



PROYECTO Y DISEÑO FINAL

DESARROLLO DE UNA FUENTE DE VIBRACIONES CONTROLADAS

AUTOR

RENZO EMANUEL GARCIA

GRADO ACADÉMICO

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA (PLAN 2015 – RES. 375/2014)

DOCENTE TUTOR

DR. ING. ROGELIO LORENZO HECKER

PROFESOR ASOCIADO DE LAS CÁTEDRAS CONOCIMIENTOS DE MATERIALES
Y ELEMENTOS DE MÁQUINAS DE LA UNLPAM.

DOCENTE CO-TUTOR

DR. ING. FEDERICO RAFAEL MASCH

PROFESOR ADJUNTO INTERINO DE ELECTROTECNICA GENERAL Y FÍSICA II DE LA
UNLPAM

GENERAL PICO, LA PAMPA

2023

FECHA DE APROBACIÓN

19 DE SEPTIEMBRE DEL 2023

JURADO

GUSTAVO MARCELO FLORES – FACULTAD DE INGENIERÍA – UNLPAM

MARÍA SOLEDAD MIEZA – FACULTAD DE INGENIERÍA – UNLPAM

ERNESTO DANIEL BERGES – FACULTAD DE INGENIERÍA – UNLPAM





I. ÍNDICE

II. AGRADECIMIENTOS	5
III. RESUMEN - ABSTRACT	6
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPAMIENTO DE LA UNLPAM	10
2.1. COMPONENTES DEL SISTEMA	10
2.1.1. ALTAVOZ.....	11
2.1.2. CAJA ACÚSTICA.....	18
2.1.3. AMPLIFICADOR.....	25
2.1.4. FUENTE DE ALIMENTACIÓN	29
2.1.5. ACELERÓMETRO	31
2.1.6. PLACA ADQUISIDORA DE DATOS.....	33
2.1.6.1. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE	34
2.1.6.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE.....	35
2.1.7. INTERFACE ALTAVOZ - ELEMENTO A ENSAYAR.....	37
2.2. MONTAJE DEL SISTEMA.....	38
3. DESARROLLO DE ECUACIONES TEÓRICAS	40
3.1. TRANSDUCTOR ELECTROMECAÁNICO	40
3.1.1. MODELO DE PARÁMETROS CONCENTRADOS	40
3.1.2. TRANSDUCTOR DE BOBINA MÓVIL.....	41
3.2. ALTAVOZ ELECTROMAGNÉTICO.....	44
3.2.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS.....	44
3.2.2. ECUACIONES DIFERENCIALES DEL ALTAVOZ	47
3.2.3. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.....	49
3.2.3.1. ACELERACIÓN EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENTRADA.....	49



3.2.3.2. IMPEDANCIA DE LA BOBINA.....	51
3.3. MODELO DE FILTRO PASA BAJOS.....	53
4. MODELO DINÁMICO TEÓRICO DEL SHAKER.....	55
4.1. SHAKER: ALTAVOZ.....	55
4.1.2. ACELERACIÓN VS TENSIÓN DE ENTRADA.....	55
4.1.3. IMPEDANCIA DE LA BOBINA.....	57
4.2. SHAKER: ALTAVOZ + ACELERÓMETRO.....	58
5. ESTIMACIÓN DE FUNCIÓN TRANSFERENCIA.....	60
5.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	60
5.1.1. REGISTROS DE DATOS.....	60
5.1.2. ZONA LINEAL: ANÁLISIS DE ARMÓNICOS	62
5.1.2.1. LÍMITES DE GANANCIA Y TENSIÓN DE ENTRADA.....	65
5.1.2.2. FENÓMENO ALIASING	66
5.2. TOOLBOX IDENTIFICATION	67
5.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES	69
5.3.1. DINÁMICA DEL SHAKER: ALTAVOZ.....	69
5.3.2. DINÁMICA DEL SHAKER: ALTAVOZ + ACELERÓMETRO.....	69
6. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL SISTEMA .	70
7. CONCLUSIONES.....	73
8. ANEXOS.....	75
8.1. CÁLCULOS AUXILIARES	75
8.2. PLANOS DE BASE INTERFACE	79
9. BIBLIOGRAFÍA.....	80



II. AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincero reconocimiento a todos aquellos que, desde diferentes roles y posiciones, han contribuido en la elaboración de este trabajo.

En primer lugar, agradezco a mis padres, Jorge y Susana, por sus consejos, su apoyo incondicional y por estar a mi lado en los momentos buenos y no tan buenos. Les agradezco especialmente por la dicha de contar con su presencia. A mi hermana Silvana, quiero agradecerle por acompañarme desde mis inicios en la universidad, siendo un ejemplo de compromiso y responsabilidad, y motivándome a seguir adelante, aun cuando el camino no siempre fue sencillo. ¡Muchas gracias!

También quiero extender mi agradecimiento a mis docentes tutor y co-tutor, Rogelio y Federico, por su dedicación, motivación y disponibilidad para ayudarme en todo momento. Me sentí muy cómodo trabajando con ellos.

Agradezco a mis viejos amigos, compañeros de facultad, conocidos y docentes que formaron parte de mi trayectoria durante todos estos años en la Facultad de Ingeniería. También quiero agradecer al equipo de gestión de la Facultad y Universidad por brindar el apoyo necesario para que los estudiantes se conviertan en profesionales. ¡Muchas gracias a todos!



III. RESUMEN - ABSTRACT

Se ha llevado a cabo el diseño y desarrollo de un Shaker electrodinámico. Éstos son equipos que generan vibraciones para análisis o ensayos de vibraciones en componentes, piezas y sistemas discretos.

Para la construcción de este dispositivo, se ha utilizado un parlante subwoofer que ha sido sometido a diversas modificaciones y acondicionado de manera que pueda abarcar la mayor cantidad de espectro de frecuencia posible. Partiendo de las características físicas del sistema y considerando determinadas simplificaciones, se obtiene una función teórica que determina el comportamiento del mismo. Asimismo, se utiliza una herramienta que provee Matlab, para validar dicho modelo y también para obtener otro modelo a partir de datos experimentales.

El resultado final es un Shaker de diseño eficiente que cumple con las especificaciones requeridas para su correcto funcionamiento, que se adapta perfectamente a las necesidades del usuario y presenta un costo considerablemente menor a los equipos que se comercializan para tal fin.

Palabras claves: fuente de vibraciones – diseño – ensayos – componentes

In this project, i developed and designed an electrodynamic shaker. The equipment generate vibrations to the analysis or vibration test in components, parts and systems.

For the construction of this device, a subwoofer speaker has been used, which has undergone various modifications and conditioning to cover the widest possible frequency spectrum. Starting from the physical characteristics of the system and considering certain simplifications, a theoretical function is derived that determines its behavior. Additionally, a Matlab-provided tool is used to validate this model and also to obtain another model based on experimental data.

The final result is an efficiently designed shaker that meets the specifications required for its proper functioning, perfectly adapts to the user's needs, and has a considerably lower cost compared to commercially available equipment for this purpose.

Key words: shaker – design – test - components



1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la ingeniería existen desarrollos tecnológicos relacionados con el fenómeno de *vibraciones mecánicas*. Un caso de interés actual es el tema de *cosecha de energía* para sistemas autónomos, donde un *transductor piezoeléctrico* permite convertir la energía de las vibraciones mecánicas presentes en una estructura flexible en energía útil. De esta manera, esta energía se puede utilizar para, por ejemplo, alimentar sistemas electrónicos de recolección y transmisión de datos en forma autónoma. Estos sistemas de cosecha de energía se encuentran actualmente en estudio y desarrollo dentro del departamento de Mecatrónica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UNLPam. Una de las tareas en el desarrollo de estos sistemas es el estudio de la respuesta en frecuencia para poder optimizar el proceso de conversión de energía en función del rango de frecuencia dominante que posea la fuente de vibraciones. Esta respuesta en frecuencia debe ser estudiada y/o comprobada de manera experimental, con cual se necesita del equipamiento necesario. Para ello existen **sistemas de laboratorio denominados “Shakers”** que generan vibraciones a sistemas mecánicos a diferentes frecuencias y recolectan la respuesta de los mismos. Estos equipos son conocidos y comerciales, sin embargo, el costo suele ser elevado.

El mercado ofrece diferentes tipos de Shakers para aplicaciones de I+D:

- 1. Electromecánicos:** Usan un campo electromagnético para generar vibraciones controladas mediante una bobina fija y un imán móvil. Son especialmente útiles en aplicaciones que requieren una alta precisión en la frecuencia y amplitud de las vibraciones.
- 2. Piezoeléctricos:** Emplean cristales piezoeléctricos que generan vibraciones al someterlos a señales eléctricas. Son ideales cuando se requiere una alta frecuencia y una respuesta dinámica rápida.
- 3. Hidráulicos:** Utilizan fluidos como aceite para generar vibraciones mediante una bomba y un actuador. Son especialmente útiles cuando se requiere una alta carga y una amplia gama de frecuencias.
- 4. Neumáticos:** Generan vibraciones con aire comprimido mediante un compresor y un actuador neumático. Son ideales cuando se requieren vibraciones suaves y de baja frecuencia.



5. Magnéticos: Usan una bobina móvil en un campo magnético para generar vibraciones controladas. Al tener un principio de funcionamiento similar al electromagnético, se utiliza en situaciones similares, con alta precisión en la frecuencia y amplitud de las vibraciones.

Es importante destacar que existen otros tipos de generadores de vibraciones utilizados en I+D, y la elección del tipo de generador depende de los requisitos específicos de cada aplicación, como el rango de frecuencia, amplitud y carga deseada.

En este proyecto, se ha diseñado y desarrollado un **Shaker magnético**, con el propósito de estudiar el comportamiento de vigas piezoeléctricas de baja masa, por lo que no se requiere vibrar cargas elevadas. Se busca reproducir vibraciones con una respuesta frecuencial de hasta 200 [Hz], valor superior al utilizado para la cosecha de energía con piezoeléctricos [12] y no se requiere grandes desplazamientos en la amplitud del movimiento. En concreto, las especificaciones de diseño son:

- Fuerza senoidal mayor a 0,5[kg.f] de pico.
- Recorrido mayor a 5[mm].
- Reproducir frecuencias hasta de 200 [Hz].

Una manera de desarrollar un equipo con estas características es mediante el uso de un **parlante comercial**, con el diseño adecuado de sus accesorios e interfaces. Lógicamente que este desarrollo propuesto va a tener limitaciones respecto a los comerciales, ya que estos últimos poseen actuadores diseñados para tal fin. Sin embargo, hay experiencias de que los parlantes de audio pueden cumplir un desempeño adecuado al menos en un rango en frecuencia de interés [10] [11].

Para el diseño del Shaker, se tiene que determinar sus características de funcionamiento. Para ello se debe conocer sus características físicas, como también la función de transferencia para obtener su respuesta dinámica en los distintos rangos de frecuencia y determinar cómo va a excitar a los distintos componentes que se puedan ensayar. Dicha función transferencia, se propone de manera teórica y luego se valida con datos experimentales, asimismo se obtiene otra función de transferencia a partir de las experimentaciones con herramientas disponibles en Matlab, dando lugar a resultados satisfactorios.



Además, la metodología empleada para obtener la función de transferencia y la tecnología incorporada en el amplificador (parte del equipamiento del Shaker) pueden presentar comportamientos no lineales en condiciones específicas de uso, lo que podría ocasionar distorsiones en la señal procesada por el equipo y generar vibraciones a frecuencias inesperadas. Para establecer el rango de aplicabilidad de las configuraciones, se lleva a cabo un análisis armónico de los datos experimentales. Este análisis tiene el propósito de determinar tanto la amplitud máxima de la señal de entrada como la ganancia máxima del amplificador del altavoz. Dichos datos nos brindan la confianza necesaria para asegurar el comportamiento lineal del equipo en el rango de frecuencia deseado.

En el capítulo dos, se proporciona un detalle de la selección y descripción de cada uno de los componentes del sistema experimental. Además, se expone el procedimiento del montaje llevado a cabo en nuestra facultad.

En el tercer capítulo se desarrollan las ecuaciones teóricas del comportamiento de algunos de los componentes del sistema. En primer lugar, se realiza una revisión de los modelos matemáticos de transductores electromecánicos. Posteriormente, se realiza una revisión exhaustiva del modelo matemático para la dinámica del sistema electromecánico imán permanente – bobina en movimiento. Finalmente, se determina el modelo matemático de la dinámica de un altavoz y de un filtro pasa bajos.

En el cuarto capítulo, se presentan los modelos teóricos de la fuente de vibraciones, los cuales posteriormente son convalidados de manera experimental en el capítulo cinco, donde también se detalla la metodología experimental y se realiza el análisis de armónicos de los datos experimentales.

En el sexto capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos en el proceso de validación del modelo teórico de la dinámica del sistema de vibraciones controladas desarrollado. Finalmente, en el capítulo siete, se presentan las conclusiones de este trabajo.



2. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPAMIENTO DE LA UNLPAM

En esta sección, se realiza la selección y descripción de cada uno de los elementos que componen el sistema. Se definen algunos de los parámetros relevantes de los componentes que son necesarios para su selección y/o para el desarrollo teórico de su dinámica.

2.1. COMPONENTES DEL SISTEMA

Para determinar los componentes del sistema, se comienza analizando las prestaciones de un Shaker magnético comercial que se ajuste a las necesidades del proyecto de recolección de energía mediante vigas piezoeléctricas. Al investigar en el mercado, se identifica un dispositivo de la compañía Labwork Inc, específicamente el modelo ET-132-203 (*Figura 2.1*), que posee características útiles para realizar las experimentaciones [15].

ET-132-203 Electrodynamic Transducer

Labworks Inc.



Descripción

- Fuerza senoidal de 4,5 [lbf] pico.
- Recorrido de 0,20 [in].
- Inserto roscado para montaje de carga.
- Bajo campo magnético disperso.
- Rango de frecuencia de DC a 11[kHz].
- Base de montaje tipo "trunnion"

Figura 2.1: Transductor magnético comercial. Fuente: [15]

Evidentemente, la construcción de un Shaker, partiendo como componente central un altavoz no va a presentar mejores condiciones de funcionamiento que un Shaker comercial. Sin embargo, para los requerimientos que se necesita en el laboratorio de Mecatrónica aplicada, se puede obtener resultados realmente satisfactorios.

El sistema empleado en el laboratorio (*Figura 2.2*) se compone de una fuente de vibraciones que abarca tanto el amplificador como el subconjunto altavoz-caja acústica. Se utiliza un sensor acelerómetro para medir las vibraciones en términos de aceleración y frecuencia. Por otra parte, se incorpora una fuente de alimentación de 12 [V] que suministra la energía necesaria para



generar las vibraciones, junto con un generador de funciones que emite la señal que determina la amplitud en voltios y la frecuencia en hertzios para el Shaker.

Asimismo, se emplea una placa adquisidora de datos para registrar tanto los datos medidos por el acelerómetro como la señal emitida por el generador de funciones. La totalidad de los datos se visualiza en una notebook.



Figura 2.2: Diagrama en bloques del set-up experimental.

2.1.1. ALTAVOZ

Para seleccionar el altavoz, la primera variable que se analiza es la capacidad del Shaker de brindar la fuerza necesaria para hacer vibrar elemento a ensayar, la base interface y el sensor. Este factor está fuertemente vinculado a varias características del altavoz, como también a la masa total que se ensaya sobre el instrumento.

Las características del altavoz que determinan la fuerza que se genera en las vibraciones del cono del altavoz son las siguientes:

- **Diseño del cono:** La forma, el tamaño y el material del cono del altavoz son elementos determinantes al analizar los esfuerzos que se generan. Los conos más grandes, ligeros y rígidos tienden a producir una mayor fuerza mecánica.
- **Impedancia:** Influye en la capacidad de generar fuerza mecánica debido a su impacto en la eficiencia de la transferencia de energía eléctrica al movimiento físico. Si la impedancia del altavoz es baja, la corriente puede fluir con mayor facilidad a través de la bobina de voz. Esto resulta en una mayor eficiencia, logrando generar mayores esfuerzos. Por el contrario, si la impedancia es alta, el altavoz tiene una menor eficiencia para transformar energía eléctrica en movimiento mecánico.
- **Factor de fuerza electromagnético:** Es una medida de la eficiencia con la que la corriente eléctrica se convierte en fuerza mecánica en el altavoz. Mientras más alto sea este factor, más eficiente es el equipo para transformar la señal eléctrica en esfuerzo mecánico. Este



coeficiente, dado por el fabricante, engloba dos características primordiales en el diseño del altavoz: bobina (número de espiras y diámetro del alambre) y campo magnético (intensidad y distribución). Se encuentra en los manuales de los altavoces y proporciona el valor de la fuerza producida por la bobina de voz en el entrehierro ante una corriente de 1[A].

- **Diseño del centrador y suspensión:** La resistencia de los materiales con los que se fabrica el centrador y suspensión van a determinar los esfuerzos máximos que soporta el altavoz.
- **Potencia eléctrica:** La potencia eléctrica se convierte en movimiento del cono a través de la interacción entre la corriente eléctrica en la bobina de voz y el campo magnético del imán permanente. Cuanta más potencia se aplique, mayor será la fuerza generada por el cono.

Por otro lado, al analizar la masa total que se somete a los ensayos, se considera el valor del coeficiente de masa mecánica dada por el fabricante y la masa añadida por la interface, el sensor acelerómetro y el piezoeléctrico. El valor total, considerando las características técnicas de los altavoces comerciales de gran porte (factor de fuerza), resulta despreciable frente a la fuerza mecánica que pueden generar con su cono.

Otras variables que se consideran al seleccionar el altavoz para el Shaker es:

- El recorrido máximo que puede tener el cono del altavoz, tiene que ser igual o mayor de 5[mm].
- La geometría de la tapa del cono debe ser apta para adosarle la base interface.
- La respuesta en frecuencia lineal debe ser de la frecuencia más baja posible, hasta los 200[Hz] por lo menos.

Con todas las consideraciones mencionadas, se opta por utilizar un **subwoofer Pioneer TS-A300D4 de 12”** [5] debido a está diseñado para reproducir frecuencias bajas y posee un alto porte de tamaño y potencia. Este altavoz (*Fig. 2.3*) tiene la particularidad de que su bobina está dividida en dos partes, dando la posibilidad de conectarlo en distintas configuraciones y de esa manera poder cambia su impedancia en conjunto a otros parámetros. Esto nos permite, por ejemplo, cambiar la impedancia que le presenta el altavoz al amplificador.



En la siguiente tabla se describe todos los datos del subwoofer doble bobina [5], adquirido por la UNLPam, de los cuales, algunos de ellos son los parámetros que están presentes es las funciones de transferencia.



Figura 2.3: Subwoofer Pioneer TS-A300D4 de 12". Fuente: [5]

Datos del subwoofer Pioneer TS-A300D4 de 12"		
1	Gestión continua de la potencia	500 W_{rms}
2	Máxima potencia de música	1500 W
3	Impedancia nominal	dual 4 Ω
4	Sensibilidad	77 dB (1W/1m)
5	Respuesta de frecuencia	20 Hz To 2.3 kHz (-20 dB)
6	Peso del imán	1700 g (60 oz)
7	Desplazamiento	1.54 liters (0.054 cu. ft)
8	R_{evc}	dual 4.3 Ω
9	L_{evc}	7.73 mH (8 Ω)/1.93 mH (2 Ω)
10	F_S	25 Hz
11	Q_{ms}	5.62
12	Q_{es}	0.78
13	Q_{ts}	0.69
14	V_{as}	87.1 liters/3.07 cu. ft
15	R_{ms}	4.95 N. s/m
16	M_{ms}	181 g
17	C_{ms}	23.3 * 10 ⁻⁵ m/N
18	Diámetro	256mm / 10.1 inch
19	BL	17.7 Tm (8 Ω)/8.9 Tm (2 Ω)
20	X_{max}	10.1mm / 0.40 inch

Tabla 2.1: Características del altavoz



A continuación, se detallan algunos de los parámetros del altavoz que resultan relevantes tanto para comprender su elección como para el desarrollo teórico de la dinámica de Shaker.

1. **Gestión continua de potencia:** Es la potencia RMS (Root Medium Square) que se garantiza que el altavoz puede soportar durante un período prolongado de tiempo, con ruido rosa (ruido cuyo nivel de presión sonora está caracterizado por una densidad espectral inversamente proporcional a la frecuencia) como entrada.

$$P = 500 W_{rms} = \left[\frac{kg \cdot m^2}{s^3} \right]$$

2. **Máxima potencia de música:** Es la potencia que se garantiza que el altavoz puede soportar durante un intervalo determinado de tiempo, 10[ms] es lo habitual, ante una señal de entrada determinada.

$$P_{max} = 1500 W = \left[\frac{kg \cdot m^2}{s^3} \right]$$

3. **Impedancia nominal:** Es como viene especificada la carga que ofrece un altavoz a un amplificador y su unidad es en ohmios. Es un valor poco exacto, ya que la impedancia varía con la frecuencia. En general, se la define [6] como la impedancia que presenta el altavoz considerando una señal de entrada con una frecuencia de 1[kHz]. En ocasiones, los fabricantes, especifican a este valor como el valor medio de la impedancia debido a que es una magnitud que varía con la frecuencia de la señal.

$$Z = dual 4\Omega = \left[\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} \right]$$

4. **Sensibilidad:** Se refiere a la medida de la eficiencia con la que un altavoz convierte la energía eléctrica en energía acústica, es decir, la capacidad del altavoz para producir un nivel de sonido determinado con una cantidad específica de energía eléctrica. La sensibilidad se mide en decibelios (dB) y se expresa como la cantidad de presión sonora producida por el altavoz a una distancia específica, generalmente a un metro, con una entrada de potencia específica, por lo general un vatio.

5. **Respuesta en frecuencia:** Es un parámetro que indica la variación de la salida ante un estímulo de entrada con respecto a la frecuencia. En el audio, un equipo de calidad debe poder reproducir el espectro audible correctamente. En este caso, se tiene una buena reproducción de



los tonos graves (16Hz a 256Hz, las primeras 4 octavas) y de tonos medios (256Hz a 2kHz, correspondiente a las octavas quinta, sexta y séptima).

