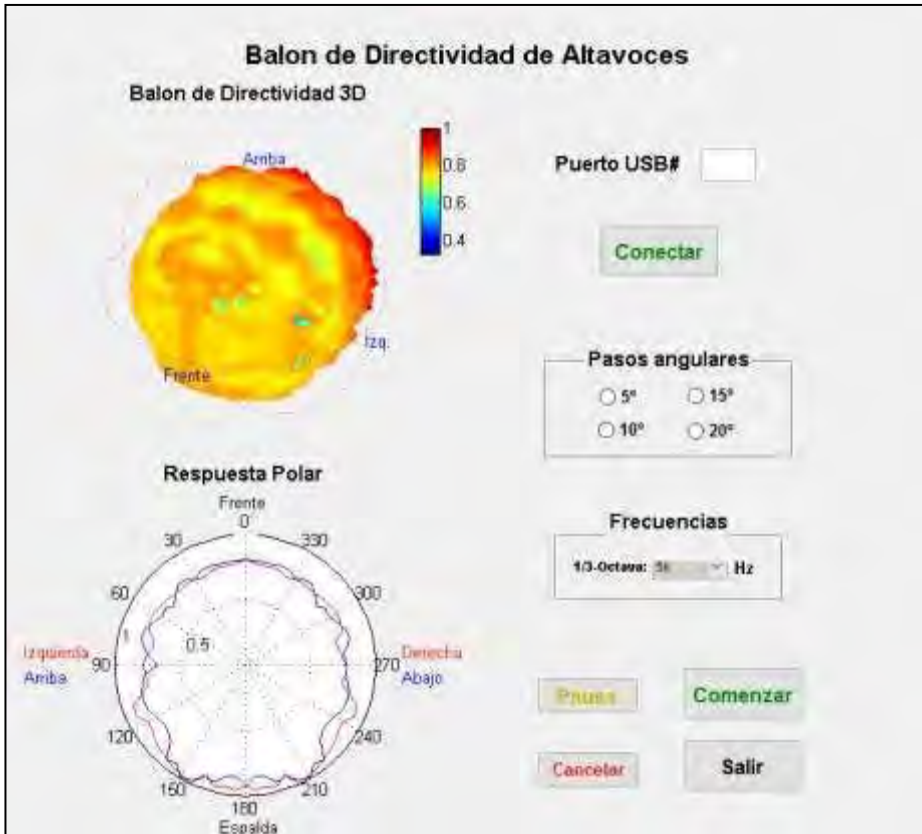


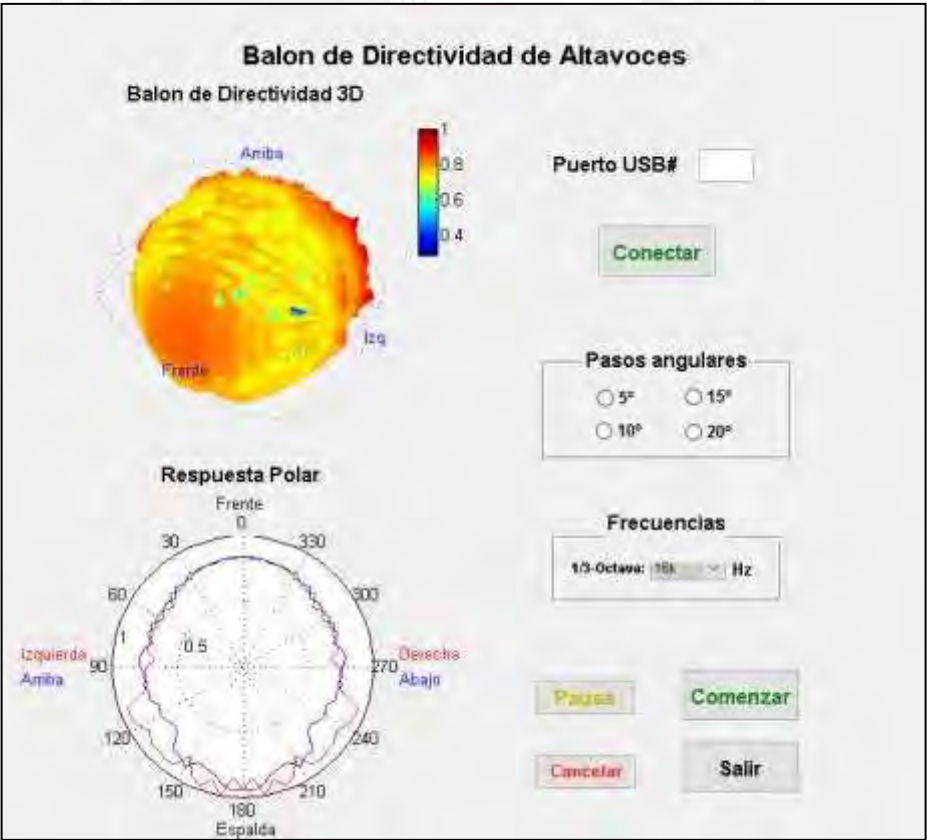