8. Resistencia de la bobina del altavoz: Es la resistencia DC de la bobina de voz y al utilizar sus dos bobinas en serie o paralelo se obtienen distintos valores.

$$R = R_{evc} = dual \ 4.3\Omega = \left[\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} \right]$$

9. Inductancia de la bobina del altavoz real: Es la inductancia de la bobina de voz en el entrehierro y se mide a 1kHz habitualmente, siempre que la frecuencia de resonancia (al aire libre) del subwoofer sea muy diferente de 1kHz. En este caso, es 25 [Hz]. Al utilizar sus dos bobinas en serie o paralelo se obtienen distintos valores.

$$L = L_{evc} = 0,00773 \ H \ (8\Omega) / 0,00193 \ H \ (2\Omega) = \left[\frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} \right]$$

10. Frecuencia de resonancia libre: Es la frecuencia a la cual el altavoz se mueve al aire libre ante cualquier perturbación. A partir de este valor, el altavoz empieza a reproducir el sonido correctamente, aunque también depende de otros parámetros eléctricos como el Qts. Es decir, por debajo de esta frecuencia, la bobina no es capaz de producir fuerza suficiente para mover el cono adecuadamente, y cuanto menor sea la frecuencia de la señal inyectada, mayor será el efecto de imposibilidad. La frecuencia de resonancia es el lugar donde se tiene la más alta impedancia del altavoz; se puede barrer en frecuencia con un generador de señal hasta encontrar Fs.

11. Factor de calidad mecánico: Este parámetro es una medida de la eficiencia con la que el altavoz convierte la energía mecánica en energía acústica. Un altavoz de alta calidad mecánica es capaz de moverse con facilidad, sin que se produzcan vibraciones no deseadas que afecten a la calidad del sonido. El factor de calidad mecánico se expresa como Q_{ms} , y se mide en unidades de ohmios. Cuanto mayor sea el valor de Q_{ms} , más eficiente será el altavoz en la conversión de la energía mecánica en energía acústica.

12. Factor de calidad eléctrico: Es una medida de la eficiencia con la que el altavoz convierte la energía eléctrica en energía mecánica. Se mide como Q_{es} y se expresa en unidades de ohmios. Un altavoz con un alto valor de Q_{es} es capaz de responder mejor a la señal eléctrica que recibe,



lo que se traduce en una mayor eficiencia en la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica.

13. Factor de calidad total: Este parámetro se refiere a la amortiguación del altavoz y se mide como Q_{ts} . Es el resultado de la combinación de los factores de calidad eléctrico y mecánico, y se expresa en unidades de ohmios. Cuanto más bajo sea el valor de Q_{ts} , mayor será la amortiguación del altavoz, lo que significa que el altavoz es más eficiente en la conversión de la energía eléctrica en energía acústica.

14. Volumen equivalente de aire: Este parámetro es una medida del volumen de aire que tiene un altavoz de forma equivalente a su suspensión y la carga del recinto cerrado. Se mide en unidades de litros y se representa como V_{as} . El volumen equivalente de aire es importante para el diseño de cajas acústicas, ya que proporciona información sobre el tamaño y la forma óptima del recinto para el altavoz en cuestión.

15. Resistencia mecánica: Representa las pérdidas mecánicas que provocan el centrador y la suspensión al limitar el desplazamiento del cono. Tiene unidades de kilogramos/segundos.

$$c = R_{ms} = 4,95 \frac{N \cdot s}{m} = \left[\frac{\frac{kg \cdot m}{s^2} \cdot s}{m} = \frac{kg}{s} \right]$$

16. Masa mecánica: Representa el peso total de la bobina, el cono y la masa de aire que ve ésta. Su efecto sobre la respuesta en frecuencia es determinante, a mayor peso, menor frecuencia de resonancia. Este valor será modificado una vez colocando el acople para el acelerómetro; con lo cual, hay que medir cuanta masa se le añade al sistema.

$$m = M_{ms} = 181 \text{ g} = 0,181 \text{ kg}$$

17. Elasticidad mecánica: Representa la elasticidad del conjunto centrador-suspensión. Una elasticidad elevada significaría una combinación de centrador y suspensión muy flexible, mientras que una elasticidad baja correspondería a una combinación rígida. Tiene unidades de metros / Newton.

$$C_{ms} = \frac{1}{k} = 23,3 \cdot 10^{-5} \frac{m}{N}$$
$$k = 4291,845494 \frac{N}{m} \left[\frac{\frac{kg \cdot m}{s^2}}{m} = \frac{kg}{s^2} \right]$$



18. Diámetro: Es una medida fundamental que se utiliza para determinar el tamaño físico del altavoz, y tiene un impacto significativo en sus características de rendimiento, incluyendo la respuesta de frecuencia, la eficiencia y la capacidad de manejo de potencia. En general, un altavoz de mayor diámetro tiende a ser más eficiente y capaz de manejar niveles de potencia más altos, mientras que uno de menor diámetro puede ser más preciso y tener una mejor respuesta de frecuencia en las frecuencias más altas.

19. Factor de fuerza: Valor de la fuerza producida por la bobina de voz en el entrehierro ante una corriente de 1[A]. Es decir, caracteriza la capacidad de transformación de energía eléctrica a energía mecánica del transductor.

$$T = BL = 17.7 \text{ Tm } (8\Omega) / 8.9 \text{ Tm } (2\Omega) = \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{A} \cdot \text{s}^2} \right]$$

20. Excursión máxima: se refiere a la distancia máxima que puede moverse el cono del altavoz en ambas direcciones (hacia adentro y hacia afuera) sin que se produzcan daños físicos en el mismo. Esta medida es importante para determinar la capacidad de un altavoz para manejar niveles altos de volumen y para evitar la distorsión del sonido. La excursión máxima se expresa en milímetros (mm) y se relaciona directamente con la potencia de entrada y la impedancia del altavoz.



2.1.2. CAJA ACÚSTICA

El uso de un altavoz sin una caja acústica provoca una vibración excesiva y no controlada del cono del altavoz, el sobrecalentamiento de la bobina del altavoz, una respuesta de frecuencia no uniforme y daños físicos. Por lo tanto, es necesario utilizar una caja acústica adecuada para proteger el altavoz y garantizar una respuesta en frecuencia plana. A continuación, se determina el tipo de caja a utilizar, dimensiones y materiales con lo que fue fabricada la caja acústica perteneciente al Laboratorio de Mecatrónica Aplicada de la facultad.

Se opta por un diseño "Bass-Reflex" como se aprecia en la *Figura 2.4*, debido a que posee una geometría tal que aprovecha la onda de fase opuesta que se genera en el dorso del cono del altavoz. De esta manera, con un correcto diseño y construcción, se puede obtener una frecuencia de resonancia F_B del conjunto caja-altavoz inferior a la frecuencia de resonancia al aire libre F_s del altavoz.

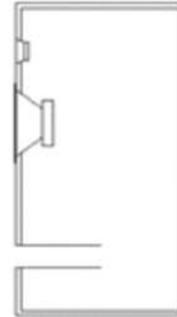


Figura 2.4: Caja Bass-Reflex. Fuente: [6]

Esto se debe a que parte de la energía que se pierde con la fase opuesta del altavoz es aprovechada por un ducto colocado en la caja llamado **respiradero** o **port**. La masa de aire que está en este respiradero va a ser puesta en vibración por el volumen de aire comprendido en la caja. Con lo cual, se tiene dos masas: la que mueve el altavoz y el aire comprendido en el respiradero, separadas por una tercera masa, el volumen de aire comprendido en la caja. A muy baja frecuencia, el sistema estará en oposición de fase. Al subir la frecuencia, se pondrá en fase en la resonancia, para volver a descender a oposición de fase. Debido a este fenómeno, la presión acústica podrá aumentar y la caja tendrá, en general, una octava más en los graves.

Haciendo variar el volumen de la caja y las dimensiones del respiradero, será posible optimizar las características del sistema. Para determinar las dimensiones finales de la caja acústica, se utiliza un software de diseño denominado "WinISD 0.7.0.950"[7]. Se basa en los datos técnicos del altavoz y tipo de caja para brindar información de la respuesta en frecuencia (módulo y fase), volumen y frecuencia de resonancia del conjunto.

Se utiliza como **criterio de diseño**, que el **subconjunto altavoz-caja tenga la respuesta con mayor ancho de banda posible**.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO



Al crear un nuevo proyecto, se despliega una ventana con diferentes modelos de altavoces precargados en el programa. Cada uno de ellos tiene las características necesarias para el diseño de la caja acústica. Como el altavoz adquirido por el grupo de Mecatrónica Aplicada de la Facultad de Ingeniería no está disponible en la lista, se añaden los datos del altavoz con las características descritas en el manual del altavoz [5].

En las figuras 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8 se aprecia los datos a completar en el software para el diseño de la caja acústica. Los datos que aparecen en color verde son aquellos que son colocados por el usuario, mientras que los datos en color azul son autocompletados por el programa debido a la relación entre ellos.

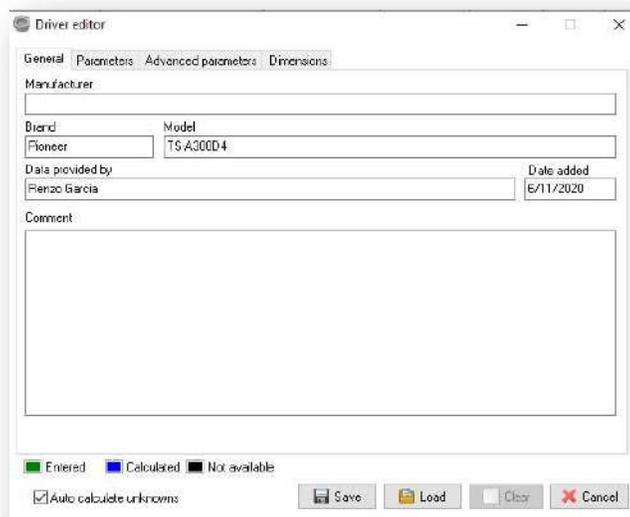


Figura 2.5: Pantalla principal para cargar datos del altavoz

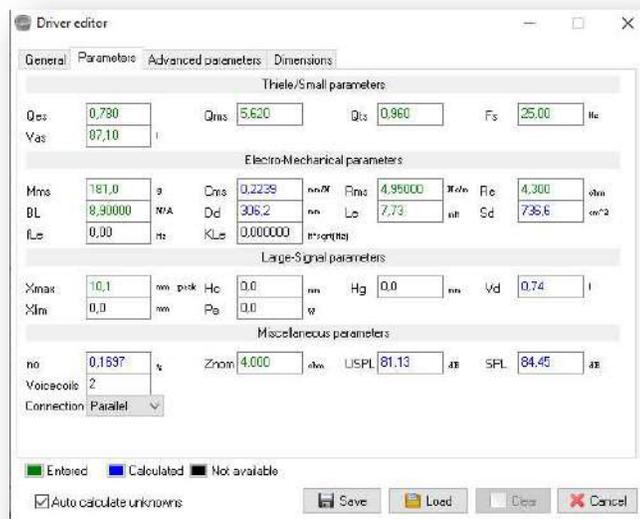


Figura 2.6: Parámetros

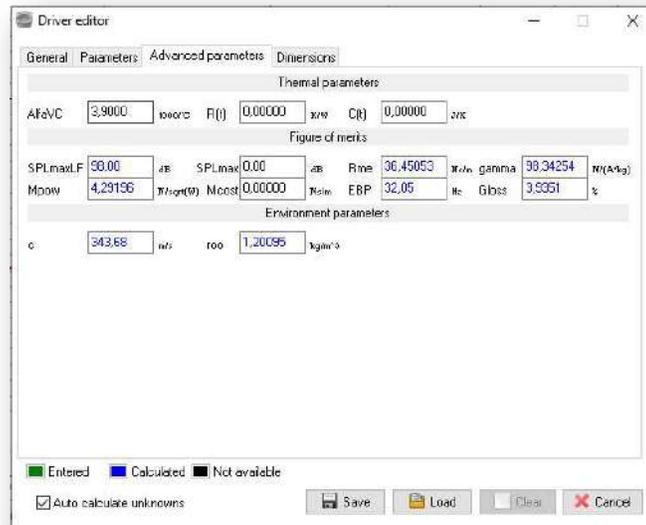


Figura 2.7: Parámetros

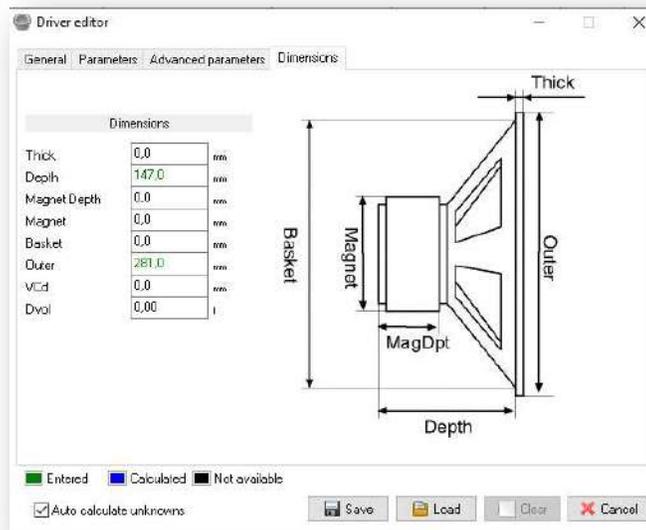


Figura 2.8: Dimensiones del altavoz

Una vez que se completaron los datos necesarios del altavoz, se analiza la variación que tiene la respuesta en frecuencia del simulador en base a la variación del volumen de la caja acústica, el diámetro del respiradero y la frecuencia de resonancia objetivo del sistema.

Se fijan algunos parámetros del sistema:

- **Volumen de la caja se limita en 60 litros.** A mayor volumen, se obtiene menor frecuencia de resonancia, pero por encima de los 300 litros no se tiene cambios significativos. Sin embargo, por cuestiones constructivas, es impráctico trabajar con tal volumen.



- **Frecuencia de resonancia objetivo: 22[Hz]**. Se tiene en consideración la frecuencia de resonancia al aire libre del altavoz F_s de 25 [Hz], por lo que con un buen diseño se estima poder obtener un valor menor.
- **Diámetro del respiradero: 58,62[mm]**. Se fija en base al material disponible en el laboratorio de Mecatrónica aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UNLPam.

El bode del software, con las especificaciones dadas, resulta con una frecuencia de resonancia del sistema de **47,06[Hz]** y una ganancia de **3,73[dB]** (Figura 2.9).

La **discrepancia** entre la frecuencia objetivo colocada en el software y la resultante, se debe a que con la dimensión que se propone como límite (60 litros) afecta la capacidad del subconjunto altavoz-caja a llegar a frecuencias tan bajas. Esto se debe a que, en el cálculo, se tiene involucrados parámetros propios del altavoz que requieren de un litraje mayor de caja acústica para llegar a los 22 hertz propuestos como objetivo [6].

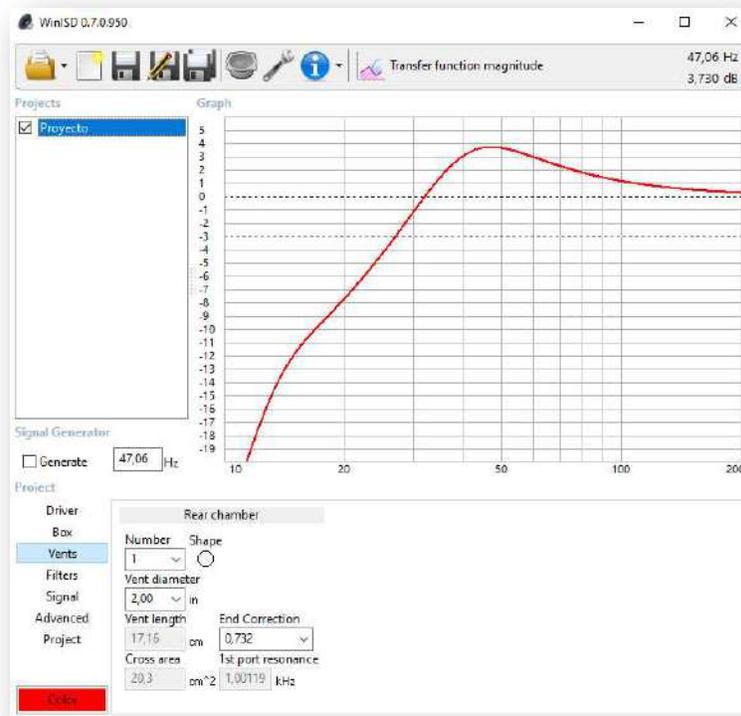


Figura 2.9: Respuesta en frecuencia del altavoz con la caja acústica dada por el software



Mientras que la fase tiene una respuesta como se muestra en la *figura 2.10*:

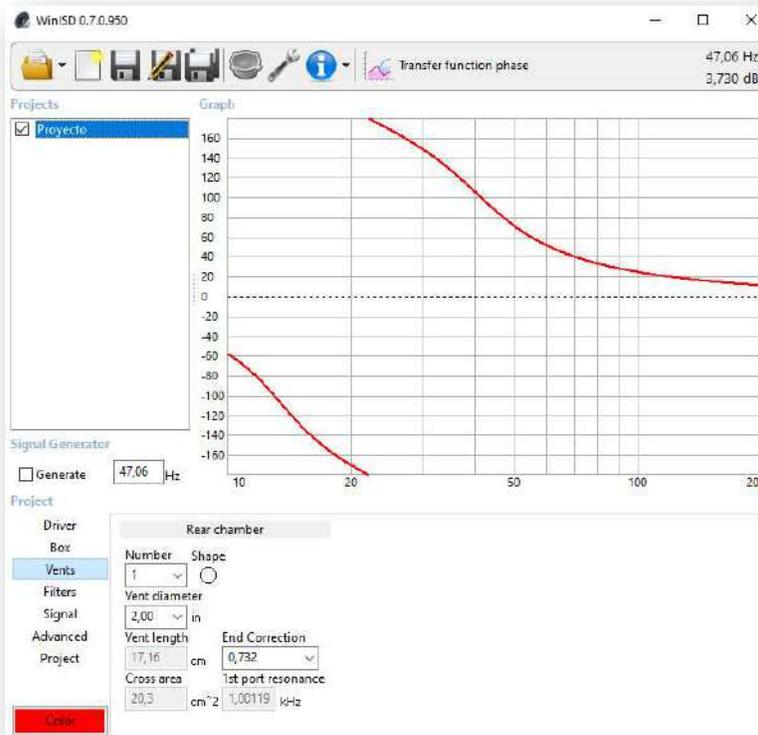


Figura 2.10: Respuesta en frecuencia del altavoz con la caja acústica con los parámetros del software

Hasta aquí se detalla el tipo de caja acústica y sus dimensiones con una respuesta frecuencial simulada por el software. A continuación, se detalla la elección de los materiales utilizados en relación a las exigencias del sistema y algunas consideraciones en el armado.

Los materiales empleados en las cajas acústicas deben combinar rigidez y amortiguación con el fin de prevenir vibraciones indeseadas y disipar energía vibratoria, evitando cualquier posibilidad de resonancia entre la señal a reproducir y la frecuencia natural de los materiales. Además, es importante mencionar que una masa adecuada tiene el beneficio de mejorar las frecuencias bajas sin poner en compromiso la respuesta transitoria.

En este contexto, el material seleccionado para la construcción de la caja es el fenólico, debido a sus reconocidas propiedades para la fabricación de cajas acústicas. La estructura de capas alternadas unidas mediante resinas fenólicas proporciona a la caja la resistencia y rigidez necesarias para enfrentar las vibraciones y tensiones generadas por el sonido. Además de su durabilidad frente al desgaste, impactos y humedad, el fenólico conserva su estabilidad dimensional a lo largo del tiempo, manteniendo así la integridad de la forma y las características acústicas.



En cuanto al interior de la caja (*figura 2.11*), se reviste con láminas de corcho, ya que éstas contribuyen a reducir las reflexiones internas de la onda en fase opuesta, lo cual ayuda de manera significativa a minimizar las distorsiones originadas por las vibraciones.



Figura 2.11: Interior de la caja acústica

En la *figura 2.12* se ilustra el método de sujeción del ducto de la caja. Su objetivo es permitir ajustes en la longitud del ducto en caso de requerirse para usos futuros del sistema. Al modificar la longitud, se altera la respuesta en frecuencia del sistema, como se evidenció en el software de diseño de cajas acústicas.



Figura 2.12: ducto o respiradero de la caja acústica



Finalmente, se obtiene una caja hecha con fenólico de 18 [mm] de espesor y un recubrimiento interno de lámina de corcho de 5 [mm] (Fig. 2.13) y con las siguientes dimensiones internas:

Altura: 30 [cm]

Ancho: 50 [cm]

Largo: 40 [cm]

Diámetro del respiradero: 58, 62[mm]

Largo del respiradero: 17, 1[cm]

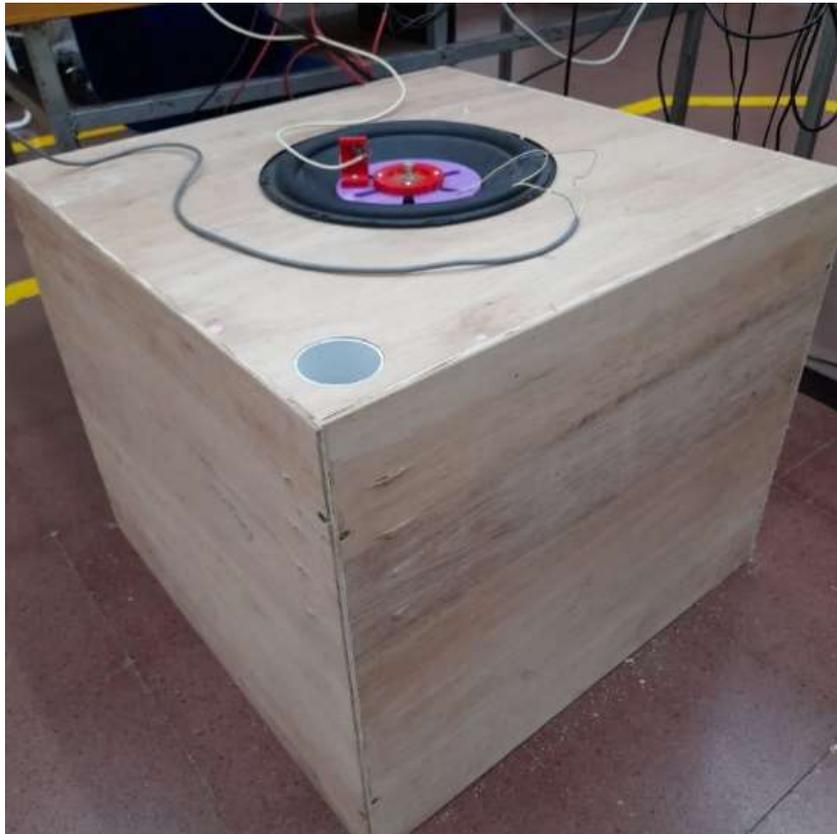


Figura 2.13: Altavoz con caja acústica del laboratorio de Mecatrónica Aplicada de la UNLPam



2.1.3. AMPLIFICADOR

Al determinar qué amplificador implementar en el sistema, es fundamental considerar no solo las características específicas del amplificador, sino también varias cualidades del altavoz para asegurar una combinación adecuada y un rendimiento óptimo. Algunas de estas características a tener en cuenta incluyen:

- **Potencia RMS:** El amplificador seleccionado debe suministrar la potencia RMS recomendada por el fabricante del subwoofer. En este caso, se tiene $500 W_{rms}$.
- **Impedancia:** La impedancia del altavoz debe coincidir con la impedancia mínima que recomienda el uso del amplificador. En este caso, se puede configurar una impedancia de $2[\Omega]$ (paralelo) o $8[\Omega]$ (serie) dependiendo la conexión de las bobinas que se realice.
- **Respuesta en frecuencia:** El amplificador y el altavoz tienen que estar optimizados para trabajar juntos dentro del rango de frecuencias adecuado. En este caso, se busca reproducir frecuencias bajas, el altavoz especifica un rango de frecuencia de $20 [Hz]$ a $2,3 [kHz]$ (-20 dB).

El amplificador cuenta con características cruciales para el diseño y procesamiento de la señal, incluyendo la sensibilidad de entrada y la distorsión armónica total (THD). La sensibilidad de entrada establece el margen de tensiones en el cual el amplificador puede ofrecer una señal de salida de calidad suficiente para alimentar el altavoz. Por otro lado, la distorsión armónica total refleja el nivel de distorsión introducido en una señal durante el proceso de amplificación. Se persigue mantener un nivel bajo de THD, considerando como bajo un valor inferior al 1% y como alto un valor superior al 10%.

Después de un análisis del mercado, la UNLPam ha adquirido el amplificador "RC-802" de la marca B52. Este modelo ofrece una potencia de $800[W]$ en un solo canal, superando la potencia RMS del altavoz. Además, presenta una respuesta en frecuencia que abarca todo el rango audible ($20[Hz]$ a $20[kHz]$), ofreciendo diversas configuraciones de filtros como opción.

En la *Tabla 2.2* se presentan en detalle todas las características relevantes del amplificador para el proyecto, seguidas de una descripción de las configuraciones necesarias para su utilización.



Datos del Amplificador de potencia para automóvil		
1	Marca	B52
2	Modelo	RC-802
3	Canales	2
4	Potencia RMS @ 14.4VDC	
5	Potencia continua @ 2Ω	175 W x 2
6	Máxima Potencia @ 2Ω	400 W x 2
7	Máxima Potencia Puente @ 4Ω	800 W x 1
8	Impedancia mínima del parlante	2Ω
9	Distorsión THD	0.01%
10	Respuesta de frecuencia	20 Hz ~20 kHz
11	Sensibilidad de entrada	0.2 V ~ + 6 V
12	Impedancia de entrada	10 kΩ
13	Relación Señal - Ruido	98 dB
14	Separación de canal	50 dB
15	Red Crossover	
16	Filtro pasa bajos	50 Hz ~250 Hz
17	Aumento de bajos (Bass Boost)	0 dB / +6 dB / +12 dB
18	Filtro pasa altos	100 Hz ~2.2 kHz
19	Índice del fusible	30A x 1
20	Medidas largo x ancho x alto	295 x 267 x 61 mm

Tabla 2.2: Características del amplificador. Fuente: [8]

Debido a que está diseñado para amplificar altavoces dentro de todo el rango audible de frecuencias, este amplificador posee distintas configuraciones para aplicar filtros y acotar el ancho de banda, con el fin de optimizar su funcionamiento. El amplificador cuenta con varios controles de ecualización que le permiten ajustar el sonido a su gusto (Figura 2.13 y 2.14). A continuación, se explica cómo configurar cada uno de ellos:

- **GANANCIA**

Este control ajusta la ganancia de entrada del amplificador. Para configurarlo correctamente, siga estos pasos:

- Asegúrese de que el volumen de su fuente de audio (por ejemplo, su radio o reproductor de música) esté configurado al nivel que normalmente escucharía su música.
- Gire el control de ganancia hacia la izquierda (en sentido antihorario) hasta el mínimo.



- Encienda su sistema de sonido y ajuste el volumen de su amplificador al nivel deseado.
- Gire el control de ganancia hacia la derecha (en sentido horario) hasta que el indicador de sobrecarga (o-over) parpadee ocasionalmente en los momentos más fuertes de su música. Una vez que lo haga, gire el control de ganancia ligeramente hacia la izquierda hasta que deje de parpadear.

- **CROSSOVER (X-OVER)**

Esta configuración es utilizada para dividir la frecuencia de audio a reproducir dependiendo del altavoz que se quiera utilizar. Esto permite que cada altavoz se especialice en la reproducción de un rango específico de frecuencia, lo que resulta en una mejor calidad de sonido.

Para configurar este parámetro, en primer lugar, hay que determinar la frecuencia de corte deseada para el sistema de audio. Esta es la frecuencia en la que el crossover dividirá la señal de audio en dos partes: una para las frecuencias bajas (subwoofers, woofers) y otra para las frecuencias altas (altavoces, componentes, drive, etc.). El amplificador cuenta con tres modos de operación: Full range, HPF y LPF, al seleccionar algunos de ellos se tiene:

- **Full Range:** envía la señal de audio completa (todas las frecuencias) a los altavoces.
- **HPF (High Pass Filter):** Este control ajusta la frecuencia de corte del filtro de paso alto. El filtro de paso alto corta las frecuencias más bajas que pueden dañar los altavoces y permite que las frecuencias más altas pasen a través de ellos. Para configurarlo correctamente, gire el control HPF hacia la derecha (en sentido horario) hasta la frecuencia deseada. La frecuencia de corte recomendada según el fabricante es de 80 Hz.
- **LPF (Low Pass Filter):** Este control ajusta la frecuencia de corte del filtro de paso bajo. El filtro de paso bajo corta las frecuencias más altas que pueden distorsionar el sonido y permite que las frecuencias más bajas pasen a través de ellos. Para configurarlo correctamente, gire el control LPF hacia la derecha (en



sentido horario) hasta la frecuencia deseada. La frecuencia de corte recomendada es de 250 Hz.

- BASS BOOST

Es una función que aumenta selectivamente el nivel de las frecuencias bajas o graves en la señal de audio. Es similar a un control de tono, pero en lugar de ajustar el nivel de todas las frecuencias bajas y altas, sólo aumenta el nivel de las frecuencias bajas en la señal de audio.

Puede configurarse en diferentes niveles, 0dB, 6dB o 12dB, para permitir al usuario ajustar el nivel de graves según sus preferencias personales. Sin embargo, es importante tener cuidado al utilizar esta función, ya que un aumento excesivo del nivel de graves puede hacer que el sonido se vuelva distorsionado o incluso dañar los altavoces del sistema de sonido.



Figura 2.13: Lado del amplificador donde se conecta el altavoz y la alimentación



Figura 2.14: Lado del amplificador donde se conecta el generador de señales y se tiene las configuraciones



2.1.4. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

En el proceso de selección de la fuente de alimentación del sistema, se tienen en cuenta diversas características tanto del amplificador como del altavoz. Además, se realiza una evaluación de la demanda de potencia en las distintas configuraciones de conexión de las bobinas del altavoz.

Al analizar la potencia requerida por el sistema, se observa que el amplificador tendrá limitaciones de potencia variables para la amplificación en función de la impedancia de la carga (altavoz). Además, la potencia puente del amplificador supera la potencia RMS del altavoz, lo que lleva a considerar que el valor de potencia necesario está determinado por la potencia nominal del altavoz.

En relación a la tensión y potencia necesaria para el sistema, dado que se trata de un equipo de audio para automóvil, se utiliza una tensión de 12[VDC] con una corriente máxima de 30[A].

Teniendo en cuenta todos los factores mencionados, la UNLPam ha adquirido la fuente de alimentación (*Fig. 2.15*) modelo SFL12300 de la marca Megalite, la cual presenta las características detalladas en la *Tabla 2.3*.

Marca	Megalite	
Modelo	SFL12300	
Origen	China	
Características eléctricas	Entrada	
	Tensión	220[Vca]
	Frecuencia	50/60[Hz]
	Corriente nominal	2,05[A]
	Potencia	360[W]
	Protección eléctrica	Clase I
	Salida	
	Tensión	12[Vcc]
	Corriente máxima	30[A]

Tabla 2.3: Características de la fuente de alimentación.



Figura 2.15: Fuente de alimentación del laboratorio de Mecatrónica Aplicada



2.1.5. ACELERÓMETRO

Con el fin de poder visualizar el comportamiento del Shaker, se ve la necesidad de colocar un sensor que registra la aceleración y frecuencia del elemento que se ensaya. De esta manera, se dispone de los datos de las experimentaciones para procesar y validar el modelo teórico que se propone en la sección 4.

Para seleccionar el sensor adecuado, se investigó entre las tecnologías de menor masa, con el propósito de minimizar cualquier alteración en la respuesta en frecuencia del Shaker. En este sentido, se optó por el uso del ADXL203 de Analog Devices (*Fig. 2.16*) un acelerómetro diseñado para medir la aceleración en una o dos direcciones en aplicaciones, como sistemas de navegación inercial, monitores de vibración, sistemas de seguridad automotriz y dispositivos portátiles [9]. Este dispositivo de 2 ejes puede medir la aceleración en dos direcciones perpendiculares y tiene un rango de medición de $\pm 1,7g$, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren alta precisión en la medición de la aceleración.



Figura 2.16: Acelerómetro ADXL203

El acelerómetro utiliza el principio de capacitancia variable, con dos masas suspendidas por resortes en un marco, donde la aceleración en una dirección hace que una de las masas se mueva en relación con la otra, lo que cambia la capacitancia entre ellas. Esta señal eléctrica se convierte en una medición de la magnitud y dirección de la aceleración.

El ADXL203 es un dispositivo de bajo consumo de energía que utiliza una interfaz de comunicación SPI para conectarse con otros dispositivos electrónicos y **tiene un filtro de paso bajo incorporado para reducir el ruido y mejorar la precisión de la medición.**

En la *Tabla 2.4*, se describen las características del acelerómetro [9] necesarias para las conexiones en el sistema. La temperatura de funcionamiento es de $-40^{\circ}C$ a $+125^{\circ}C$, con tensión $V_s = 5V$, capacitores de filtro pasa bajo $C_x = C_y = 0,1\mu F$ y aceleración = 0 g (a menos



que se indique lo contrario). Todas las especificaciones mínimas y máximas están garantizadas. Todas las especificaciones típicas no están garantizadas.

ADXL203					
Parámetros	Condiciones de prueba	Valores			Unidades
		Min.	Típico	Max.	
Sensor	En cada eje				
Rango de medición ¹		±1,7			<i>g</i>
No linealidad	% de la escala completa		±0,2	±1,25	%
Error de alineación de paquetes			±1		Grados
Error de posicionamiento	Sensor X a Y		±0,1		Grados
Sensibilidad entre ejes			±1,5	±3	%
Sensibilidad (radiométrica)²	En cada eje				
Sensibilidad en X_{out}, Y_{out}	$V_s = 5V$	960	1000	1040	<i>mV/g</i>
Cambio de sensibilidad debido a la temperatura ³	$V_s = 5V$		±0,3		%
Nivel de desviación de cero g (radiométrico)	En cada eje				
0g voltaje en X_{out}, Y_{out}	$V_s = 5V$	2,4	2,5	2,6	<i>V</i>
Desviación inicial de salida de 0g respecto al ideal	$V_s = 5V, 25^{\circ}C$		±25		<i>mg</i>
Compensación de 0g vs. temperatura			±0,1	±0,8	<i>mg/°C</i>
Ruido					
Ruido de salida			1	3	<i>mV rms</i>
Densidad de ruido			110		$\mu g/\sqrt{Hz} rms$
Respuesta en frecuencia⁴					
Rango de C_x, C_y ⁵		0,002		10	μF
Tolerancia R_{filt}		24	32	40	<i>kΩ</i>
Frecuencia resonante del sensor			5,5		<i>kHz</i>
Autoevaluación⁶					
Entrada lógica baja				1	<i>V</i>
Entrada lógica alta		4			<i>V</i>
Resistencia de entrada de ST a GND		30	50		<i>kΩ</i>
Cambio de salida en X_{out}, Y_{out}	ST 0 a ST 1	450	750	1000	<i>mV</i>
Amplificador de salida					
Oscilación de salida baja	Sin carga	0,05	0,2		<i>V</i>
Oscilación de salida alta	Sin carga		4,5	4,8	<i>V</i>
Fuente de alimentación V_{DD}					
Rango de voltaje de operación		3		6	<i>V</i>
Corriente de consumo en reposo			0,7	1,1	<i>mA</i>
Tiempo de encendido ⁷			20		<i>ms</i>

Tabla 2.4: Características del acelerómetro.



1. Garantizado por la medición del offset inicial y la sensibilidad.
2. La sensibilidad es esencialmente radiométrica con respecto a V_S . Para $V_S = 4,75V$ a $5,25V$, la sensibilidad es de $186mV/V/g$ a $215mV/V/g$.
3. Definido como el cambio de salida desde la temperatura ambiente a la temperatura máxima o mínima.
4. La respuesta de frecuencia real está controlada por el capacitor externo suministrado por el usuario (C_x, C_y).
5. Ancho de banda = $1/(2 \times \pi \times 32 k\Omega \times C)$. Para $C_x, C_y = 0,002 \mu F$, el ancho de banda es de 2500 Hz. Para $C_x, C_y = 10 \mu F$, el ancho de banda es de 0,5Hz. Los valores mínimos/máximos no están probados.
6. La respuesta de autoevaluación cambia de forma cúbica con V_S .
7. Valores mayores de C_x, C_y aumentan el tiempo de encendido. El tiempo de encendido es aproximadamente $160 \times C_x$ o $C_y + 4$ ms, donde C_x, C_y están en μF .

2.1.6. PLACA ADQUISIDORA DE DATOS

Para analizar los datos registrados por el sensor, se procesan mediante una placa adquisidora de datos con el fin de obtener el conjunto de datos en un archivo de texto. Posteriormente, en el entorno de Matlab, se utiliza dicho archivo para convertir los datos en información del sistema.



Figura 2.17: Placa adquisidora de datos. Fuente: [10].

Se utiliza la placa adquisidora de datos que posee el laboratorio “LabJack U6” (Fig. 2.17 y 2.18) el cual es un dispositivo que permite adquirir y controlar datos en tiempo real de sensores y actuadores [10]. Cuenta con 14 canales de entrada analógicos, 20 canales de entrada digitales



y 2 canales de salida digitales, y se comunica con una computadora a través de un puerto USB. Es compatible con diferentes lenguajes de programación y cuenta con características adicionales como protección contra sobrecarga y ESD. Es una herramienta versátil utilizada en aplicaciones industriales, científicas y educativas.

2.1.6.1. DESCRIPCIÓN DEL HARDWARE

- El U6 tiene 3 áreas de E/S diferentes:

1. Borde de Comunicación: Tiene un conector tipo USB tipo B.

2. Borde de Terminales de Tornillo: Conexiones convenientes para 4 entradas analógicas, ambas salidas analógicas, 4 E/S digitales flexibles (FIO) y ambas fuentes de corriente. Los terminales de tornillo están dispuestos en bloques de 4, cada bloque consta de Vs, GND y dos E/S. También en este borde hay dos LED. Uno simplemente indica la alimentación, mientras que el otro sirve como indicador de estado.

3. Borde de DB: Tiene 2 conectores tipo D-sub: un DB37 y un DB15. El DB37 tiene algunas E/S digitales y todas las E/S analógicas. El DB15 tiene 12 E/S digitales adicionales (3 son duplicados de E/S DB37).

- **USB**: Toda la alimentación y comunicación son manejadas por la interfaz USB.
- **LEDs**: Los LEDs de alimentación y estado transmiten información diferente sobre el dispositivo.
- **GND/SGND**: Todos los terminales de GND son iguales. SGND tiene un fusible térmico de autorreinicio en serie con GND.
- **VS**: Todos los terminales de VS son iguales. Estas son salidas que se pueden utilizar para suministrar alrededor de 5 voltios.
- **10UA/200UA**: Fuentes de corriente fija que proporcionan 10 μ A / 200 μ A a un voltaje máximo de alrededor de 3 voltios.

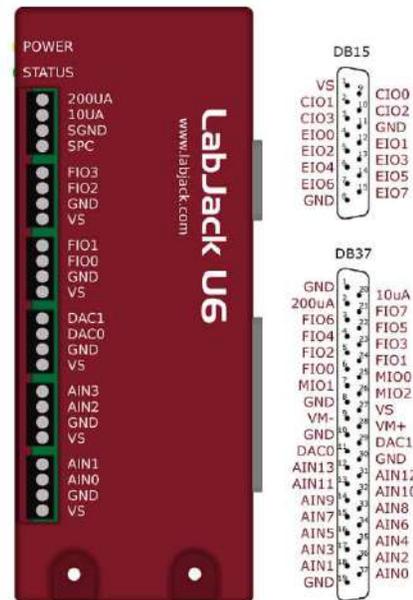


Figura 2.18: Placa adquisidora de datos



- **AIN#:** AIN0-AIN13 son las 14 entradas analógicas.
- **DAC#:** DAC0 y DAC1 son las 2 salidas analógicas. Cada DAC se puede ajustar a un voltaje entre aproximadamente 0,02 y 5 voltios con 12 bits de resolución.
- **FIO#/EIO#/CIO#/MIO#:** Estos son los 20 I/O digitales, también conocidos como DIO0-DIO19. Además de las operaciones básicas de I/O digital, algunos de estos terminales también se pueden configurar como temporizadores y contadores (entrada de frecuencia, salida PWM, etc.), serie SPI, serie I2C y serie asíncrona.

2.1.6.2. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE

El fabricante de la placa adquisidora de datos LabJack ofrece diversos programas que se adaptan a las necesidades del usuario en función de la cantidad de señales a registrar y/o inyectar, la frecuencia de muestreo, entre otras características.

En el presente caso, se emplea el software LJStreamUD, un programa que permite adquirir y visualizar datos en tiempo real. Se puede configurar la tasa de muestreo, la resolución y el rango de entrada de los canales de entrada analógicos de la placa, así como seleccionar los canales de entrada que se deseen ver en tiempo real. Asimismo, LJStreamUD puede guardar los datos adquiridos en un archivo de texto o binario para su posterior análisis. Además, cuenta con funciones para controlar la placa y enviar señales digitales a través de los canales de salida de la misma.

Se trata de un software de ejecución inmediata que transmite hasta 16 canales de entrada desde un solo dispositivo, los cuales se muestran en un gráfico. Por lo general, se utiliza para capturar más de 100 muestras por segundo.

Para ejecutar el programa y registrar los datos, se deben configurar previamente los canales que se utilizarán (*Fig. 2.19*), establecer el rango de las tensiones de entrada que se registrarán, elegir la frecuencia de muestreo y seleccionar la carpeta donde se guardarán los archivos, además de dar un nombre al stream de datos registrado. También, se debe configurar el tamaño máximo del archivo que guardará los datos registrados, ya que una vez que alcanza su tamaño máximo, el programa creará un nuevo archivo para seguir guardando los datos que se vayan registrando.



Una vez que se han establecido estas configuraciones, se puede iniciar el registro presionando el botón "Start" y detenerlo en cualquier momento utilizando el botón "Stop". De esta manera, se asegura la correcta grabación de los datos necesarios para su posterior análisis.