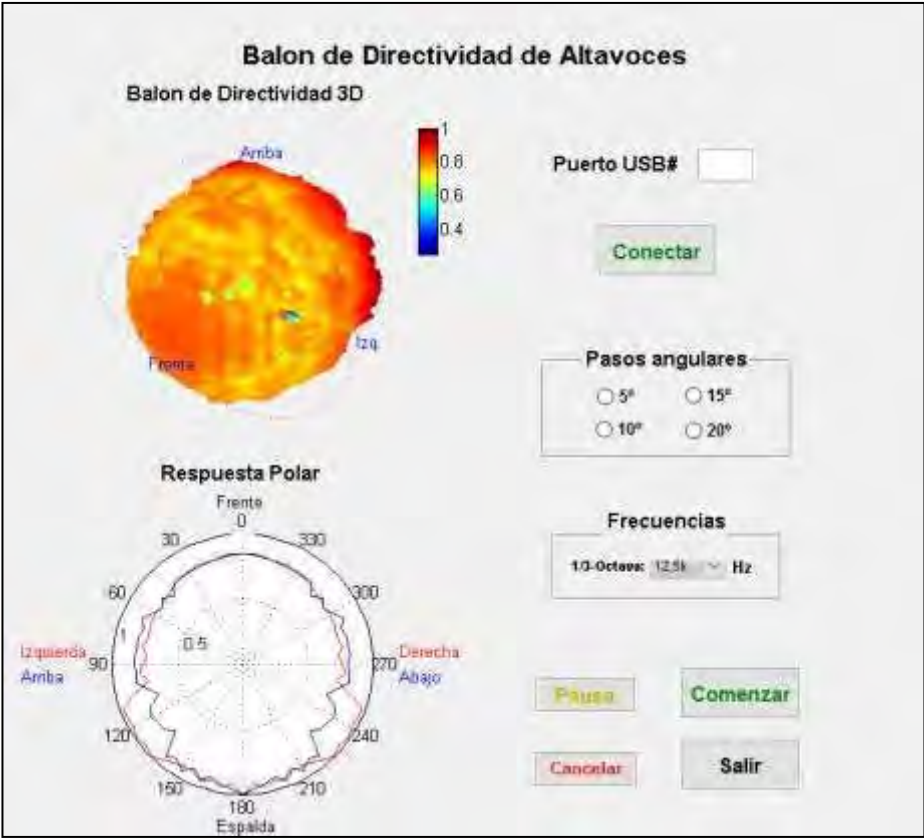












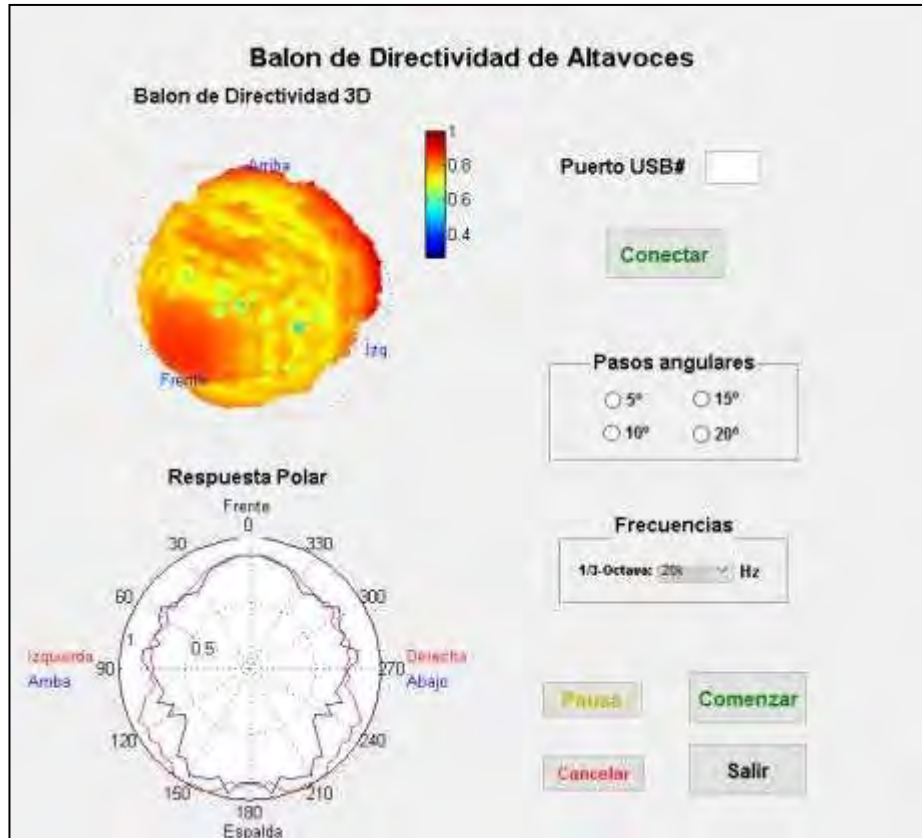


Fig. 4.4 Balón de directividad y respuesta polar en las frecuencias: 100 Hz, 160 Hz, 250 Hz, 400 Hz, 630 Hz, 1 kHz, 1,25 kHz, 2 kHz, 2,5 kHz, 3,15 kHz, 5 kHz, 8 kHz, 12,5 kHz, 16 kHz, 20 kHz

4.4 Estudio del error

Finalmente, con los resultados expuestos y debidamente analizados, se presenta el estudio del error existente en la medición, identificando las causas y características principales del mismo. A continuación se explican los principales errores identificados de las mediciones realizadas.

- Aplicando este método no es posible aislar en totalidad el ruido externo, esto se ve reflejado en las mediciones pues los lóbulos en la directividad presentan picos debido al ruido filtrado del recinto de la medición.
- Se debe implementar una técnica de caracterización del altavoz que presente mayor inmunidad al ruido

- La reverberación externa influye en las mediciones realizadas ya que estas se filtran durante las mediciones.
- Para obtener una respuesta real y fiel, la medición debería realizarse en una cámara anecoica.

APLICACIÓN INDUSTRIAL:

Como se ha podido apreciar en el último capítulo, el sistema diseñado e implementado cumple con los objetivos planteados en la tesis a nivel de prototipo; sin embargo, es necesario aún para el cierre de este proyecto mejorar sus acabados y condiciones finales, dejando así de ser un prototipo y convirtiéndose en una solución real para la industria, de manera directa en el rubro del audio y la acústica, o en versiones alternativas para otros rubros industriales tal como veremos a continuación:

De acuerdo a lo revisado en los primeros capítulos de la tesis, la medición y obtención del patrón de radiación es una necesidad constante en la industria del audio y la acústica, por lo que se han venido desarrollando e implementando diversas técnicas que han ido mejorando con el devenir tecnológico; por lo tanto es consecuente definir que un desarrollo en instrumentación para atender esta necesidad tendrá una aplicación directa en la industria; tal es el caso del posicionador de coordenadas esféricas para obtener el patrón de radiación de altavoces.