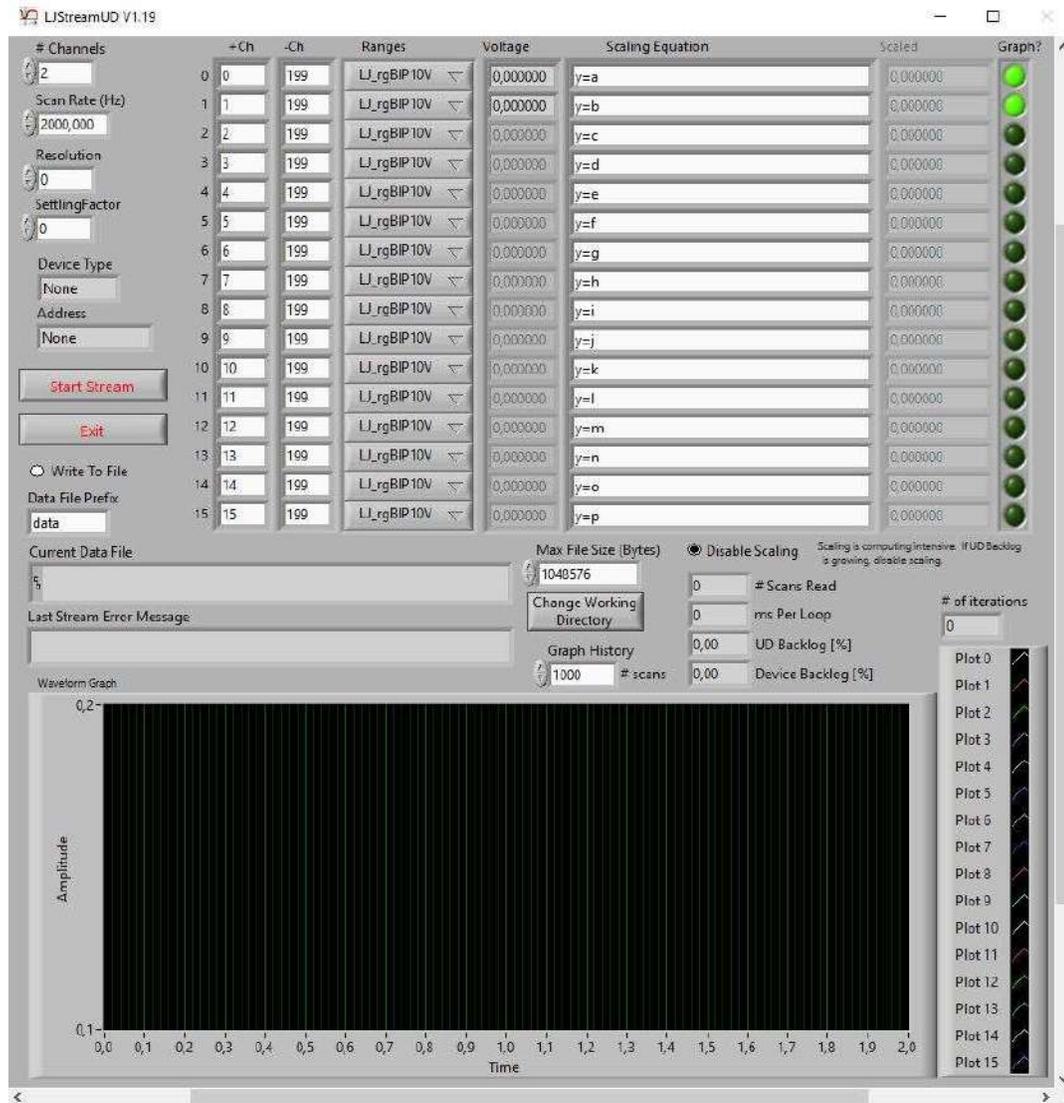


Figura 2.19: Software utilizado para la adquisición de datos



2.1.7. INTERFACE ALTAVOZ - ELEMENTO A ENSAYAR

El equipamiento del sistema demanda una conexión física entre el altavoz, cuya función es generar las vibraciones, y el elemento que está siendo ensayado. Además, se instala el sensor acelerómetro para registrar las vibraciones y proporcionar una visualización de la frecuencia y la aceleración obtenidas. Para facilitar esta configuración, se diseñó una base de interfaz a medida (*Figura 2.20*) para el altavoz en el laboratorio de Mecatrónica Aplicada de la Facultad. Se tuvieron en cuenta los esfuerzos que la base debe soportar, y debido a que no requiere resistir cargas significativas, se optó por fabricarla utilizando la impresora 3D del Departamento de Sistemas de Representación de la facultad. Se elaboró un plano de la pieza, que se detalla en el *Anexo 8.2*, y posteriormente se procedió a imprimir.



Figura 2.20: base interface altavoz – acelerómetro – piezoeléctrico

El diseño se desarrolló en colaboración con la alumna Lucía Gimenez, quien participa en el proyecto "Diseño y caracterización de un prototipo para la cosecha de energía de baja potencia basado en el fenómeno piezoeléctrico". En este proyecto, se emplea un dispositivo piezoeléctrico (*Figura 2.20*).

El sistema de interfaz se compone de tres partes. Una de ellas se fija al altavoz mediante adhesivo de contacto, conectándose a la tapa de fibra en el centro del cono. El diseño presenta ranuras que reducen el peso de esta pieza, y se incorporan orificios para sujetar tornillos y unir las otras dos partes: el soporte del acelerómetro y el del piezoeléctrico.

El soporte del acelerómetro está diseñado de manera que facilite su impresión en una impresora 3D, posicionando el sensor en una orientación vertical. Por último, el soporte del piezoeléctrico se confecciona siguiendo la forma exhibida en la *Figura 2.20*, logrando distribuir uniformemente la masa a lo largo del cono.



2.2. MONTAJE DEL SISTEMA



Figura 2.21: Set-up del laboratorio de Mecatrónica Aplicada

El sistema (Figura 2.21) se compone de una notebook conectada a través de un puerto USB a la placa adquisidora de datos LabJack U6. Asimismo, se conectan dos puertos analógicos de la placa, utilizados para registrar la tensión inyectada en el sistema y la proporcionada por el acelerómetro.

Por otro lado, se vincula el generador de funciones a la entrada del amplificador (Figura 2.22), y se suministra alimentación al amplificador con una fuente de 12 voltios. Posteriormente, la salida del amplificador se enlaza al altavoz Pioneer de 12" (Figura 2.23). Las bobinas del altavoz se conectan en paralelo (Figura 2.24).



Figura 2.22: Conexión del generador de funciones y configuración del amplificador



Figura 2.23: Conexión del altavoz y fuente de alimentación



Figura 2.24: Conexión de las bobinas del altavoz

Se utiliza una protoboard (Figura 2.25) para la conexión de la placa adquisidora de datos con la fuente de alimentación, el sensor acelerómetro, el generador de funciones y el amplificador. Asimismo, se utiliza el osciloscopio para la visualización de las señales de entrada y salida.

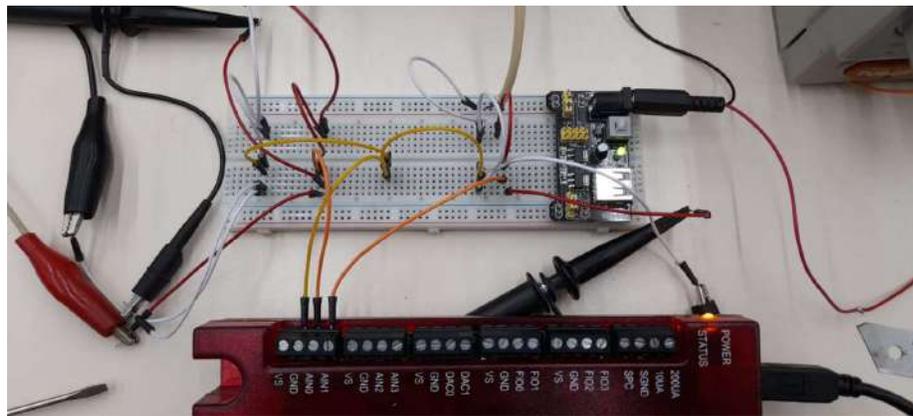


Figura 2.25: Protoboard con todas las conexiones

Se configura el crossover del amplificador en "FULL", lo que implica que no se aplique ningún filtro y que la señal completa, con todas sus frecuencias, se envíe al altavoz. Por otro lado, se establece el bass boost en cero (0) decibelios para evitar la amplificación de las frecuencias bajas de la señal. En relación a la ganancia del amplificador, se explorarán las distintas opciones en la sección 5.1 para analizar cómo varían en relación con la señal de salida.

En el software de la placa adquisidora LJStreamUD, se configura una frecuencia de muestreo en 2000 [Hz] y el rango de tensión en 10[V]. Además, los datos se registran y almacenan en un archivo de texto (.txt).



3. DESARROLLO DE ECUACIONES TEÓRICAS

En el tercer capítulo, se mencionan algunas definiciones y consideraciones necesarias para el desarrollo teórico que describe la dinámica del elemento central del Shaker que se está diseñando: el altavoz. Asimismo, se desarrolla un modelo de filtro pasa bajo debido a que el acelerómetro posee un filtro para atenuar los ruidos que puede registrar dicho sensor.

3.1. TRANSDUCTOR ELECTROMECAÁNICO

Un transductor es un dispositivo que al ser afectado por la energía de un sistema de transmisión proporciona energía del mismo o de otro tipo a un segundo sistema de transmisión [1]. Esta transmisión de energía puede ser eléctrica, mecánica, química, óptica (radiante), térmica, entre otras.

El transductor electromecánico convierte energía eléctrica en energía mecánica. El comportamiento dinámico está determinado por variables mecánicas y eléctricas interconectadas.

3.1.1. MODELO DE PARÁMETROS CONCENTRADOS

Los transductores se pueden clasificar de diferentes maneras, y una de ellas se basa en el balance energético, que los divide en aquellos que pueden almacenar energía y los que sólo pueden transferirla de una forma a otra, sin capacidad de retenerla. En el caso de un transductor capaz de almacenar energía, ésta puede ser guardada en una forma (ya sea mecánica o eléctrica) y recuperada en otro momento y en otra forma. Por otro lado, existe transductores que convierte un tipo de energía en otro, donde se considera (en el caso ideal) que la potencia instantánea en la entrada es siempre igual a la potencia instantánea en la salida.

El enfoque teórico de los transductores de parámetros concentrados se basa en la teoría cuasi estática del electromagnetismo, que establece que la dimensión característica del dispositivo l (en este caso, longitud de la bobina del altavoz) debe ser mucho menor que la longitud de onda electromagnética ($l/\lambda \ll 1$). Con este supuesto, el campo que produce fuerzas en el transductor es eléctrico o magnético, pero no ambos; esto permite separar el análisis de fuerzas eléctricas en transductores capacitivos y fuerzas magnéticas en transductores inductivos.

Es importante tener en cuenta que las fuerzas electrostáticas y electromagnéticas no disminuyen proporcionalmente al tamaño del transductor: las fuerzas electrostáticas



disminuyen como l^{-2} y la energía electrostática como l^{-3} , mientras que las fuerzas electromagnéticas disminuyen como l^{-4} y la energía electromagnética como l^{-5} .

3.1.2. TRANSDUCTOR DE BOBINA MÓVIL

Un transductor de bobina móvil es un transformador de energía que convierte la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. El sistema consiste en un imán permanente (figura 3.1) que produce una densidad de flujo magnético B uniforme en el espacio, y una bobina que se mueve libremente en forma axial dentro del espacio. Sea v la velocidad de la bobina, f la fuerza externa que actúa para mantener la bobina en equilibrio contra las fuerzas electromagnéticas, e la diferencia de voltaje a través de la bobina e i la corriente en la bobina.

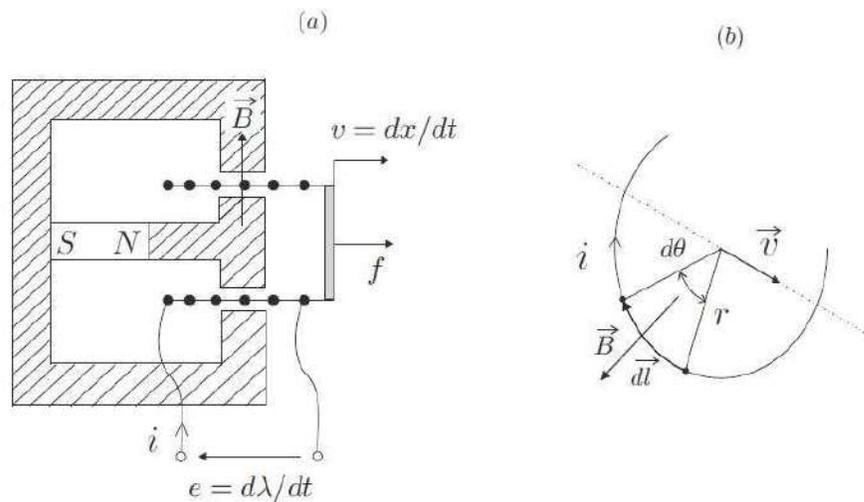


Figura 3.1: Transductor de bobina móvil. Fuente: [2]

En este transductor ideal, no se considera la resistencia eléctrica y la autoinducción de la bobina, así como su masa y amortiguamiento (si es necesario, estos pueden manejarse agregando R y L al circuito eléctrico de la bobina, o una masa y amortiguador a su modelo mecánico). El actuador de bobina móvil es uno de los actuadores más populares en mecatrónica. Por ejemplo: los altavoces electromagnéticos, los amperímetros de bobina, y algunos tipos geófonos son transductores de bobina móvil.

Las ecuaciones constitutivas del transductor de bobina móvil se derivan de la **ley de Faraday** y la **ley de la fuerza de Lorentz**. La ley de Faraday establece que el incremento de voltaje de cierta longitud elemental dl en la dirección del flujo de corriente, inducido por el movimiento de la bobina es:



$$de = \vec{v} \times \vec{B} \cdot \vec{dl} \quad (3.0)$$

Por otro lado, una partícula de carga que se mueve en un campo electromagnético (campo eléctrico \vec{E} y densidad de flujo magnético \vec{B}) está sujeta a la fuerza de Lorentz:

$$\vec{f} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.1)$$

En el mundo macroscópico, esta fuerza está dominada por su contribución magnética, y la contribución electrostática puede omitirse.

Si se considera una corriente formada por un gran número de partículas cargadas (los electrones) que se mueven a lo largo del conductor ($i = dq/dt = \dot{q}$), la fuerza total del campo que actúa sobre una longitud elemental dl del conductor es

$$\vec{df} = i \cdot \vec{dl} \times \vec{B} \quad (3.2)$$

Aplicando (3.0) a una longitud elemental $dl = r d\theta$ de una vuelta de la bobina [\vec{B} , \vec{v} y \vec{dl} son ortogonales entre sí, Fig.3.1 (b)], se encuentra que el incremento de voltaje en la dirección del flujo de corriente es

$$de = \vec{v} \times \vec{B} \cdot \vec{dl} = |v| \cdot |B| \text{sen}(90^\circ) \cdot |dl| \cos(180^\circ) = -vBdl = -vBr d\theta$$

Integrándose sobre θ y asumiendo que B es uniforme en el espacio, la caída de voltaje en la bobina (en la dirección de la corriente) es:

$$e = \int_{2\pi n}^0 -vBr d\theta = - \int_0^{2\pi n} -vBr d\theta = vBr \int_0^{2\pi n} d\theta = vBr(2\pi n - 0) = 2\pi nrBv$$

$$e = 2\pi nrBv = Tv \quad (3.3)$$

Donde

$$T = 2\pi nrB \quad (3.4)$$

Es la *constante del transductor* igual al producto de la longitud de la bobina expuesta al flujo magnético, $2\pi nr$, y la densidad del flujo magnético B .

Por otra parte, la fuerza de Lorentz del campo magnético que actúa sobre el elemento $dl = r d\theta$ de una vuelta de la bobina con una corriente i sigue de (3.2).

$$df = i \cdot |dl| \cdot |B| \text{sen}(90^\circ) = idlB = ird\theta B$$

$$df = ird\theta B \quad (3.5)$$



La fuerza f definida en la Fig.3.1 (a) es la fuerza externa requerida para equilibrar la fuerza total del campo magnético en n vueltas del conductor; integrando (3.5) a lo largo del conductor expuesto a la densidad de flujo magnético, se tiene:

$$f = \int_{2\pi n}^0 ir d\theta B = - \int_0^{2\pi n} ir B d\theta = -irB \int_0^{2\pi n} d\theta = -irB(2\pi n - 0) = -i2\pi nrB$$

$$f = -i2\pi nrB = -Ti \quad (3.6)$$

Donde T es nuevamente la *constante del transductor* (3.4).

Por lo tanto (3.3) y (3.6) son las ecuaciones constitutivas del transductor de bobina móvil (Fig.3.2).

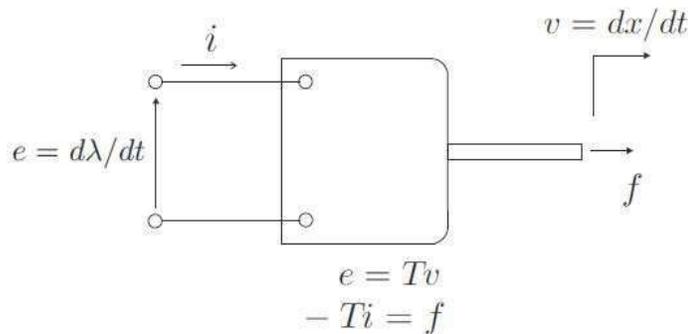


Figura 3.1: Representación simbólica de un transductor de bobina móvil. Fuente: [2]

Observe que la constante T del transductor que aparece en la ley de Faraday (3.3), expresada en $[V \cdot s/m]$, es la misma que aparece en la fuerza de Lorentz (3.6), expresada en $[N/A]$.

La potencia total entregada al transductor de bobina móvil es igual a la suma de la potencia eléctrica, ei , y la potencia mecánica, fv . Combinando con (3.3) y (3.6), se obtiene:

$$ei + fv = Tvi - Tiv = 0 \quad (3.7)$$

Por lo tanto, en cualquier momento, existe un equilibrio entre la potencia eléctrica absorbida por el dispositivo y la potencia mecánica entregada (y viceversa). El transductor de bobina móvil no puede almacenar energía y se comporta como un convertidor electromecánico perfecto. Sin embargo, en la práctica, la transferencia nunca es perfecta debido a las corrientes de Foucault, las fugas de flujo y la histéresis magnética, lo que lleva a diferentes valores de T en (3.3) y (3.6).

Se ha analizado las ecuaciones constitutivas de los transductores ideales. Los modelos de transductores reales generalmente involucran elementos adicionales en el lado eléctrico, así



como en el lado mecánico del transductor, para representar la resistencia eléctrica, capacitancia e inductancia, y la inercia mecánica, rigidez y amortiguación.

3.2. ALTAVOZ ELECTROMAGNÉTICO

El altavoz es un transductor de bobina móvil que realiza una conversión eléctrico-mecánico-acústico. Por su definición, este tipo de transductor transforma la energía eléctrica que se le entrega en energía mecánica (movimiento). A su vez, dicha energía mecánica, en el caso de producirse en el aire, va a crear ondas sonoras, produciéndose una segunda transformación en energía acústica [4].

3.2.1. CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

Un altavoz típico posee los siguientes componentes:

- a) **Parte electromagnética:** Construida por el imán y la bobina móvil. En esta parte, la energía eléctrica llega a la bobina móvil situada dentro del campo magnético y por eso se produce el movimiento de la bobina móvil.
- b) **Parte mecánica:** Formada por el cono y su suspensión. Sobre el cono está montada la bobina móvil, la que al moverse arrastra al cono y lo hace vibrar.
- c) **Parte acústica:** Es la que transmite al recinto de audición la energía sonora desarrollada por el cono.

Posee varios elementos (*figura 3.3 y 3.4*), los mismos son:

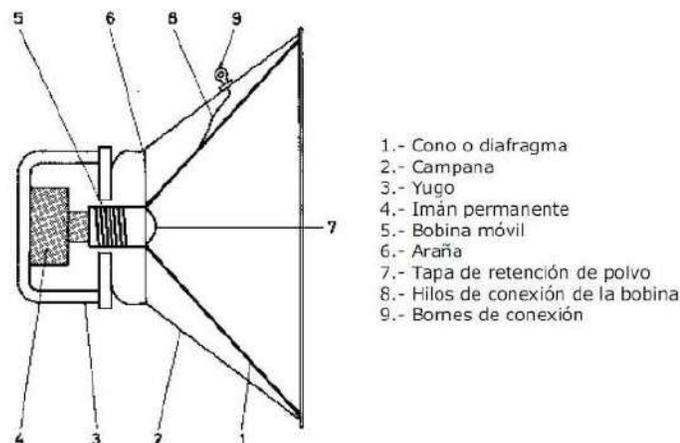


Figura 3.3: Componentes del altavoz. Fuente: [3].



1. Cono o diafragma

Está fabricado de un material fibroso y liviano con la finalidad de que sea lo más rígido posible, de modo que toda su superficie vibre como una unidad. La forma del cono depende de la banda de frecuencias que reproduce, las características de directividad y la potencia admisible del altavoz.

2. Campana

Está fabricada con chapa muy delgada, cuya rigidez mecánica se ha aumentado mediante las nervaduras de refuerzo. Generalmente, posee una capa galvanoplástica que evita la oxidación. La campana debe servir como soporte a todas las piezas del altavoz y sujetar el altavoz a la caja acústica o baffle.

3. Yugo

En su interior se aloja el imán permanente. El yugo debe estar fabricado con un material de alta permeabilidad para evitar pérdidas del campo magnético del imán.

4. Imán permanente

Es el sistema de excitación del altavoz. Este se coloca dentro del yugo. Consiste en un imán cilíndrico de alta conducción. Los yugos se fabrican, generalmente, con óxidos ferromagnéticos, que permiten inducciones magnéticas superiores y un peso reducido.

5. Bobina móvil

Está construida por un devanado montado sobre un tubo cilíndrico. Este tubo debe soportar los esfuerzos que se originan sobre el bobinado, como también los esfuerzos que hace la araña durante el movimiento vibratorio de la bobina, a su vez, debe ser hecho de un material de un espesor reducido.

El devanado de la bobina debe realizarse con gran exactitud, tanto eléctrica como mecánicamente. El grueso del hilo depende de la carga que deba aceptar el altavoz y su aislamiento debe ser de gran calidad para evitar cortocircuitos entre espiras.

La bobina se adhiere a su soporte mediante un cemento especial que resista las vibraciones que tendrá.

6. Araña (suspensión y centrador)



Es la encargada de centrar la bobina móvil en el entrehierro, de forma que éste sólo se pueda desplazar en una única dirección axial, y con el fin de que no se produzcan roces entre la bobina y el imán o el yugo. La araña se coloca en el cuello del cono siendo de un elemento flexible, sirviendo para unir a éste con la bobina móvil. Existen varios tipos de arañas:

- a) Arañas de suspensión externa y perfil plano: Son colocadas en la parte exterior del diafragma y su suspensión se realiza por puntos.
- b) Arañas de suspensión externa y perfil ondulado: Se colocan igual que la anterior, pero su suspensión es continua.
- c) Arañas de suspensión interna: Son siempre planas y se colocan en el interior del cono. Este tipo de araña posee poca flexibilidad, lo que hace que no sea adecuada para altavoces de graves.

7. Tapa de retención de polvo

Al acumularse polvo en el entrehierro, se genera la inmovilización de la bobina. Para evitar esto, se coloca una tapa de retención de polvo, que tape el agujero del soporte de la bobina móvil en el interior del cono. Estas tapas pueden ser planas o semiesféricas.

8. Sistema de conexión de la bobina móvil

Consiste en dos hilos que unen los bornes de la bobina con los dos bornes situados sobre la campana del altavoz. Estos bornes van situados sobre una regleta aislante en la campana o por dos bornes aislados que se encuentran en los brazos de la campana.