En resumen este posicionador desarrollado es altamente aplicable a la industria de fabricación de altavoces y fuentes sonoras, además de contribuir a las técnicas de simulación de la interacción del altavoz con el recinto en que trabajará. El sistema desarrollado para el rubro industrial del audio y la acústica es usado en:

- Obtención del patrón de radiación por octavas
- Obtención del patrón de radiación polar en el plano horizontal por octavas.
- Softwares CAD para la simulación de altavoces y recintos
- Medir la presión sonora radiada por una fuente sonora en una coordenada espacial específica.

Por otro lado, cuando se habla de versiones alternativas del sistema posicionador de coordenadas esféricas se está haciendo referencias a variantes o adaptaciones mecánicas que se le pueden efectuar al equipo para que sea aplicado a otros rubros, considerando que el equipo está diseñado con sujetadores tipo mordazas que pueden ser intercambiados y adaptados para otros tipos de fuentes radiantes tales como:

- Fuentes luminosas
- Fuentes de emisión de micro ondas
- Antenas de comunicación

Como se puede apreciar las aplicaciones a nivel industrial del sistema desarrollado no solo están limitados al campo de la acústica, sino que puede ser empleado para medir de manera automatizada la emisión de diversas fuentes radiantes. Esto sin duda amplía el abanico de posibilidades del posicionador de coordenadas esféricas tanto en el aspecto comercial como en el aspecto industrial.

CONCLUSIONES:

De acuerdo a la hipótesis planteada inicialmente se pudo finalmente diseñar, implementar, fabricar y equipar un sistema totalmente automatizado capaz de obtener el patrón de radiación y el balón de directividad de cualquier fuente sonora que tenga las dimensiones adecuadas para el posicionador, y de acuerdo a cómo se concibió inicialmente este sistema automatizado, con las adaptaciones correspondientes puede ser utilizado para medir la radiación de otro tipo de fuentes tales como fuentes electromagnéticas o de radiofrecuencias.

La conclusión de este proyecto abre las puertas a desarrollar un servicio de medición de altavoces y fuentes sonoras con el propósito de caracterizar la respuesta de dichas fuentes. Esta idea con el soporte del Laboratorio de Acústica de la PUCP tendrá un desarrollo próspero.

BIBLIOGRAFIA

- [1] SEMICONDUCTOR COMPONENTS INDUSTRIES LLC.
2002 Linear & Switching Voltage Regulator Handbook. Rev. 4 *Denver, Colorado, EE.UU.*
- [2] OGATA, KATSUHIKO
2010 Ingeniería de Control Moderna. 5ta edición *Madrid, España.*
- [3] BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT
1998 PULSE™: Getting Started. Nærun, Dinamarca: BRÜEL & KJÆR –
Product Data
- [4] ATMEL® CORPORATION.
2009 ATMEGA8 (L). Orchard Parkway, San Jose, CA EE.UU.
- [5] THE MATHWORKS INC.
2007 MATLAB®'s User Guide. Natick, MA EE.UU.
- [6] COOK, Gareth. y ZAKNICH, Anthony.
1996 Extensions to the Theory of Time Delay Spectrometry. Nedlands, WA, Australia: *TENCON'96. Proceedings, 1996 IEEE TENCON. Digital Signal Processing Applications. IEEE, 1996. p. 763-768*
- [7] COOK, Gareth. y ZAKNICH, Anthony.
1997 Theory and Implementation of Extensions to Time Delay Spectrometry. Nedlands, WA, Australia: *Journal Audio Engineering Society Convention 6r - Paper Number: 4299*
- [8] PERMAN, André.
1989 Scale model measurements with Time Delay Spectrometry Using a Microphone as a Sound Source. Nærun, Dinamarca: BRÜEL & KJÆR -
Application Notes

- [9] HARRIS, Neil.
2003 Modelling Room Interaction Effects for Pistonic and Distributed Mode Loudspeakers in Both the Frequency and Time Domains.
Centre for Audio Research and Engineering, University of Essex,
Colchester UK: *Journal Audio Engineering Society Paper Number: 5732*
- [10] BRÜEL & KJÆR.
2009 ODEON Room Acoustics Modelling Software-Types 7835, 7836 and 7837. Nærun, Denmark: BRÜEL & KJÆR *Product Data*
- [11] VORLÄNDER, Michael y SUMMERS, Jason.
2007 Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modeling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. Washington, USA.
- [12] LEMMON, John.
2005 Radiation Pattern Analysis of a Four-Element Linear Array. Department Of Commerce. Department of Commerce. USA
- [13] WAMOLA, Davis.
2002 Characterization of a Robot Arm for use in Acoustic Experiments. Massachusetts Institute of Technology. USA: *Department of Electrical Engineering and Computer Science*
- [14] RIVERA, Richard.
2005 Implementación de la Espectrometría de Retardo de Tiempo en el desarrollo de una Aplicación para la Extracción de la Respuesta en Frecuencia de Altavoces, utilizando un Analizador PULSE controlado con MATLAB. Lima, Perú: *Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Católica del Perú. Escuela de Graduados. Mención: Física Aplicada.*
- [15] BJORK, Helga Magnúsdóttir.
2006 Array Loudspeakers and Their Applications in Room Acoustics. The Danish Technical University. Lyngby, Dinamarca: *Tesis Doctoral. Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs.*

- [16] HORBACH, Ulrich, et al.
1999 Numerical Simulation of Wave Fields Created by Loudspeaker Arrays. Regensdorf, Suiza. Erlangen, Alemania: *Audio Engineering Society Convention 107 – Paper: 5021*.
- [17] MEYER, David G.
1984 Computer Simulation of Loudspeaker Directivity. Purdue University, School of Electrical Engineering, West Lafayette, IN: *Journal Audio Engineering Society*, vol. 32, no. 5, pp. 294 - 315.
- [18] CLF Group.
2004 A Common Loudspeaker File Format. *Syn-Aud-Con Newsletter v32, No 4 Fall 2004*
- [19] CLF Group
2014 Trial Authoring Kit. Reads V1 and V2 text-format, Views v1 and V2 distribution files. http://www.clfgroup.org/CLF_Authoring_v2.0c.exe
- [20] EASTERN ACOUSTICS WORKS
2006 EAW Polar Measurements. Whitinsville, MA EE.UU. http://eaw.com/docs/6_Technical_Information/S3_Information/s3_polar_measurement.pdf
- [21] HOY, William R. y McGREGOR, Charles
2001 Loudspeaker Complex Directional Response Characterization. Whitinsville, MA EE.UU. *Audio Engineering Society Convention 111 Paper Number: 5439*
- [22] PONTEGGIA, Daniele.
2009 Automated Balloon Measurements with CLIO 10. *Audiomatica Application Note AN-002/1009*

- [23] MERIMAA, Juha, et al.
2005 Concert Hall Impulse Response. Pori, Finlandia: Reference. *Available online at: <http://www.acoustics.hut.fi/projects/poririrs> [Last viewed 25-Jul-2008]*
- [24] HSU, Hwei P.
1995 Schaum's outline series, Signals and Systems: *McGraw Hill*
- [25] LI, Y. T. y WONG, R.
2013 Integral and Series Representations of the Dirac Delta Function: *arXiv preprint arXiv: 1303 - 1943*
- [26] YONG-SHENG, Ding
1985 A Tone-Burst Method for Measuring Loudspeakers Harmonic Distortion at High Power Level. Research Institute of TV and Electroacoustic, Beijing, China: *Journal Audio Engineering Society Volume 33 Issue 3 pp.145 – 147*
- [27] POLETTI, Mark A.
1988 Linearly Swept Frequency Measurements, Time-Delay Spectrometry, and The Wigner Distribution. Acoustics Research Centre, The University of Auckland, Auckland, Nueva Zelanda: *JAES vol. 36, n. 6, 1988 June, pp. 457-468.*
- [28] VANDERKOOY, John.
1994 Aspects of MLS Measuring Systems. Department of Physics, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada: *JAES vol. 42, n. 4, 1994 April, pp. 219-231.*
- [29] MÜLLER, Swen y MASSARINI, Paulo
2001 Transfer Function Measurement with Sweeps. Acoustic Testing Laboratory, INMETRO, Xerdm, Duque de Caxias (RJ), Brasil: *Journal of the Audio Engineering Society, 2001, vol. 49, no 6, p. 443-471.*