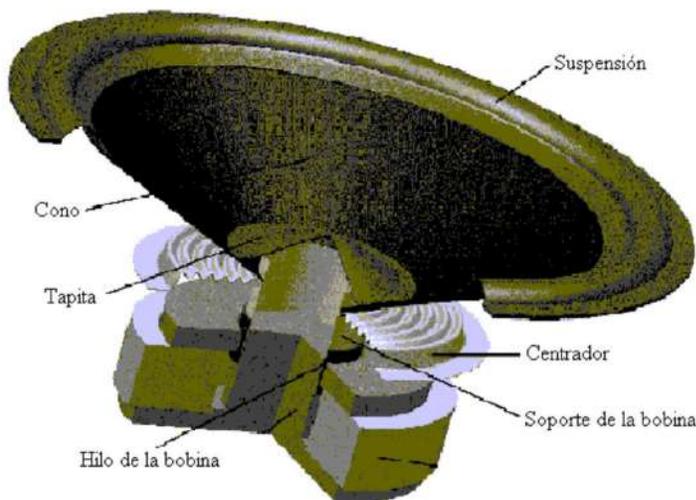


Figura 3.4: Componentes del altavoz. Fuente: [4].



3.2.2. ECUACIONES DIFERENCIALES DEL ALTAVOZ

El comportamiento a baja frecuencia del altavoz se puede modelar como en la Fig. 3.5. La parte mecánica está representada por un sistema de masa de resorte (que, obviamente, es apropiado sólo a baja frecuencia); las constantes mecánicas m , k y c se eligen para tener en cuenta el efecto de acoplamiento mecánico del aire con el cono del altavoz. El lado mecánico está conectado al lado eléctrico a través de un transductor de bobina móvil que, como se analiza anteriormente, es un transformador de energía perfecto, con la constante T del transductor. El lado eléctrico está modelado por una fuente de voltaje en serie con un circuito RL.

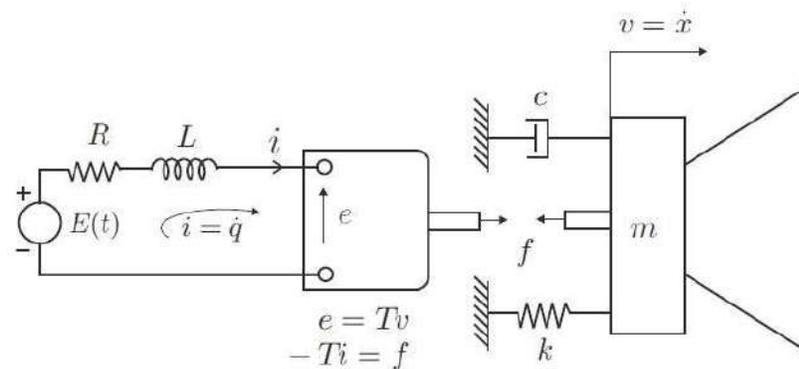


Figura 3.5: Altavoz electromecánico. Fuente: [2]

Al analizar el sistema electromecánico que se posee en la Fig. 3.5 mediante la teoría de la **Mecánica Clásica** se tiene que; por el lado eléctrico, aplicando la ley de Kirchhoff de las mallas, la Ley de Ohm del inductor y del resistor, resulta:

$$E(t) = L \frac{di}{dt} + iR + e$$

Reemplazando el valor de la caída de voltaje e en el transductor ideal, $e = Tv$, se tiene:

$$E(t) = L \frac{di}{dt} + iR + Tv$$

Reescribiendo la misma ecuación en términos de variación de carga q y variación de distancia x se tiene:

$$E(t) = L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{dq}{dt}R + T \frac{dx}{dt}$$

Resultando,

$$T\dot{x} + L\ddot{q} + \dot{q}R = E(t) \quad (3.8)$$



En cuanto al análisis mecánico, planteando el equilibrio de fuerzas se tiene:

$$\sum F = 0$$

$$ma + cv + kx + f = 0$$

Reemplazando el valor de la fuerza externa f que se debe aplicar en un transductor ideal,
 $f = -Ti$

$$ma + cv + kx - Ti = 0$$

Reescribiendo la misma ecuación en términos de variación de distancia x y variación de carga q se tiene:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx - T \frac{dq}{dt} = 0$$

Resultando,

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx - T\dot{q} = 0 \quad (3.9)$$

Donde

- $m\ddot{x}$: se debe a la segunda Ley de Newton (la fuerza ejercida es directamente proporcional a la masa y aceleración del cuerpo).
- $c\dot{x}$: es el amortiguador o fricción viscosa.
- kx : representa a la Ley de Hooke (la fuerza aplicada es directamente proporcional a una constante elástica por la distancia deformada).
- $-T\dot{q}$: representa a la fuerza externa que se le debe aplicar al transductor ideal para compensar los fenómenos magnéticos.

En **ambos casos**, $T = 2\pi nrB$. Donde el valor de n representa el número de espiras de la bobina del altavoz, r es el radio de la bobina del altavoz y B es la inducción magnética del imán permanente del altavoz.

El parámetro T en los altavoces se lo denomina **factor de fuerza** $[N/A]$ o $[Wb/m]$ y dicho valor es proporcionado por el fabricante de cada altavoz debido a que depende exclusivamente de las características constructivas. Representa el valor de fuerza producida por la bobina de voz en el entrehierro ante una corriente de $1[A]$.



Ahora bien, de las ecuaciones (3.8) y (3.9) se puede deducir el comportamiento del altavoz a través del tiempo, para las distintas frecuencias de la señal que se inyecte.

$$T\dot{x}(t) + L\ddot{q}(t) + \dot{q}(t)R = E(t) \quad (3.8)$$

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) - T\dot{q}(t) = 0 \quad (3.9)$$

3.2.3. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Para analizar las ecuaciones diferenciales (3.8) y (3.9), y estimar el comportamiento del altavoz se utiliza la función transferencia que está definida como el cociente de la transformada de Laplace de la salida sobre la transformada de Laplace de la entrada. De esta manera, ya no se tiene que modelar el comportamiento mediante ecuaciones diferenciales, sino que se utiliza el álgebra lineal.

Las condiciones iniciales de esta situación son:

$q(0) = 0 \rightarrow$ No hay carga en el instante cero.

$\dot{q}(0) = i(0) = 0 \rightarrow$ No hay corriente en el instante cero.

$x(0) = 0 \rightarrow$ No hay desplazamiento en el instante cero.

$\dot{x}(0) = 0 \rightarrow$ No hay velocidad en el instante inicial.

3.2.3.1. ACELERACIÓN EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENTRADA

Analizando las ecuaciones algebraicas resultantes, se puede predecir la estabilidad del sistema y su respuesta en frecuencia del sistema. Entonces,

Ecuación (3.8)

$$T\dot{x}(t) + L\ddot{q}(t) + \dot{q}(t)R = E(t)$$

Se aplica el operador de Laplace,

$$\mathcal{L}(T\dot{x} + L\ddot{q} + \dot{q}R)(s) = \mathcal{L}(E)(s)$$

Se aplica la proposición de linealidad del operador \mathcal{L} ,

$$T\mathcal{L}(\dot{x})(s) + L\mathcal{L}(\ddot{q})(s) + R\mathcal{L}(\dot{q})(s) = \mathcal{L}(E)(s)$$

Se aplica la proposición de la transformada de la derivada,

$$T[s\mathcal{L}(x)(s) - x(0)] + L[s^2\mathcal{L}(q)(s) - sq(0) - \dot{q}(0)] + R[s\mathcal{L}(q)(s) - q(0)] = \mathcal{L}(E)(s)$$



Utilizando las condiciones iniciales resulta,

$$Ts\mathcal{L}(x)(s) + Ls^2\mathcal{L}(q)(s) + Rs\mathcal{L}(q)(s) = \mathcal{L}(E)(s)$$

Se realiza operaciones algebraicas y se tiene,

$$Ts\mathcal{L}(x)(s) + \mathcal{L}(q)(s)[Ls^2 + Rs] = \mathcal{L}(E)(s) \quad (3.10)$$

Ecuación (3.9)

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) - T\dot{q}(t) = 0$$

Se aplica el operador de Laplace,

$$\mathcal{L}(m\ddot{x} + c\dot{x} + kx - T\dot{q})(s) = 0$$

Se aplica la proposición de linealidad del operador \mathcal{L} ,

$$m\mathcal{L}(\ddot{x})(s) + c\mathcal{L}(\dot{x})(s) + k\mathcal{L}(x)(s) = T\mathcal{L}(\dot{q})(s)$$

Se aplica la proposición de la transformada de la derivada,

$$m[s^2\mathcal{L}(x)(s) - sx(0) - \dot{x}(0)] + c[s\mathcal{L}(x)(s) - x(0)] + k\mathcal{L}(x)(s) = T[s\mathcal{L}(q)(s) - q(0)]$$

Utilizando las condiciones iniciales resulta,

$$ms^2\mathcal{L}(x)(s) + cs\mathcal{L}(x)(s) + k\mathcal{L}(x)(s) = Ts\mathcal{L}(q)(s)$$

Se realiza operaciones algebraicas y se tiene,

$$\mathcal{L}(x)(s)[ms^2 + cs + k] = Ts\mathcal{L}(q)(s)$$

Luego,

$$\mathcal{L}(q)(s) = \mathcal{L}(x)(s) \frac{ms^2 + cs + k}{Ts} \quad (3.11)$$

Reemplazo la ecuación (3.11) en (3.10) para obtener la relación entre la entrada $\mathcal{L}(E)(s)$ y la salida mecánica $\mathcal{L}(x)(s)$.

$$Ts\mathcal{L}(x)(s) + \mathcal{L}(x)(s) \frac{ms^2 + cs + k}{Ts} [Ls^2 + Rs] = \mathcal{L}(E)(s)$$

Se realiza operaciones algebraicas y se tiene,

$$\mathcal{L}(x)(s) \left[Ts + \frac{ms^2 + cs + k}{Ts} (Ls^2 + Rs) \right] = \mathcal{L}(E)(s)$$



$$\frac{\mathcal{L}(x)(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{1}{Ts + \frac{ms^2 + cs + k}{Ts}(Ls^2 + Rs)}$$

$$\frac{\mathcal{L}(x)(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{1}{\frac{T^2s^2}{Ts} + \frac{(ms^2 + cs + k)(Ls^2 + Rs)}{Ts}}$$

$$\frac{\mathcal{L}(x)(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{Ts}{T^2s^2 + (ms^2 + cs + k)(Ls^2 + Rs)}$$

$$\frac{\mathcal{L}(x)(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{Ts}{T^2s^2 + ms^2Ls^2 + csLs^2 + kLs^2 + ms^2Rs + csRs + kRs}$$

$$\frac{\mathcal{L}(x)(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{T}{mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR}$$

Ahora bien, se obtiene la función transferencia de la tensión de entrada $E(t)$ en función del desplazamiento del cono $x(t)$. Sin embargo, se requiere la aceleración $\ddot{x}(t)$, ya que es una magnitud que se mide con el instrumento acelerómetro. Entonces,

$$\frac{\mathcal{L}(x)(s) s^2}{\mathcal{L}(E)(s) s^2} = \frac{T}{mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR}$$

$$\frac{\mathcal{L}(\ddot{x})(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{Ts^2}{mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR} \quad (3.12)$$

Todo esto me indica que la función transferencia del altavoz tiene dos ceros y tres polos.

3.2.3.2. IMPEDANCIA DE LA BOBINA

En esta ocasión, se busca la función transferencia de la impedancia. Es decir, por la ley de Ohm es el cociente de la tensión de entrada $E(t)$ sobre la corriente $i(t)$. Entonces,

Ecuación (3.8)

$$T\dot{x}(t) + L\ddot{q}(t) + \dot{q}(t)R = E(t)$$

Reescribiendo la ecuación,

$$T\dot{x}(t) + Li'(t) + i(t)R = E(t)$$

Se aplica el operador de Laplace,

$$\mathcal{L}(T\dot{x} + Li' + iR)(s) = \mathcal{L}(E)(s)$$

Se aplica la proposición de linealidad del operador \mathcal{L} ,



$$T\mathcal{L}(\dot{x})(s) + L\mathcal{L}(i')(s) + R\mathcal{L}(i)(s) = \mathcal{L}(E)(s)$$

Se aplica la proposición de la transformada de la derivada,

$$T[s\mathcal{L}(x)(s) - x(0)] + L[s\mathcal{L}(i)(s) - i(0)] + R\mathcal{L}(i)(s) = \mathcal{L}(E)(s)$$

Utilizando las condiciones iniciales resulta,

$$Ts\mathcal{L}(x)(s) + Ls\mathcal{L}(i)(s) + R\mathcal{L}(i)(s) = \mathcal{L}(E)(s)$$

Se realiza operaciones algebraicas y se tiene,

$$Ts\mathcal{L}(x)(s) + \mathcal{L}(i)(s)[Ls + R] = \mathcal{L}(E)(s) \quad (3.13)$$

Ecuación (3.9)

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) - T\dot{q}(t) = 0$$

Reescribiendo la ecuación,

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) - Ti(t) = 0$$

Se aplica el operador de Laplace,

$$\mathcal{L}(m\ddot{x} + c\dot{x} + kx - Ti)(s) = 0$$

Se aplica la proposición de linealidad del operador \mathcal{L} ,

$$m\mathcal{L}(\ddot{x})(s) + c\mathcal{L}(\dot{x})(s) + k\mathcal{L}(x)(s) = T\mathcal{L}(i)(s)$$

Se aplica la proposición de la transformada de la derivada,

$$m[s^2\mathcal{L}(x)(s) - sx(0) - \dot{x}(0)] + c[s\mathcal{L}(x)(s) - x(0)] + k\mathcal{L}(x)(s) = T\mathcal{L}(i)(s)$$

Utilizando las condiciones iniciales resulta,

$$ms^2\mathcal{L}(x)(s) + cs\mathcal{L}(x)(s) + k\mathcal{L}(x)(s) = T\mathcal{L}(i)(s)$$

Se realiza operaciones algebraicas y se tiene,

$$\mathcal{L}(x)(s)[ms^2 + cs + k] = T\mathcal{L}(i)(s)$$

Luego,

$$\mathcal{L}(x)(s) = \mathcal{L}(i)(s) \frac{T}{ms^2 + cs + k} \quad (3.14)$$

Reemplazo la ecuación (3.14) en (3.13) para obtener la relación entre la entrada $\mathcal{L}(E)(s)$ y la salida eléctrica de la bobina $\mathcal{L}(i)(s)$.



$$Ts \left[\mathcal{L}(i)(s) \frac{T}{ms^2 + cs + k} \right] + \mathcal{L}(i)(s)[Ls + R] = \mathcal{L}(E)(s)$$

Se realiza operaciones algebraicas y se tiene,

$$\mathcal{L}(i)(s) \left[\frac{T^2s}{ms^2 + cs + k} + Ls + R \right] = \mathcal{L}(E)(s)$$

$$\frac{\mathcal{L}(E)(s)}{\mathcal{L}(i)(s)} = \frac{T^2s}{ms^2 + cs + k} + Ls + R$$

$$\frac{\mathcal{L}(E)(s)}{\mathcal{L}(i)(s)} = \frac{T^2s + Ls(ms^2 + cs + k) + R(ms^2 + cs + k)}{ms^2 + cs + k}$$

Por lo tanto, se obtiene:

$$\frac{\mathcal{L}(E)(s)}{\mathcal{L}(i)(s)} = \frac{mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR}{ms^2 + cs + k} \quad (3.15)$$

3.3. MODELO DE FILTRO PASA BAJOS

El filtro pasa bajo con un circuito RC, es uno de los filtros más simples y comunes que se utilizan en circuitos electrónicos. Este filtro se utiliza para atenuar las señales de alta frecuencia y permitir el paso de señales de baja frecuencia.

En esta ocasión, se desarrolla este modelo teórico debido a que el sensor acelerómetro utilizado en la experiencia posee un filtro pasa bajo, lo que lo hace necesario para el cálculo, ya que la función transferencia del sistema se ve afectada por el filtro.

Para determinar el comportamiento en el circuito RC en serie se debe desarrollar una ecuación diferencial que relaciona la tensión de entrada U_1 y la de salida U_o . La ecuación diferencial se deriva a partir de la ley de Kirchoff para voltajes y de la ley de Ohm para la resistencia:

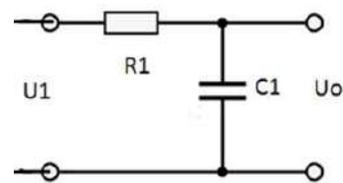


Figura 3.6: Filtro RC serie

$$U_1 = U_o + I \cdot R_1$$

Si reemplazo por la ley de Ohm del capacitor, $I = C_1 \frac{dU_o}{dt}$

$$U_1 = U_o + C_1 \frac{dU_o}{dt} R_1 \quad (3.16)$$



Donde U_1 es la tensión de entrada, U_o es la tensión en el capacitor y en la salida, I es la corriente en el circuito, R_1 es la resistencia y C_1 es la capacitancia.

Se aplica el operador de Laplace a la ecuación (3.16),

$$\mathcal{L}(U_1)(s) = \mathcal{L}\left(U_o + C_1 \frac{dU_o}{dt} R_1\right)(s)$$

Se aplica la proposición de linealidad del operador \mathcal{L} ,

$$\mathcal{L}(U_1)(s) = \mathcal{L}(U_o)(s) + R_1 C_1 \mathcal{L}(\dot{U}_o)(s)$$

Se aplica la proposición de la transformada de la derivada,

$$\mathcal{L}(U_1)(s) = \mathcal{L}(U_o)(s) + R_1 C_1 [s\mathcal{L}(U_o)(s) - U_o(0)]$$

Utilizando las condiciones iniciales nulas (capacitor sin carga) resulta,

$$\mathcal{L}(U_1)(s) = \mathcal{L}(U_o)(s) + R_1 C_1 s \mathcal{L}(U_o)(s)$$

Se realiza operaciones algebraicas y se tiene,

$$\mathcal{L}(U_1)(s) = \mathcal{L}(U_o)(s)[1 + R_1 C_1 s]$$

Luego,

$$\frac{\mathcal{L}(U_o)(s)}{\mathcal{L}(U_1)(s)} = \frac{1}{1 + R_1 C_1 s}$$

Ahora bien, como es de ganancia unitaria, se tiene

$$\frac{\mathcal{L}(U_o)(s)}{\mathcal{L}(U_1)(s)} = \frac{1/R_1 C_1}{s + 1/R_1 C_1} \quad (3.17)$$



4. MODELO DINÁMICO TEÓRICO DEL SHAKER

En este capítulo, se modela la fuente de vibraciones controladas que está construida mediante una serie de elementos donde cada uno de ellos tiene su propia dinámica, en la *figura 4.1* se hace una representación esquemática de este sistema. El sistema está compuesto por la fuente de vibraciones, integrada por el conjunto amplificador – caja acústica – altavoz y por el sensor acelerómetros debido a que se tiene una retroalimentación del valor inyectado y se requiere visualizar el valor de aceleración.

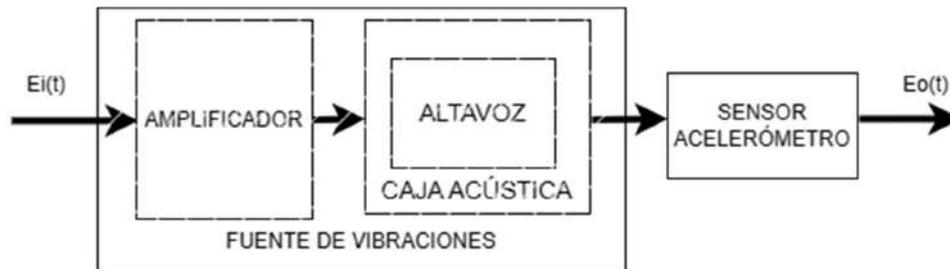


Figura 4.1: Diagrama en bloques del sistema

4.1. SHAKER: ALTAVOZ

Con el objetivo de simplificar el modelo que describe la dinámica del sistema se introduce un conjunto de hipótesis:

1. Se considera relevante la dinámica aportada por el altavoz.
2. El amplificador no posee una dinámica asociada.
3. La caja acústica no interviene en la dinámica del Shaker.
4. El sensor acelerómetro no aportan dinámica significativa.

En la sección 3.2.3, se han desarrollado las funciones de transferencia de la aceleración del cono en función de la tensión de entrada y de la impedancia de la bobina, ambas de manera genérica. A continuación, se consideran los valores dados en la sección 2.1.1 proporcionados por el fabricante del subwoofer que posee el Laboratorio de Mecatrónica Aplicada de la Facultad de Ingeniería de la UNLPam para encontrar y modelar el sistema en base a los elementos disponibles.

4.1.2. ACELERACIÓN VS TENSIÓN DE ENTRADA

La ecuación (3.12) desarrollada en la sección 3, es la siguiente



$$\frac{\mathcal{L}(\ddot{x})(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{T s^2}{mL s^3 + (cL + mR) s^2 + (T^2 + kL + cR) s + kR}$$

Los valores de los parámetros de la ecuación (3.12) están dados en la sección 1.1.3 que determinan las características técnicas del altavoz, los mismo depende si el altavoz se configura la conexión de las bobinas en paralelo o en serie. Con lo cual, se obtiene las siguientes ecuaciones teórica del Shaker.

Bobinas en serie:

$$\frac{\mathcal{L}(\ddot{x})(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{17,7 \cdot s^2}{1,39913 \cdot 10^{-3} \cdot s^3 + 1,5948635 \cdot s^2 + 389,0359657 \cdot s + 36909,87125} \quad (4.1)$$

Bobinas en paralelo:

$$\frac{\mathcal{L}(\ddot{x})(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{8,9 s^2}{3,4933 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 0,3987035 \cdot s^2 + 98,1357618 \cdot s + 9227,467812} \quad (4.2)$$

COMPARACIÓN ENTRE CONEXIÓN PARALELO Y SERIE

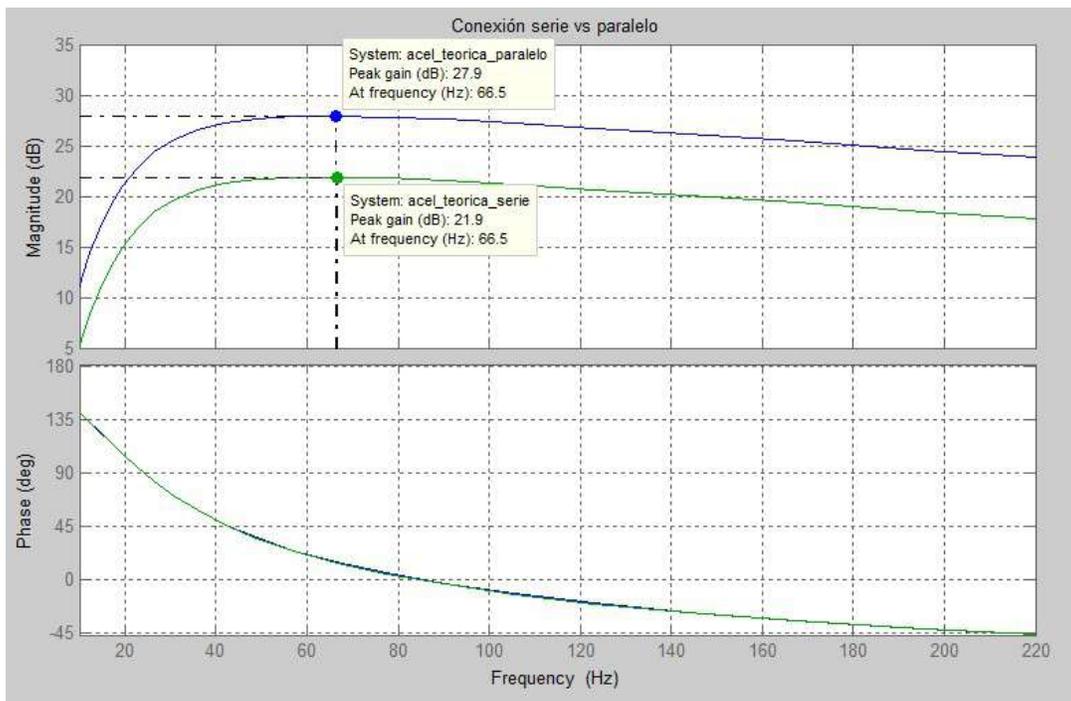


Figura 4.2: aceleración vs tensión de entrada conexión serie y paralelo

En la sección 1.1.1, se puede ver que el altavoz cuenta con una bobina separada en dos partes donde al conectarlas en serie o en paralelo, cambia la impedancia interna del subwoofer, por lo que cambia su respuesta en frecuencia. El **cambio de impedancia física** a lo largo del rango de



frecuencia de interés **no afecta el cambio de fase** en la función transferencia de la aceleración, pero **sí modifica la ganancia** como se puede apreciar en la *figura 4.2*. Cuando las bobinas están conectadas en paralelo, se obtiene una ganancia de 6 [dB] más que en la conexión en serie.

Por lo tanto, desde aquí en adelante cuando se tenga **la función transferencia del altavoz, será con conexión paralelo de sus bobinas**. Esto se debe a que amplifica más la ganancia y se obtiene una mayor aceleración.

4.1.3. IMPEDANCIA DE LA BOBINA

En esta sección se computa la función transferencia de la impedancia de la bobina para poder comparar con la frecuencia de resonancia del altavoz al aire libre. De acuerdo al Datasheet se tiene una frecuencia de resonancia al aire libre del altavoz $F_s = 25[Hz]$, con lo cual se espera obtener un valor cercano a éste en la resonancia de la función transferencia (3.15) dada en la sección 3.2.3.2, que es la siguiente:

$$\frac{\mathcal{L}(E)(s)}{\mathcal{L}(i)(s)} = \frac{mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR}{ms^2 + cs + k}$$

Bobinas en serie:

$$\frac{\mathcal{L}(E)(s)}{\mathcal{L}(i)(s)} = \frac{1,39913 \cdot 10^{-3} \cdot s^3 + 1,5948635 \cdot s^2 + 389,0359657 \cdot s + 36909,87125}{0,181s^2 + 4,95s + 4291,845494} \quad (4.3)$$

Bobinas en paralelo:

$$\frac{\mathcal{L}(E)(s)}{\mathcal{L}(i)(s)} = \frac{3,4933 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 0,3987035 \cdot s^2 + 98,1357618 \cdot s + 9227,467812}{0,181s^2 + 4,95s + 4291,845494} \quad (4.4)$$

COMPARACIÓN ENTRE CONEXIÓN PARALELO Y SERIE

Al analizar la diferencia entre la respuesta en frecuencia de la impedancia en las dos configuraciones posibles (*figura 4.3*), se denota que en la conexión paralelo posee una diferencia de 11,9[dB] con respecto a la conexión serie. Sin embargo, el resultado de interés es que al comparar **la frecuencia de resonancia al aire libre F_s que provee el fabricante del altavoz (25[Hz]) es prácticamente coincidente con el que se obtiene de la respuesta en**



frecuencia en ambos tipos de conexiones (24,6[Hz]). Con lo cual, se confirma que la metodología para el desarrollo de las ecuaciones teóricas es válida.

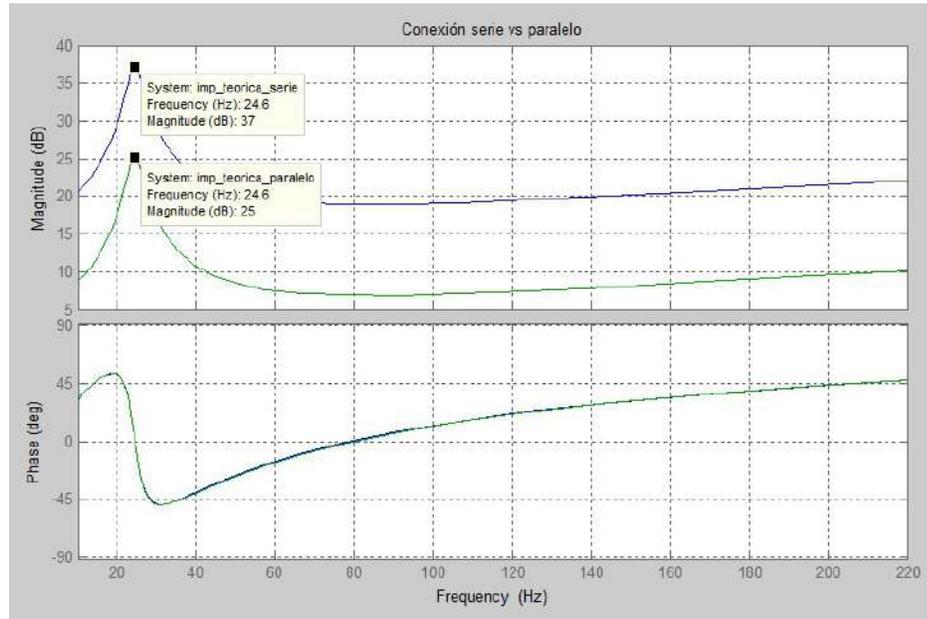


Figura 4.3: impedancia conexión serie vs paralelo

4.2. SHAKER: ALTAVOZ + ACELERÓMETRO

Como se trata de una fuente de vibraciones **controladas**, la medida de aceleración que se registra del sistema es por medio de un sensor, el sensor acelerómetro. Como se presentó en la sección 2.1.5, el acelerómetro posee un filtro pasa bajos, con lo que se está obligado a considerar su dinámica, ya que la dinámica aceleración del altavoz – tensión de excitación estará siendo perturbada por la del acelerómetro.

Ahora bien, además de la dinámica del altavoz, se considera la dinámica aportada por el acelerómetro. Este último cuenta con un filtro pasa bajos que reduce el ruido y mejora la precisión de la medición, limitando la frecuencia hasta donde llega el ancho de banda del sistema.

La ecuación teórica del Shaker que considera al altavoz e incorpora la dinámica del acelerómetro, considera modelar al acelerómetro solamente con un filtro pasa bajo RC serie de ganancia unitaria, resultando que a la dinámica del altavoz se agrega un polo como describe la ecuación (3.17) desarrollada en la sección 3.3 y tiene el siguiente aspecto.

$$\frac{\mathcal{L}(U_o)(s)}{\mathcal{L}(U_1)(s)} = \frac{1/R_1C_1}{s + 1/R_1C_1} \quad (3.17)$$



Siendo, $R = 32[k\Omega] = 32000[\Omega]$ y $C = 0,1[\mu F] = 0,0000001[F]$, dados en el manual de acelerómetro [9], se tiene que considerar la siguiente dinámica:

$$\frac{\mathcal{L}(U_o)(s)}{\mathcal{L}(U_1)(s)} = \frac{312,5}{s + 312,5} \quad (4.5)$$

Por lo tanto, considerando la dinámica del altavoz con las bobinas en conexión paralelo (ecuación (4.2)) y la dinámica del acelerómetro (ecuación (4.5)), la dinámica del Shaker es:

$$G_{acel} = \frac{8,9 s^2}{3,4933 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 0,3987035 \cdot s^2 + 98,135761 \cdot s + 9227,46781} \cdot \frac{312,5}{(s + 312,5)}$$

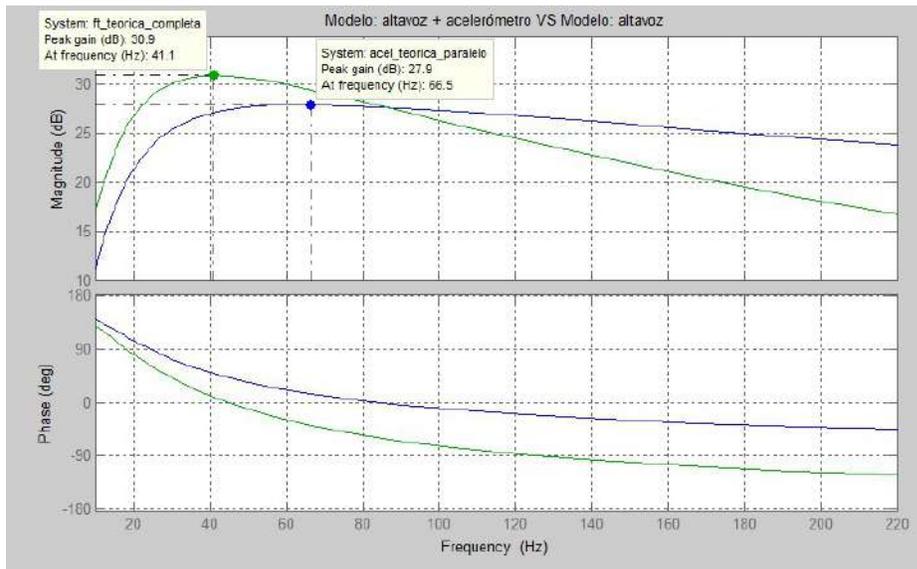


Figura 4.4: Aceleración vs tensión de entrada teórica del Shaker

En la *figura 4.4* se tiene una comparativa cualitativa de la dinámica teórica del Shaker considerando las dos hipótesis presentadas. Donde en color azul se puede apreciar la dinámica del Shaker donde sólo está representada por el comportamiento del altavoz y de color verde se tiene la dinámica teórica representada por el altavoz y el acelerómetro. Como se puede apreciar, al tener un filtro pasa bajo como modelo del acelerómetro, las altas frecuencia son atenuadas. En la sección 6 se analiza detalladamente en conjunto a los modelos experimentales que se desarrollan en la sección 5.



5. ESTIMACIÓN DE FUNCIÓN TRANSFERENCIA

En este capítulo, se presentan algunas condiciones y conclusiones derivadas del análisis de los datos experimentales del sistema. Mediante la utilización de herramientas de Matlab, se lleva a cabo el procesamiento de datos, la evaluación de comportamientos y la validación de los modelos propuestos en este proyecto, lo cual resulta en la obtención de un valor numérico para estimar las funciones que describen la dinámica del sistema. Asimismo, se utiliza algoritmos de Matlab para determinar modelos dinámicos del sistema.

5.1. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.1.1. REGISTROS DE DATOS

Con el fin de estudiar el comportamiento del sistema, se aplica una señal de excitación $E_i(t)$ senoidal a través de un generador de funciones, realizando un barrido en frecuencia dentro del rango de interés.

$$E_i(t) = \hat{E} \sin(2\pi ft)$$

Al desconocer el comportamiento real del sistema, **se estiman los valores máximos de tensión de entrada y ganancia** para realizar las experimentaciones en base a: la sensibilidad de entrada del amplificador y la sensibilidad de salida de los equipos de audio convencionales que inyectan señales sonoras, como estéreos, entre otros.

La **sensibilidad de entrada del amplificador** es un parámetro importante que determina el rango de tensiones en el que el amplificador puede proporcionar una señal de salida de calidad suficiente para alimentar altavoces, grabar en un dispositivo de almacenamiento u otras aplicaciones. Si la señal de entrada es demasiado débil, se puede producir ruido en la señal de salida o simplemente no amplificarla adecuadamente. Por otro lado, si la señal de entrada tiene una gran amplitud y se encuentra por encima del rango de tensiones de sensibilidad, la señal de salida se distorsionará y se puede dañar el amplificador. Es importante tener en cuenta que la sensibilidad de entrada del amplificador puede variar según el diseño y la configuración del mismo, así como de las características de la señal de entrada. De la sección 1.1.3, se sabe que la sensibilidad del amplificador está contemplada entre $200[mV]$ y $6[V]$.



La **sensibilidad de salida de los equipos que reproducen audio** (estéreos, etc.) es la capacidad del equipo para producir una señal de audio en su salida a partir de una señal de entrada determinada. Esta capacidad está influenciada por varios factores, como la calidad de los componentes electrónicos, la calidad del diseño del circuito, la eficiencia de la fuente de alimentación, entre otros. El rango de valores de sensibilidad de salida puede variar ampliamente dependiendo del equipo de audio que se analice. Por ejemplo, un estéreo de audio reproduce señales desde $100[mV]$ hasta $2[V]$.

En lo que respecta al **barrio en frecuencia** para ver el comportamiento, se tiene distinto tipo de limitaciones:

- Por un lado, se analiza la **limitación inferior** de poder reproducir fielmente las señales por debajo de los $20[Hz]$, ya que el altavoz es un equipo diseñado para reproducir señales de audio para los seres humanos. Específicamente, el altavoz adquirido por la UNLPam tiene una frecuencia de resonancia de $25[Hz]$ (como se puede apreciar en la *Figura 4.4 y 4.5* de la impedancia del altavoz), con lo cual, a partir de esa frecuencia el subwoofer se debería comporta linealmente. Se conoce que, con el diseño de la caja acústica, se podría obtener valores aún por debajo de la frecuencia resonante del altavoz libre [6]. Con lo cual, se propone como el mínimo $20[Hz]$ para abarcar todas las posibilidades.
- En cuanto a **la mayor frecuencia**, se utiliza $200[Hz]$ debido a las fuerzas inerciales generada por la aceleración de los posibles objetos que vaya a vibrar y la resistencia de los materiales que componen el altavoz. Además, el uso del Shaker para cosecha de energía con vigas piezoeléctricas está por debajo de dicha frecuencia.

A partir del marco establecido de los parámetros experimentales, se realizan 13 pruebas (*Tabla 5.1*) con distintos valores de ganancia del amplificador y amplitudes de tensión de entrada.



Ganancia	Experiencia	Amplitud de tensión [mV]	Barrido de frecuencia [Hz]
Mínima	N°1	50	20 – 200
	N°2	100	
	N°3	200	
	N°4	300	
	N°5	400	
25%	N°6	50	20 – 200
	N°7	100	
	N°8	200	
	N°9	300	
	N°10	400	
50%	N°11	50	20 – 200
	N°12	100	
	N°13	200	

Tabla 5.1: Experimentaciones realizadas

Al elevar la **ganancia al 50%**, se limita la experimentación a amplitudes de tensión **hasta 200 [mV] inclusive** debido a que se genera un desplazamiento extremo del cono poniendo en peligro la integridad mecánica del altavoz, principalmente, a baja frecuencia.

5.1.2. ZONA LINEAL: ANÁLISIS DE ARMÓNICOS

Algunos componentes del sistema en determinadas condiciones pueden introducir armónicos indeseables en la respuesta del sistema, para ello se realiza un análisis donde se determina: rango de frecuencias en hertz, amplitud de señal a inyectar en volt y porcentaje de amplificación del amplificador en el cual la salida del sistema no se vea afectada por los armónicos.

Considerando que el generador de funciones inyecta una señal senoidal pura, en la salida del sistema de acuerdo al modelo teórico lineal planteado, el acelerómetro debería recolectar una señal senoidal pura. Sin embargo, en las experimentaciones puede que esto no ocurra, ya que la presencia de fenómenos físicos no lineales en el sistema (los cuales no han sido modelados) pueden introducir su dinámica distorsionando las señales de salida y denotando la presencia de armónicos. Por lo tanto, analizando la **presencia de armónicos** en la señal de salida, se puede determinar si **hay no linealidades en el sistema** y acotar en qué amplitudes de onda de la señal de entrada y ganancia del amplificador el sistema se comporta linealmente.



Ahora bien, para analizar la presencia o ausencia de armónicos en el barrido de frecuencia con las distintas amplitudes de ondas y ganancias del amplificador se utiliza una **descomposición espectral evolutiva**. Esta técnica, consiste en aplicar la función “spectrogram” en Matlab utilizada para crear un espectrograma. En un espectrograma, la señal se divide en segmentos pequeños, y para cada uno de estos segmentos se calcula la transformada de Fourier de tiempo corto (STFT) para obtener la distribución de energía en frecuencia en ese segmento. Luego, mediante la función “surf” se crea una representación tridimensional de datos en forma de superficie donde en el eje horizontal se tiene el tiempo de la experimentación, en el eje vertical la frecuencia y el rango de colores indica la magnitud de la densidad de energía espectral de la señal.