- [30] HOLTERS, Martin, et al.
2009 Impulse Response Measurement Techniques and their Applicability in the Real World. Dept. of Signal Processing and Communications, Helmut Schmidt University, Hamburg, Germany: *En Proc. 12th Int. Conference on Digital Audio Effects, DAFx*.
- [31] HEYSER, Richard C.
1967 Acoustical Measurement by Time Delay Spectrometry. California Institute of Technology, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA: *Journal of the Audio Engineering Society*, 1967, vol. 15, no 4, p. 370 - 382.
- [32] HEYSER, Richard C.
1973 Time Delay Spectrometry. *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 53, no 1, p. 319-320.
- [33] RIFE, Douglas D. y VANDERKOOY, John.
1989 Transfer-Function Measurement with Maximum-Length Sequences. DRA Laboratories, Sterling, VA; Audio Research Group, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada: *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 37, no 6, p. 419-444.
- [34] PAULO, J.V.C.P. et al.
2000 Room Impulse Response Using Segmented MLS for Annoyance Minimization. Madrid: *Proceedings of the tecni-acustica-EAA symposium on architectural acoustics*
- [35] THE MATHWORKS, INC.
2010 MATLAB® Get Start. 3 Apple Hill Drive Natick, MA EE.UU.
- [36] BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT
1998 Getting Started: An introduction to PULSE software: Nærun, Dinamarca: BRÜEL & KJÆR – *Product Data*

- [37] BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT
2008 PULSE Hardware System Data: IDA Hardware Configuration for PULSE
– Types 3560-B, 3560-C, 3560-D, 3560-E. Nærun, Dinamarca: *BU 0228*
- [38] HUGHES, Charles
2005 How Accurate is Your Directivity Data? Technical white paper published
by www.excelsior-audio.com
- [39] AUDIO ENGINEERING SOCIETY, INC.,
2008 AES Standard on Acoustics – Sound source modeling – Loudspeaker
Polar Radiation Measurements. *AES56-2008*
- [40] BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT
2009 Product Data BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT
PULSE Electroacoustics – Type 7907 – S1. Nærun, Dinamarca: BRÜEL
& KJÆR – *Product Data*
- [41] MOTORLA INC.
1989 Linear/Switching Mode Voltage Regulator Handbook. EE.UU: *4th Edition*.
- [42] TEXAS INSTRUMENTS INC.
1989 MAX232x Dual EIA-232 Drivers/Receivers. Dallas, TX, EE.UU:
SLLS047M
- [43] TRENDnet
2007 USB to Serial Converter TU-S9. Torrance, CA, EE.UU: *Datasheet Rev.:*
08.14.2007
- [44] ARDUINO® MEGA 2560
2016 ARDUINO® MEGA 2560 & Genuino MEGA2560
<https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMEGA2560>

- [45] Son Robots. Motores, Servomotores y Motores a Paso.
2016 Motores, Servomotores y Motores a paso
<http://sonrobots.com/arduinos/motores-servomotores-y-motores-paso-a-paso/>
- [46] The Handy Board.
2015 What is the Difference between a DC motor and Servo Motor
<http://handyboard.com/hb/fag/hardware-fags/dc-vs-servo/>
- [47] ERAU.
2008 Daytona Section Small Radio Telescope (SRT) Program. Daytona, Florida.
<https://ewh.ieee.org/r3/daytona/SRTProgramPage1.html>
- [48] Mclennan Precision Motion Control.
2015 P542 Geared Stepper Motor Datasheet.
<https://www.mclennan.co.uk/products/hybrid-stepper-motors>
- [49] Messner, Bill y Tilbury, Dawn.
2011 Control Tutorials for MATLAB & Simulink, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, EE.UU.
<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?aux=Home>
- [50] Tran, Thanh.
2003 Decoupling / Filtering Techniques. Texas Instruments, Dallas, TX, EE.UU. Application Report SPRA906
- [51] The French Institute of Science and Technology for Transport, Development and Networks
2017 I-Simpa: An Open Source Software for 3D Sound Propagation Modelling
<http://www.ifsttar.fr/en/menu-haut/annuaire/presentation/produits/personne/fortin-nicolas/>