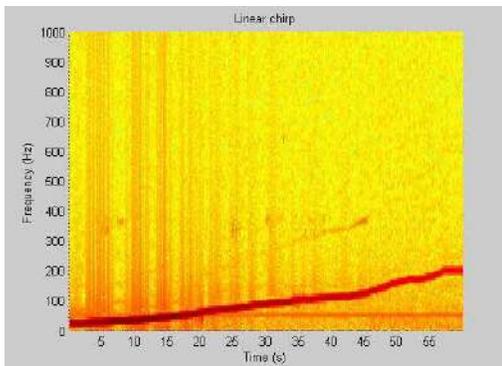


Figura 5.2: 50mV – Ganancia mínima

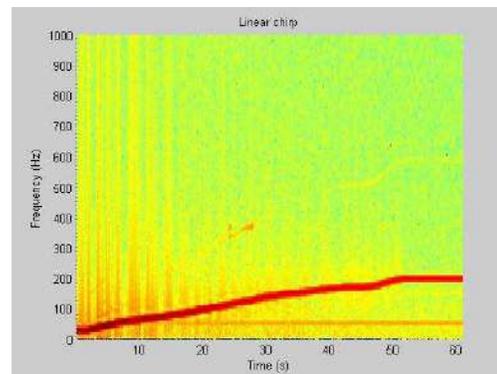


Figura 5.2: 100mV – Ganancia mínima

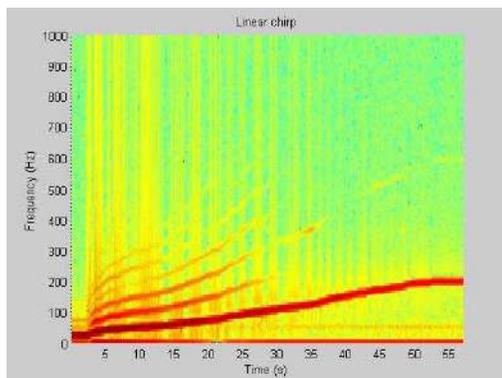


Figura 5.3: 200mV – Ganancia mínima

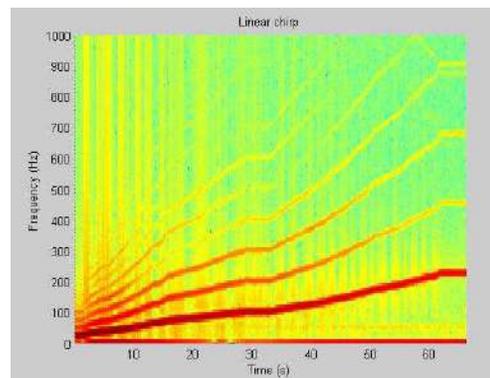


Figura 5.4: 300mV – Ganancia mínima

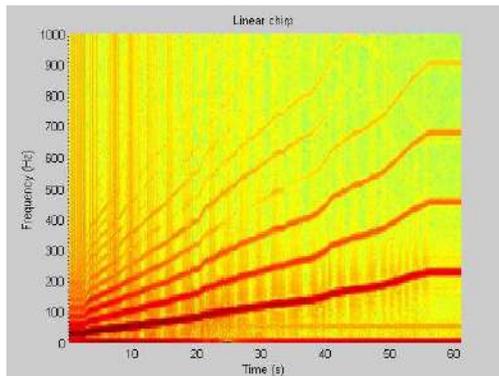


Figura 5.5: 400mV – Ganancia mínima

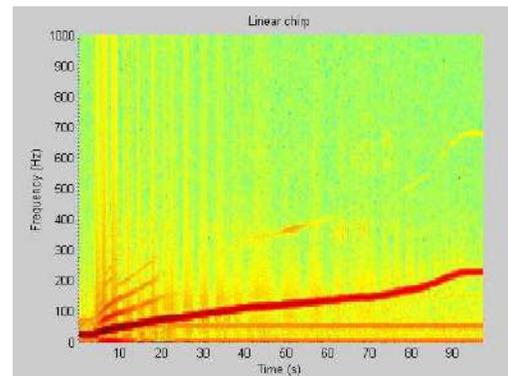


Figura 5.6: 50mV – Ganancia 25%

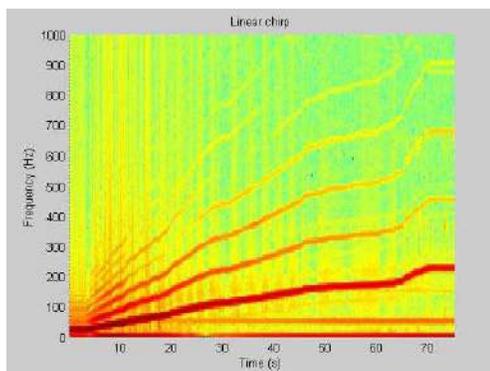


Figura 5.7: 100mV – Ganancia 25%

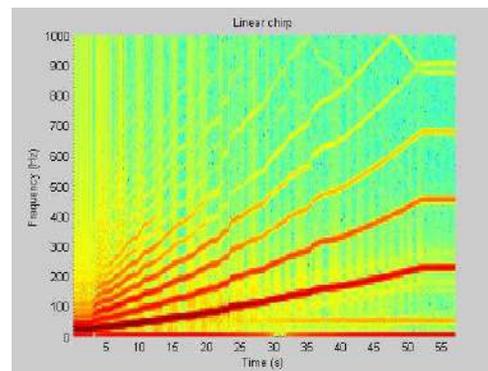


Figura 5.8: 200mV – Ganancia 25%

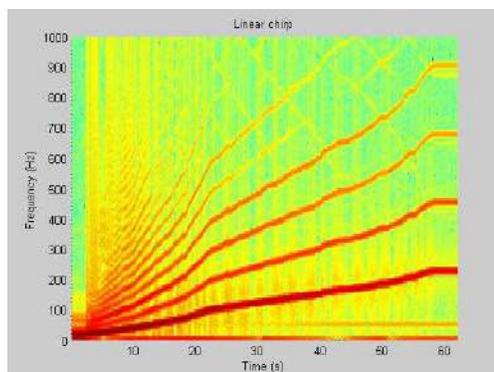


Figura 5.9: 300mV – Ganancia 25%

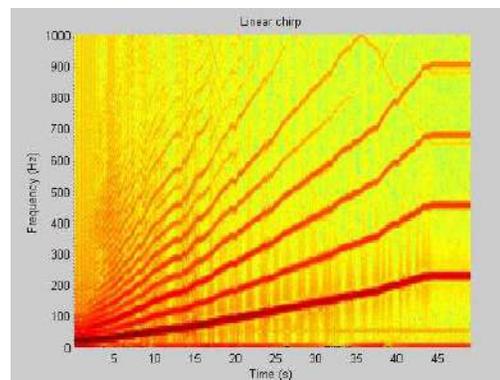


Figura 5.10: 400mV – Ganancia 25%

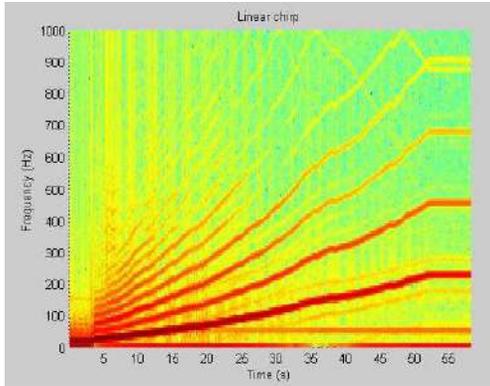


Figura 5.13: 50mV – Ganancia 50%

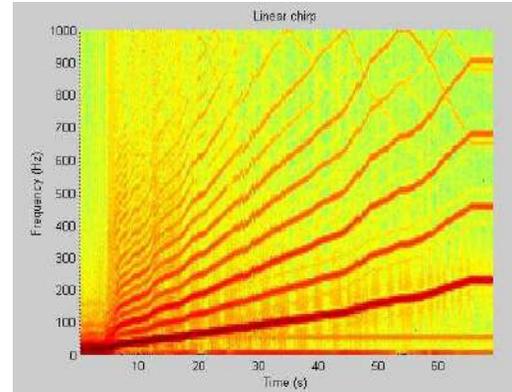


Figura 5.42: 100mV – Ganancia 50%

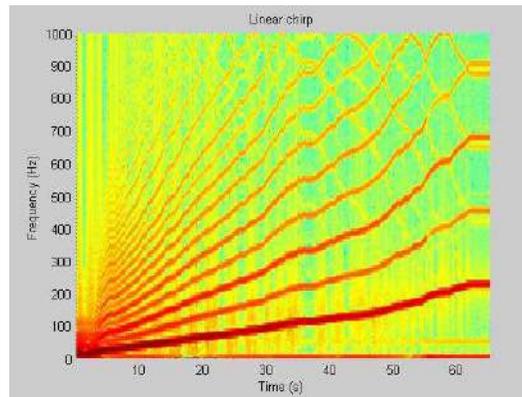


Figura 5.13: 200mV – Ganancia 50%

En la parte inferior de las *figuras 5.1 a 5.13* puede verse una línea ascendente de alta densidad de energía. Ésta representa la evolución temporal de la respuesta lineal del sistema al excitarla con una señal del tipo Chirp.

En forma conjunta a la línea de alta densidad, se puede observar otras líneas ascendentes de menor energía. Éstas representan los armónicos que componen la señal de salida del sistema (acelerómetro) y ponen en evidencia que la misma no es una sinusoidal pura en todas las ocasiones. La energía de estos armónicos depende de la magnitud de la señal chirp que excita el sistema y la ganancia propia del amplificador.

5.1.2.1. LÍMITES DE GANANCIA Y TENSIÓN DE ENTRADA

Para realizar la estimación de la función transferencia que describe la dinámica del sistema, en primer lugar, se analiza la cantidad de armónicos que posee las señales generadas por el acelerómetro y registradas con el set up armado en el laboratorio para validar en que valores de



tensión el sistema presenta un comportamiento no lineal y de esa forma encontrar para que valores de tensión el modelo presentado es válido.

A partir del análisis espectral evolutivo se observa como varía la presencia de armónicos a medida que se incrementa el valor de tensión que llega al altavoz. Este incremento puede darse por diferentes motivos, incrementar la magnitud de la señal de excitación y/o la ganancia del amplificador.

En la *figura 5.1 (50mV - Ganancia mínima)*, se puede observar que no presenta comportamientos notorios de armónicos. Sin embargo, debido a que la amplitud de la señal de excitación es muy baja, el nivel de ruido comienza a ser relevante denotando una tonalidad amarilla en el análisis espectral. Por el contrario, en la *figura 5.2 (100mV - Ganancia mínima)*, el ruido **no es apreciable** y la presencia de armónicos es **insignificante**. En cuanto a la *figura 5.3 (200mV - Ganancia mínima)*, el ruido deja de ser un inconveniente, pero la presencia de armónicos comienza a ser relevante en los datos registrados.

Por otro lado, en la *figura 5.6 (50mV – Ganancia 25%)* comienza a notarse la presencia de armónicos lo que indica que, al incrementar la ganancia del amplificador, aumenta la probabilidad de contener armónicos la señal de salida.

En conclusión, del análisis espectral evolutivo comprendido en el rango de frecuencia entre los 20 y 200[Hz], se puede identificar que el sistema presenta una zona de comportamiento lineal si la ganancia del amplificador se encuentra entre el mínimo y el 25% del total y las amplitudes de tensión máxima de la señal de excitación están comprendidas entre los 50[mV] y valores cercanos a 100[mV].

5.1.2.2. FENÓMENO ALIASING

A partir del análisis espectral evolutivo y considerando que en las experimentaciones se utilizó una frecuencia de muestreo de 2000[Hz] se observa que, cuando las componentes de frecuencia donde se evalúa el modelo llegan a valores cercanos a los 1000[Hz], se puede apreciar el fenómeno llamado **aliasing** (*figura 5.14*). El aliasing se da cuando la señal analógica continua se convierte a una señal digital discreta mediante el proceso de muestreo, la señal original se divide en muestras que se toman a intervalos regulares de tiempo. Como la frecuencia de muestreo no es lo suficientemente alta, la señal analógica original no puede ser reconstruida de manera adecuada y se produce este fenómeno.

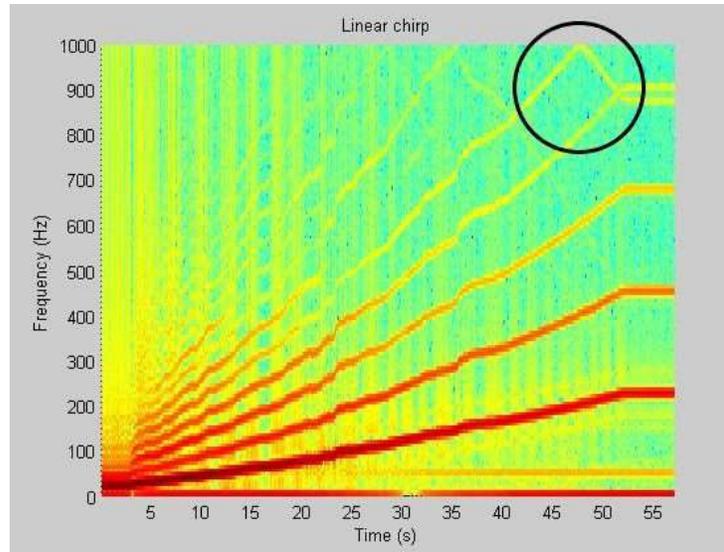


Figura 5.14: fenómeno de aliasing

Para evitar este problema, se utiliza el teorema de Nyquist-Shannon que establece que la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima de la señal analógica. De esta manera, se asegura que se capturen todas las frecuencias presentes en la señal y se pueda reconstruir de manera adecuada en su forma analógica original. Además, se puede utilizar un filtro pasa bajos antes del proceso de digitalización para atenuar las componentes de alta frecuencia.

5.2. TOOLBOX IDENTIFICATION

En la sección 5.1.2 se llevó a cabo una técnica de análisis para observar cualitativamente el comportamiento del sistema con los datos recolectados. A continuación, con el **objetivo de identificar la dinámica del sistema real**, se aplica una técnica de identificación de modelos basado en las herramientas y algoritmos de Toolbox Identification de Matlab a partir de los datos de entrada/salida.

Los algoritmos de Toolbox Identification permiten obtener una función transferencia a partir de los datos experimentales. Existen varias metodologías, una de ellas es aquella en la cual se prefija la estructura en tanto a cantidad de polos y ceros de la dinámica que se quiere aproximar. En este sentido, utilizando el marco teórico del Shaker analizado en la sección 5 resultan dos posibles escenarios.

En una primera instancia, se considera como hipótesis que la **dinámica del sistema está determinada por el comportamiento únicamente del altavoz (Sección 4.1)**. El resultado es



una **función de transferencia con dos ceros y tres polos**. Por otro lado, como el acelerómetro posee dinámica, se opta por realizar un modelo considerando la **dinámica del altavoz y la aportada por el acelerómetro (Sección 4.2)**. El resultado es una **función de transferencia con dos ceros y cuatro polos**.

Con estos dos supuestos, se procede a configurar los algoritmos de Toolbox Identification y procesar los datos recolectados en las experiencias. Como resultado, se obtuvo diferentes funciones transferencia en base a las distintas amplitudes de señales de excitación y ganancia del amplificador. Asimismo, las herramientas de toolbox permite obtener una calidad de aproximación a los datos experimentales de la función transferencia generada, a partir de un escalar denominado “Fit to estimation data”, lo que da lugar a los resultados que se pueden apreciar en la *tabla 5.2*. Este valor es una medida escalar generada por los algoritmos de Matlab que si resulta cero (0) indica que no puede aproximar la función transferencia y si resulta 100 indica que la aproximación es excelente.

Experiencias		Altavoz (2 ceros y 3 polos)		Altavoz-acelerómetro (2 ceros y 4 polos)	
Gain	Barrido de 20 a 200 Hz	Nombre	Fit to estimation data	Nombre	Fit to estimation data
Mínimo	zeroG_Exp50mV	zeroG_parl_50mV	11,94	zeroG_ace1_50mV	95,61
	zeroG_Exp100mV	zeroG_parl_100mV	89	zeroG_ace1_100mV	94,48
	zeroG_Exp200mV	zeroG_parl_200mV	12,87	zeroG_ace1_200mV	64,24
	zeroG_Exp300mV	zeroG_parl_300mV	8,55	zeroG_ace1_300mV	79,59
	zeroG_Exp400mV	zeroG_parl_400mV	72,55	zeroG_ace1_400mV	79,02
25%	25G_Exp50mV	25G_parl_50mV	-41,25	25G_ace1_50mV	89,04
	25G_Exp100mV	25G_parl_100mV	0,395	25G_ace1_100mV	46,55
	25G_Exp200mV	25G_parl_200mV	13,38	25G_ace1_200mV	-6,45
	25G_Exp300mV	25G_parl_300mV	-19,51	25G_ace1_300mV	68,66
	25G_Exp400mV	25G_parl_400mV	-7,53	25G_ace1_400mV	-41,28
50%	50G_Exp50mV	50G_parl_50mV	1,007	50G_ace1_50mV	67,99
	50G_Exp100mV	50G_parl_100mV	-37,46	50G_ace1_100mV	68,28
	50G_Exp200mV	50G_parl_200mV	-16,18	50G_ace1_100mV	60,71

Tabla 5.2: Aproximación de cada señal procesada por Toolbox Identification

Para obtener las funciones transferencias, en primer lugar, se realiza un pre-procesamiento de los datos recolectados donde se remueve el valor medio de la señal para quitar la componente de continua que agrega el acelerómetro, que está dada por la aceleración gravitacional de $9,81m/s^2$ que es considerada por el sensor. Esto se realiza al ingresar a la interface gráfica de la función “ident” de Matlab versión 2014. La función toma como entrada los datos experimentales y un modelo inicial, y devuelve un modelo identificado que se ajusta a los datos experimentales. El modelo identificado puede ser utilizado para simular y controlar el sistema dinámico.



5.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

De todas las experimentaciones procesadas con los algoritmos de Toolbox Identification de Matlab, se preservan los modelos con las medidas de estimaciones más altas y a partir de señales experimentales con menor cantidad de armónicos posibles. Con esta medida se está dando un refuerzo a que en los regímenes de excitación y amplificación el sistema se comporta linealmente y la función transferencia está aproximando correctamente el comportamiento del sistema real.

5.3.1. DINÁMICA DEL SHAKER: ALTAVOZ

Se ha obtenido la función transferencia del Shaker considerando que el comportamiento responde al orden de la función transferencia del altavoz, con un nivel de excitación de entrada de 100[mV] y la mínima ganancia del amplificador. Siendo la mejor aproximación, presenta una aproximación del 89/100 a los datos relevados, y tiene el siguiente aspecto:

$$0G_{parl_100mV} = \frac{1073 \cdot s^2 - 3327000 \cdot s + 352500000}{s^3 + 4695 \cdot s^2 + 655800 \cdot s + 245600000}$$

5.3.2. DINÁMICA DEL SHAKER: ALTAVOZ + ACELERÓMETRO

Teniendo en cuenta las mejores estimaciones según Toolbox Identification, los armónicos presentes en los datos y la presencia de ruidos, se obtiene la función de transferencia del Shaker considerando el orden la función transferencia que modela el comportamiento del altavoz con el acelerómetro para una amplitud de excitación de 100[mV] y la mínima ganancia del amplificador, resultando una aproximación del 94,48/100 de los datos relevados. Es la mejor aproximación y tiene el siguiente aspecto:

$$Shaker_altavoz_acel = \frac{-1242000 \cdot s^2 + 72600000 \cdot s - 7144000000}{s^4 + 1603 \cdot s^3 + 366500 \cdot s^2 + 84240000 \cdot s + 5934000000}$$

Si bien la señal de 50[mV] y ganancia mínima en Toolbox Identification indica que posee una mayor capacidad de estimación, considerando la baja amplitud de tensión de entrada, la presencia de ruidos comienza a ser significativa, por lo cual se opta por la siguiente señal consecutiva mayor.

En la sección 6 se realiza un análisis de la respuesta en frecuencia de las funciones transferencias obtenidas mediante Toolbox Identification y se compara con los modelos teóricos planteados en la sección 4.



6. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DEL SISTEMA

En esta sección, se llevará a cabo un balance de los resultados teóricos y experimentales obtenidos. Por un lado, se consideran las funciones de transferencia que mejor aproximan según la herramienta Toolbook Identification de Matlab y del análisis de armónicos de todos los datos registrados, filtrando las mejores aproximaciones para brindar el análisis global. Por otro lado, se analizarán las ecuaciones teóricas que podrían representar el comportamiento del sistema, las cuales fueron desarrolladas en la sección 4.

En dicho punto, se considera plasmar en un bode los datos experimentales (*figura 6.1*) que representan la señal de ganancia mínima y excitación de $100[mV]$ de amplitud, graficando el cociente de los módulos punto a punto de las Transformada de Fourier Rápida FFT de la salida (señal del acelerómetro) sobre la entrada (excitación). De esta manera, se obtiene como referencia la nube de puntos que resulta de este cómputo para la comparativa entre las distintas funciones transferencias del presente trabajo.

Asimismo, en la *figura 6.1*, se puede apreciar las siguientes funciones transferencias:

- Dinámica del **Shaker teórica** considerando únicamente el comportamiento del altavoz (sección 4.1).
- Dinámica del **Shaker teórica** considerando el comportamiento del altavoz y el aporte del acelerómetro (sección 4.2).
- Dinámica del **Shaker experimental** considerando únicamente el comportamiento del altavoz (sección 5.3.1).
- Dinámica del **Shaker experimental** considerando el comportamiento del altavoz y el aporte del acelerómetro (sección 5.3.2).

En lo que respecta al **comportamiento por encima de los $80[Hz]$** se puede observar que todos los modelos, excepto el teórico representado únicamente por el altavoz, tienen una predicción del comportamiento muy buena.

El modelo teórico del Shaker representado por el altavoz, tiene una significativa diferencia con respecto a los valores experimentales recolectados. La misma, es atenuada al considerar la dinámica aportada por el acelerómetro, logrando obtener una respuesta temporal estacionaria aceptable como indica la gráfica color verde de la *fig. 6.1*. Por su parte, los modelos



experimentales obtenidos de las herramientas de Toolbox Identification, tienen una buena representación del comportamiento estacionario del sistema denotando la gran utilidad de la herramienta de identificación de modelos de Matlab.

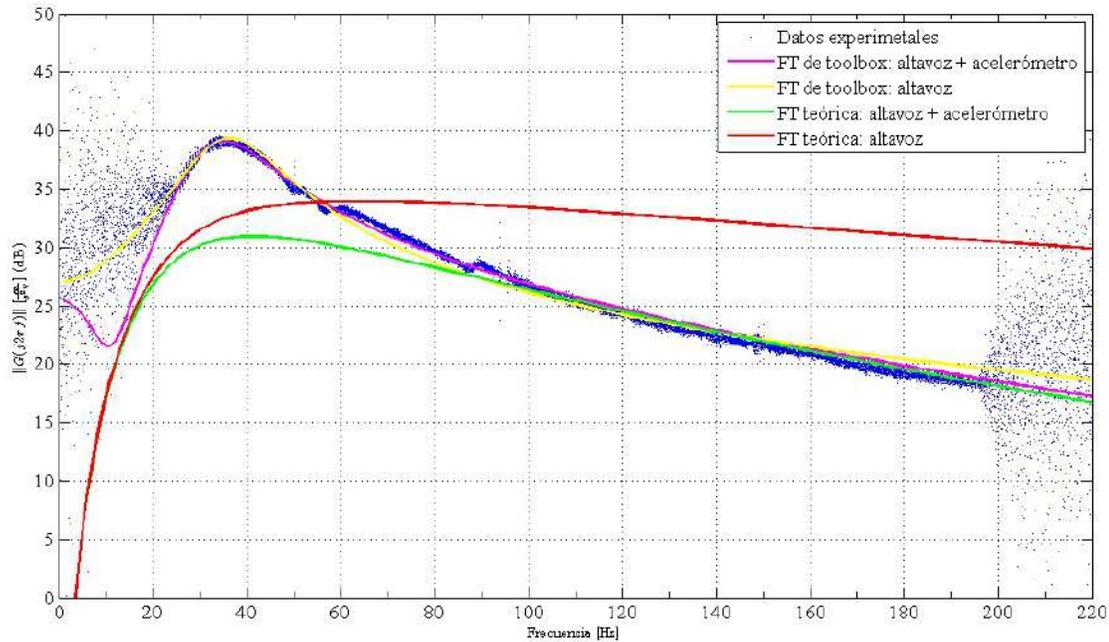


Figura 6.1: Comparativa entre los distintos modelos planteados y los datos experimentales

En lo que respecta al **comportamiento del sistema por debajo de los 80[Hz]**, se puede observar una notable diferencia entre los modelos teóricos propuestos y los resultados del algoritmo de Toolbox Identification.

Al analizar la **frecuencia de resonancia** de cada una de las señales representadas, se puede ver que el modelo teórico del Shaker representado sólo por la dinámica del altavoz tiene una frecuencia de 66,5[Hz] (gráfica roja), el modelo del Shaker considerando el altavoz y el aporte de dinámica del acelerómetro tiene una frecuencia de 41,1[Hz] (gráfica verde) y los datos experimentales representados punto a punto poseen su resonancia alrededor de los 35[Hz] (nube de puntos azules). Claramente, se puede apreciar que el aporte del acelerómetro tuvo un fuerte impacto en las altas frecuencias. Estas, son atenuadas debido al filtro pasa bajos que posee, resultando una desviación relevante del comportamiento real del sistema con respecto al que describe la función transferencia teórica representada sólo con la dinámica del altavoz. Por lo tanto, en la función transferencia que se modelada con el sistema altavoz-acelerómetro, se describe un comportamiento cualitativo muy similar a como responde realmente el sistema, con una diferencia en la frecuencia de resonancia de algunos hertz (menos de una década).



Por otro lado, se tiene que la frecuencia de resonancia del modelo brindado por el algoritmo de Toolbox Identification considerando el orden de la función transferencia del Shaker modelado con el altavoz es de 35,8[Hz], mientras que la brindada por toolbox donde se considera el orden de la dinámica del altavoz y el acelerómetro es de 34,9[Hz]. Esta similitud da lugar a concluir que **el algoritmo que utiliza Matlab para identificación de modelos posee una mejor aproximación que la función transferencia estimada de manera teórica**. Esto se debe a que cuando se utiliza los algoritmos de Toolbox Identification se define únicamente la cantidad de polos y ceros pero no se especifica las regiones donde se pueden encontrar. En cambio, en el modelo teórico, los parámetros que se encuentran en el numerador y denominador de la función transferencia están concatenados con parámetros físicos, lo cuales poseen un rango de variaciones dependiendo de las condiciones de funcionamiento y algunas propiedades físicas del sistema (mecánicas y eléctricas).