- [52] BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT
2017 Training Courses.
<https://www.bksv.com/en/Training>
- [53] Frontier in Neuroscience: Auditory Cognitive Neuroscience
2014 Relating Age and Hearing Loss to Monoaural, bilateral, and Binaural
Temporal Sensitivity
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2014.00172/full>
- [54] Audiomatica: Electrical and Acoustical Measurement Systems
2017 Clio FW-01: Product Description
http://www.audiomatica.com/wp/?page_id=483
- [55] ARTA – Application Note
2017 Measurement of Polar Directivity Characteristics of Loudspeakers with
ARTA
http://www.artalabs.hr/AppNotes/AP6_Directivity_Measurements-EngRev1.01.pdf
- [56] OUTLINE
2017 Measurement System ET 250-3D
<http://outline.it/outline-products/measurement-systems/et-250-3d/>
- [57] Lewis, F. L., Abdallah, C. T., Dawson, D. M.
1993 Control of Robot Manipulators, University of Texas at Arlington, TX,
EE.UU.
- [58] Halion Internacional
2017 PSU-ATX 600 W: Product Description
<http://halion.com.pe/producto/psu-atx-600w-p8/>
- [59] UGE Electronics
2017 L298 Dual Motor Driver
<https://uge-one.com/l298-dual-motor-driver.html>

- [60] VEX Robotics
2017 Codificador de Eje Óptico
<http://www.vexrobotics.com.mx/vexedr/descripcion.php?id=276-2156>
- [61] SKF, Svenska Kullagerfabriken AB
2017 Rodamientos Axiales de Bolas
<http://www.skf.com/pe/products/bearings-units-housings/ball-bearings/thrust-ball-bearings/index.html>
- [62] Pratt Burnerd America
2017 4 Jaw Independent Manual VTL Chucks
<http://www.prattburnerd.com/detail.php?p=MC&I=IN&m=IN-VTL>
- [63] Wikipedia, La Enciclopedia Libre
2017 Protocolo de Control de Transmisión
[https://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo de control de transmisi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_control_de_transmisi%C3%B3n)
- [64] BRÜEL & KJÆR SOUND & VIBRATION MEASUREMENT
2017 Microphone-Preamplifier Combinations
<https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/microphones/microphone-preamplifier-combinations>
- [65] SPL COMPANY - OUTLINE
2009 Outline System ET2-ST2. Electronically controlled dispersion measurement turntable
- [66] ERO-PIC
2017 Motores PaP o motores paso a paso
http://perso.wanadoo.es/luis_ju/ebasica2/mpp_01.html
- [67] LABORATORIO DE ELECTRÓNICA II
2010 Trabajo Práctico N° 11
<http://labo51g3.blogspot.pe/2010/11/>

- [68] CMINOX SA DE CV
2017 Brida Welding Neck
<http://cminox.com/producto/brida-welding-neck/>
- [69] FEINA, THE SUN FOLLOW US
2017 Seguidor Solar FEINA SF70-1EH
<http://www.tracker.cat/seguidor-solar-feina-sf70-1eh-es/?lang=es>
- [70] THE MATHWORKS, INC.
2017 Documentation: Multidimensional Arrays
<https://la.mathworks.com/help/MATLAB/math/multidimensional-arrays.html?requestedDomain=true>
- [71] XUNTA DE GALICIA
2017 MECANISMOS
<http://www.edu.xunta.gal/centros/cpivirxeremedios/?q=system/files/mecanismos.pdf>
- [72] GUIDORZI, Paolo y MASSIMO, Garai
2013 Impulse response measured with MLS or Swept-sine signals: a comparison between the two methods applied to noise barriers measurements. Audio Engineering Society. Convention Paper 8914.

ANEXOS:

Se incluyen como anexos todos los códigos fuentes de los programas desarrollados tanto para el controlador, el analizador PULSE™ y sincronizador en MATLAB® que también se encarga de graficar el patrón de radiación.