En todos los casos, se puede apreciar que la mayor discrepancia se encuentra en la descripción del comportamiento por debajo de los 80[Hz] del sistema, a pesar de ello se tiene resultados con una buena aproximación considerando que el modelo teórico introduce fuertes simplificaciones. Con lo que, las discrepancias obtenidas a baja frecuencia se pueden atribuir a fenómenos introducidos por la dinámica de la caja acústica o el amplificador que no fueron analizadas en el presente trabajo y se detallan en los datos experimentales. Otro motivo de las diferencias resultantes puede deberse a que el factor de amortiguamiento de los modelos teóricos fue sobreestimado, ya que todos los procesos disipativos ocasionan que los picos de resonancia se atenúen.

En conclusión, la función de transferencia proporcionada por el algoritmo de Matlab, que considera la cantidad de polos y ceros resultantes del modelo teórico desarrollado para el Shaker, teniendo en cuenta la dinámica del altavoz y el acelerómetro, es la que mejor representa el comportamiento del sistema.



7. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se realizó el diseño, construcción y evaluación de una fuente de vibraciones controlada a partir de un parlante comercial.

La respuesta del sistema depende, en gran parte, de las características del altavoz. Por lo que se ha invertido parte del tiempo al estudio de la variación de la respuesta en frecuencia con las distintas características del altavoz. En base a ello, se hace una elección del altavoz que luego el Laboratorio de Mecatrónica aplicada de la Facultad de Ingeniería adquiere. De igual manera, se procede con la caja acústica donde se aloja el altavoz y los demás elementos necesario para que el sistema funcione.

A pesar de que el sistema funciona correctamente para su propósito original, durante el proceso de diseño y con el objetivo constante de lograr un rendimiento óptimo del Shaker, surgieron situaciones en las cuales las características del diseño óptimo resultaban poco prácticas. Específicamente, al abordar la creación de la caja acústica con el objetivo de obtener una frecuencia natural del subconjunto altavoz-caja inferior a la frecuencia natural del altavoz, se llegaba a un volumen de caja de 300 litros o más, lo que resultaba en un Shaker de tamaño poco manejable. En vista de esto, se tomó la decisión de limitar el volumen a 60 litros, lo cual afectó ligeramente la respuesta en frecuencia al aumentar su frecuencia de resonancia. No obstante, los resultados obtenidos siguen permitiendo una predicción precisa mediante los modelos dinámicos desarrollados en este proyecto.

Se propuso dos modelos teóricos que representan de manera simplificada la dinámica del sistema, en uno de ellos sólo se considera la dinámica aportada por el altavoz y en el otro la dinámica del altavoz y el acelerómetro. Luego, considerando las herramientas proporcionadas por Toolbox Identification de Matlab se obtuvo un modelo experimental con una estructura de dos ceros y tres polos (modelo del Shaker considerando únicamente el altavoz) y otro de dos ceros y cuatro polos (modelo del Shaker considerando el altavoz con el acelerómetro).

Al finalizar las experimentaciones, procesar los datos y obtener la información de la dinámica real del sistema se pudo inferir la importancia de la dinámica aportada por el sensor acelerómetro, ya que sin considerarla el modelo planteado no describía correctamente el comportamiento del sistema.



Por otro lado, es importante destacar que los algoritmos utilizados por la herramienta de identificación de modelos de Matlab proveen un modelo con una capacidad de estimación de 95/100 de los datos recopilados del sistema.

El sistema de vibraciones mecánicas controladas (*Figura 7.1*) que se acaba de diseñar y desarrollar presenta un comportamiento lineal que es esperable para un instrumental de este índole dentro de determinado rango de amplificación y excitación. Es decir, se analizó el comportamiento del Shaker y se conoce la zona de configuración de sus parámetros para que se comporte de manera lineal, transformándose en una herramienta útil para realizar pruebas de vibraciones controladas.

Shaker electrodinámico magnético



Características del equipo

- Fuerza senoidal mayor a 1[$\text{kg}\cdot\text{f}$] pico.
- Carrera o excursión máxima: 10,16[mm] (0,4[in])
- Base diseñada y fabricada con impresora 3D para adosar el piezoeléctrico a ensayar y sensor acelerómetro.
- Rango de frecuencia donde el modelo del Shaker es válido de 20 a 200 [Hz].
- Rango de amplificación de la señal a inyectar para vibrar va del **mínimo al 25%**.
- Rango de amplitud de tensión de la señal a inyectar para vibra de **50 a 100 [mV]**.

Figura 7.1: Características del Shaker diseñado.



8. ANEXOS

8.1. CÁLCULOS AUXILIARES

En el presente capítulo se presentan los cálculos realizado para obtener las funciones transferencias del altavoz (de la aceleración en función a la tensión de entrada y de la impedancia del altavoz).

ACELERACIÓN EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN DE ENTRADA

Remplazando los valores dados en el manual del altavoz [5] en la siguiente ecuación (3.12),

$$\frac{\mathcal{L}(\ddot{x})(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{Ts^2}{mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR}$$

Se obtienen dos funciones transferencia, dependiendo la conexión de las bobinas, con lo cual:

Bobinas en serie:

$$Ts^2 = 17,7s^2 \left[\frac{kg \cdot m}{A \cdot s^2} \right]$$

$$mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR$$

- $mL = (0,181kg) \left(0,00773 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} \right) = 1,39913 \cdot 10^{-3} \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} \right]$
- $cL + mR = \left(4,95 \frac{kg}{s} \right) \left(0,00773 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} \right) + (0,181kg) \left(8,6 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} \right)$

$$cL + mR = 1,5948635 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} \right]$$

- $T^2 + kL + cR = \left(17,7 \frac{kg \cdot m}{A \cdot s^2} \right)^2 + \left(4291,845494 \frac{kg}{s^2} \right) \left(0,00773 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} \right) + \left(4,95 \frac{kg}{s} \right) \left(8,6 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} \right)$

$$T^2 + kL + cR = 389,0359657 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^4} \right]$$

- $kR = \left(4291,845494 \frac{kg}{s^2} \right) \left(8,6 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} \right) = 36909,87125 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^5} \right]$

Luego,

$$1,39913 \cdot 10^{-3} \cdot s^3 + 1,5948635 \cdot s^2 + 389,0359657 \cdot s + 36909,87125$$



Finalmente,

$$\frac{\mathcal{L}(\ddot{x})(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{17,7 \cdot s^2}{1,39913 \cdot 10^{-3} \cdot s^3 + 1,5948635 \cdot s^2 + 389,0359657 \cdot s + 36909,87125}$$

Bobinas en paralelo:

$$Ts^2 = 8,9s^2$$

$$mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR$$

- $mL = (0,181kg) \left(0,00193 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right) = 3,4933 \cdot 10^{-4} \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right]$
 - $cL + mR = \left(4,95 \frac{kg}{s}\right) \left(0,00193 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right) + (0,181kg) \left(2,15 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}\right)$
- $$cL + mR = 0,3987035 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}\right]$$
- $T^2 + kL + cR = \left(8,9 \frac{kg \cdot m}{A \cdot s^2}\right)^2 + \left(4291,845494 \frac{kg}{s^2}\right) \left(0,00193 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right) + \left(4,95 \frac{kg}{s}\right) \left(2,15 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}\right)$
- $$T^2 + kL + cR = 98,1357618 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^4}\right]$$
- $kR = \left(4291,845494 \frac{kg}{s^2}\right) \left(2,15 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}\right) = 9227,467812 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^5}\right]$

Luego,

$$3,4933 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 0,3987035 \cdot s^2 + 98,1357618 \cdot s + 9227,467812$$

Finalmente,

$$\frac{\mathcal{L}(\ddot{x})(s)}{\mathcal{L}(E)(s)} = \frac{8,9 s^2}{3,4933 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 0,3987035 \cdot s^2 + 98,1357618 \cdot s + 9227,467812}$$

IMPEDANCIA DE LA BOBINA

Reemplazando los valores dados en el manual del altavoz [5] en la siguiente ecuación (3. 15),

$$\frac{\mathcal{L}(E)(s)}{\mathcal{L}(i)(s)} = \frac{mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR}{ms^2 + cs + k}$$



Se obtienen dos funciones transferencia, dependiendo la conexión de las bobinas, con lo cual:

Bobinas en serie:

$$ms^2 + cs + k = 0,181s^2 + 4,95s + 4291,845494$$

$$mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR$$

- $mL = (0,181kg) \left(0,00773 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right) = 1,39913 \cdot 10^{-3} \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right]$

- $cL + mR = \left(4,95 \frac{kg}{s}\right) \left(0,00773 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right) + (0,181kg) \left(8,6 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}\right)$

$$cL + mR = 1,5948635 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}\right]$$

- $T^2 + kL + cR = \left(17,7 \frac{kg \cdot m}{A \cdot s^2}\right)^2 + \left(4291,845494 \frac{kg}{s^2}\right) \left(0,00773 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right) + \left(4,95 \frac{kg}{s}\right) \left(8,6 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}\right)$

$$T^2 + kL + cR = 389,0359657 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^4}\right]$$

- $kR = \left(4291,845494 \frac{kg}{s^2}\right) \left(8,6 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}\right) = 36909,87125 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^5}\right]$

Luego,

$$1,39913 \cdot 10^{-3} \cdot s^3 + 1,5948635 \cdot s^2 + 389,0359657 \cdot s + 36909,87125$$

Finalmente,

$$\frac{\mathcal{L}(E)(s)}{\mathcal{L}(i)(s)} = \frac{1,39913 \cdot 10^{-3} \cdot s^3 + 1,5948635 \cdot s^2 + 389,0359657 \cdot s + 36909,87125}{0,181s^2 + 4,95s + 4291,845494}$$

Bobinas en paralelo:

$$ms^2 + cs + k = 0,181s^2 + 4,95s + 4291,845494$$

$$mLs^3 + (cL + mR)s^2 + (T^2 + kL + cR)s + kR$$

- $mL = (0,181kg) \left(0,00193 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right) = 3,4933 \cdot 10^{-4} \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right]$

- $cL + mR = \left(4,95 \frac{kg}{s}\right) \left(0,00193 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}\right) + (0,181kg) \left(2,15 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3}\right)$



$$cL + mR = 0,3987035 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} \right]$$

$$\bullet T^2 + kL + cR = \left(8,9 \frac{kg \cdot m}{A \cdot s^2} \right)^2 + \left(4291,845494 \frac{kg}{s^2} \right) \left(0,00193 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} \right) + \left(4,95 \frac{kg}{s} \right) \left(2,15 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} \right)$$

$$T^2 + kL + cR = 98,1357618 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^4} \right]$$

$$\bullet kR = \left(4291,845494 \frac{kg}{s^2} \right) \left(2,15 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^3} \right) = 9227,467812 \left[\frac{kg^2 \cdot m^2}{A^2 \cdot s^5} \right]$$

Luego,

$$3,4933 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 0,3987035 \cdot s^2 + 98,1357618 \cdot s + 9227,467812$$

Finalmente,

$$\frac{\mathcal{L}(E)(s)}{\mathcal{L}(i)(s)} = \frac{3,4933 \cdot 10^{-4} \cdot s^3 + 0,3987035 \cdot s^2 + 98,1357618 \cdot s + 9227,467812}{0,181s^2 + 4,95s + 4291,845494}$$



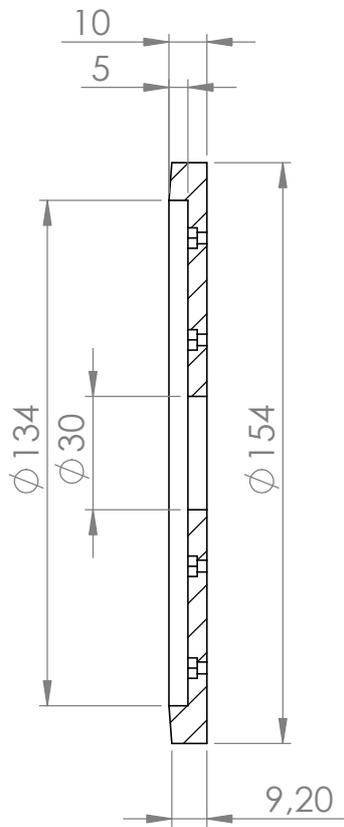
8.2. PLANOS DE BASE INTERFACE

Los planos de las 3 piezas individuales que componen la base interface (base parlante, base acelerómetro y base piezoeléctrico) está adjuntos en formato PDF.

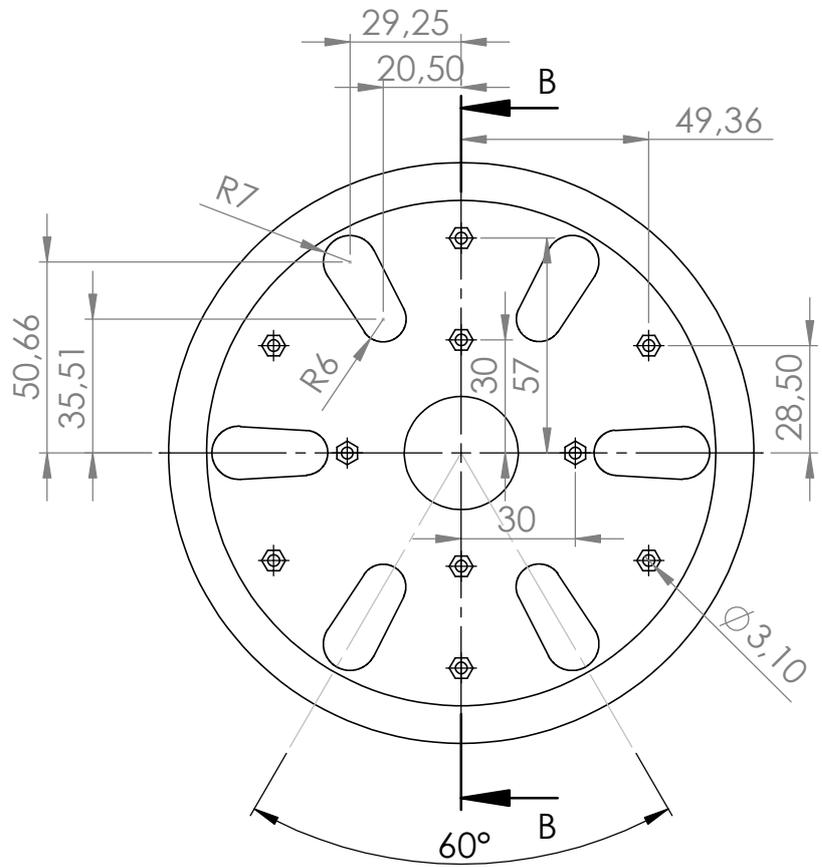


9. BIBLIOGRAFÍA

1. *Manual de Prácticas de Transductores y Convertidores Eléctricos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Gloria Mata Hernández, Juan Manuel Gómez González, Ricardo Garibay Jiménez. 1993*
2. A. PREUMONT. *Mechatronics. Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems. 2006 Springer.*
3. *Apuntes teóricos de la cátedra Altavoces – Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.*
4. *Manual del fabricante Beyma Professional Loudspeakers – Valencia, España.*
5. *Manual del subwoofer Pioneer TS-A300D4 de 12”.*
6. [PCP audio - The audio reference website](#)
7. [WinISD - Linearteam](#)
8. *Manual del amplificador B52 RC-802.*
9. *Manual del sensor acelerómetro ADXL203 de Analog Devices.*
10. *Manual de placa adquisidora de datos LabJack U6.*
11. H. Litwhiler. Penn State University. *A Custom Vibration Test Fixture Using a Subwoofer. Proceedings of The 2011 IAJC-ASEE International Conference. ISBN 978-1-60643-379-9.*
12. C D Gatti, J M Ramirez, M Febbo and S P Machado. *Effect of nonlinearities and objective function in optimization of an energy harvesting device. 11 de abril 2017. Bahía Blanca, Argentina.*
13. [U6 Datasheet Overview - Support & Documentation – LabJack](#)
14. [Documentation - MATLAB & Simulink - MathWorks América Latina](#)
15. [ET132_203_datasheet.pdf \(labworks-inc.com\)](#)



SECCIÓN B-B
ESCALA 1 : 2



TÍTULO:

SOPORTE PARLANTE

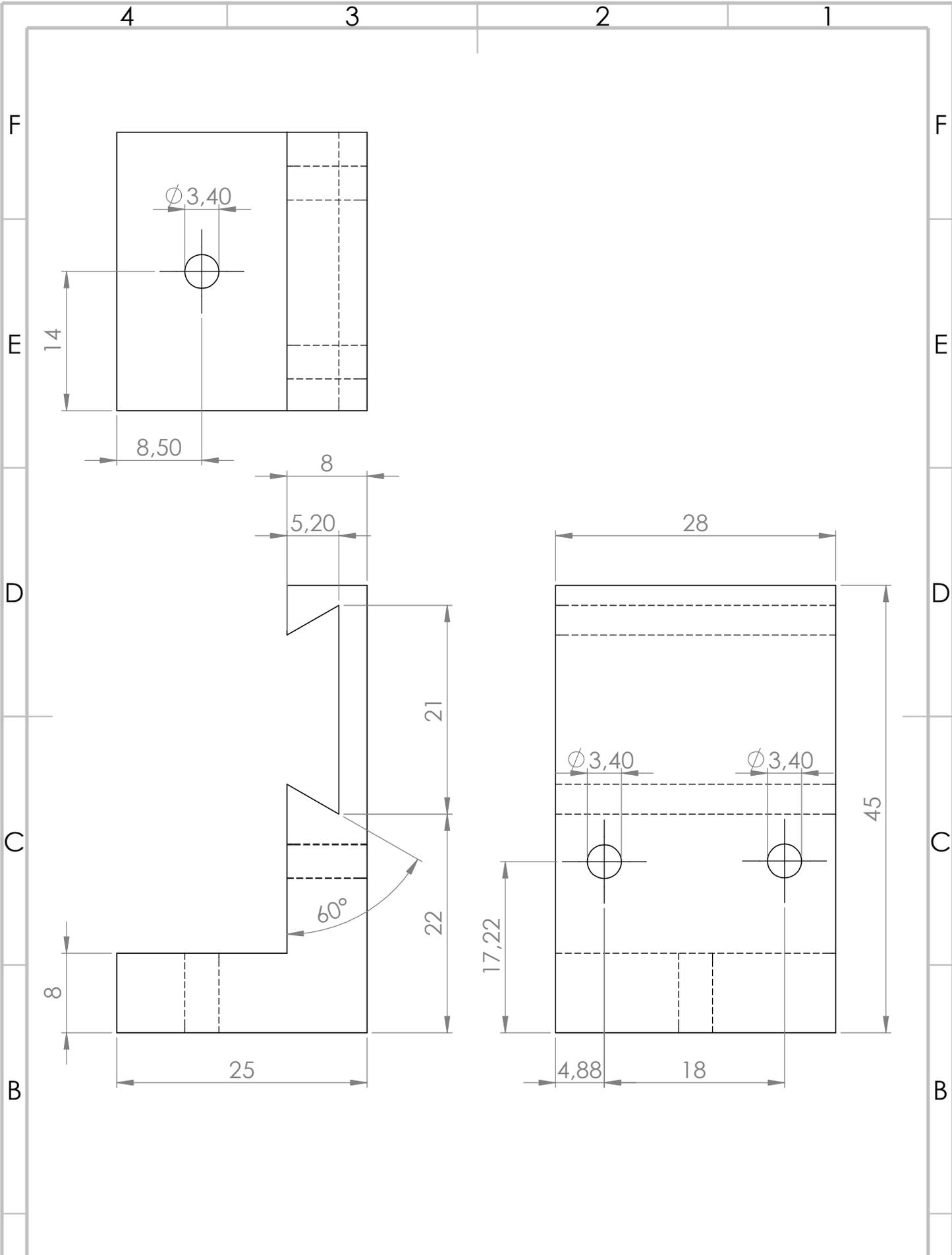
N.º DE DIBUJO

A4

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.			15/08/23		
VERIF.					
APROB.					

ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 1



					TÍTULO:		SOPORTE ACCELEROMETRO	
					N.º DE DIBUJO		A4	
DIBUJ.		FIRMA		FECHA	15/08/23			
VERIF.								
APROB.						ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1

F

F

E

E

D

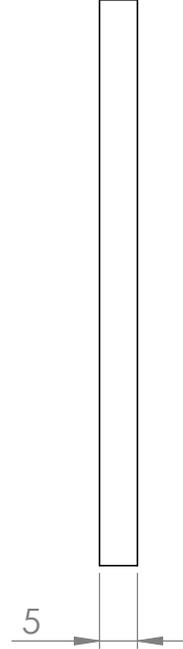
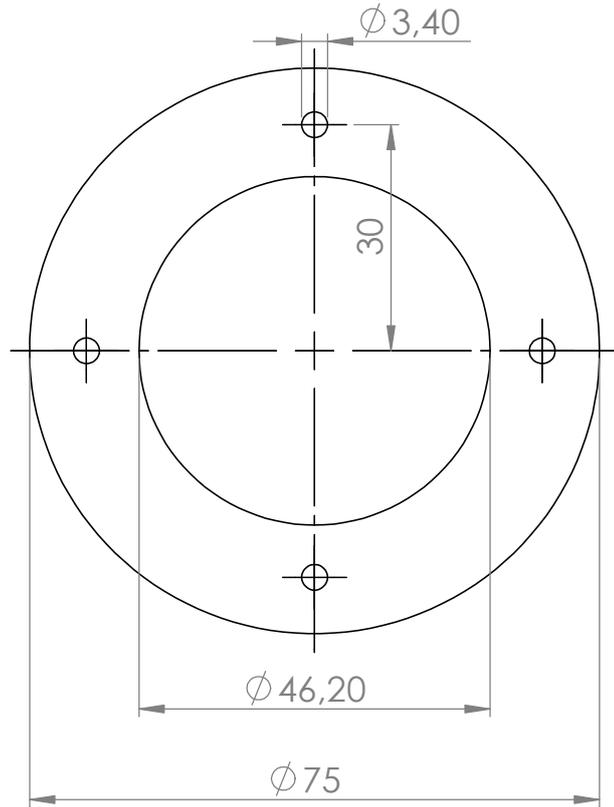
D

C

C

B

B



A

A

TÍTULO:
SOPORTE PIEZOELECTRICO

	NOMBRE	FIRMA	FECHA			
DIBUJ.			15/08/23			
VERIF.						
APROB.						

N.º DE DIBUJO

A4

ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1

4 3 2 1