



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Caracterización electromecánica de un Altavoz
subwoofer como *shaker low cost* para excitar
estructuras a escala.

Departamento: Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del
Terreno, Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.

Autor: García Alonso, Jesús M^a

Tutor: Lorenza Ibán, Antolín

Tutor: Magdaleno González, Álvaro

Valladolid, Julio de 2017.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Agradecimientos.

En primer lugar quisiera agradecer a mis tutores D. Antolín y D. Álvaro su apoyo y ayuda durante estos meses. Ha sido un placer disponer de su tiempo, poder seguir aumentando mis conocimientos y compartir con ellos todos los pasos que se han ido dando a lo largo de todo este proyecto.

A los profesores que a lo largo de todos estos años me han demostrado su compromiso y sus ganas de enseñarnos porque, aunque quizá no debería influirnos, siempre es agradable ver su compromiso para con nosotros, y en mi caso eso me hacía esforzarme más para no defraudarlos.

A mis compañeros de la escuela, sobre todo a los *Mecanivips*, a los amigos y amigas que a lo largo de todos estos años he conocido y a aquellos con los que siempre he contado. Poder presentar este proyecto es en gran parte gracias a ellos, por toda la ayuda prestada en las incontables horas de estudio y los ánimos en los momentos más duros.

Y por último a mi familia, en especial a mis padres y mi hermano, por su constante preocupación y apoyo, por su sacrificio y por los ánimos para que no me rindiese ante todos los resultados inesperados en estos años.

A todos, muchas gracias.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Resumen.

El objetivo de este TFG ha sido el estudio y la caracterización de un altavoz como elemento principal en la sustitución del excitador electrodinámico (*shaker*) como elemento fundamental en la excitación de estructuras a escala. Se pretendió, en los pasos que se fueron dando a lo largo de todo el TFG, ir disminuyendo el costo de los equipos sin perder eficacia.

En primer lugar se caracterizó un *shaker* haciéndole funcionar con una aplicación para teléfono móvil y un *script* creado con el programa Matlab. En ambos casos lo que se hacía era generar con una onda senoidal con diferentes amplitudes y frecuencias y estudiar el comportamiento que tenía ese *shaker* al reproducir en él dicha onda. Tras esto, se caracterizó de igual manera el altavoz con el que se pretendía sustituir al *shaker*, realizando las mismas pruebas que las efectuadas con éste último más las correspondientes con los dos equipos Arduino que se crearon exprofeso para este trabajo fin de grado (TFG).

Tras todos los ensayos que se realizaron pudo verse que el funcionamiento del baffle y del *shaker*, aunque con diferencias como era de esperar debido a que el altavoz no estaba diseñado para efectuar el trabajo que se le estaba encomendando, presentaba muchas similitudes. Las últimas pruebas que se llevaron a cabo estuvieron enfocadas a una aplicación práctica empleando el altavoz bajo la influencia de los Arduinos. Sobre una de las vigas presentes en el laboratorio se colocó el altavoz, con el que se hizo un barrido en todo el rango de frecuencias que se tenía programado en el Arduino DUE para así excitar la mencionada viga y corroborar que se había logrado el objetivo de tener un excitador electrodinámico con un simple altavoz de un equipo de audio.

Palabras clave: *shaker*; *low cost*; altavoz; fuerza; Arduino; Matlab script; frecuencia.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Índice

1.	Introducción.....	1
1.1.	Justificación.....	1
1.2.	Objetivos.....	1
2.	Funcionamiento de altavoz.....	3
3.	Equipo.....	7
3.1.	Equipos de adquisición de datos.....	7
3.2.	Altavoz, fuente de alimentación y etapa de potencia.....	14
3.3.	<i>Shaker</i>	17
3.4.	Arduino.....	19
4.	Caracterización del <i>shaker</i>	29
4.1.	Caracterización de <i>shaker</i> a través de la aplicación móvil.....	30
4.2.	Caracterización del <i>shaker</i> a través del <i>script</i> de Matlab.....	37
5.	Caracterización del altavoz.....	43
5.1.	Caracterización sin masa.....	43
5.1.1.	Caracterización sin masa a través de la aplicación móvil.....	44
5.1.2.	Caracterización sin masa a través del <i>script</i> de Matlab.....	47
5.2.	Caracterización con masa.....	50
5.2.1.	Caracterización con masa a través de la aplicación móvil.....	51
5.2.2.	Caracterización con masa a través del <i>script</i> de Matlab.....	56
5.2.3.	Caracterización con masa a través de Arduino.....	60
6.	Caracterización de la viga con el equipo Arduino.....	65
7.	Conclusiones y líneas futuras.....	71
8.	Anexos.....	75
8.1.	Anexo A. <i>Script</i> de Matlab.....	75
8.2.	Anexo B. Software Arduino DUE.....	76
8.3.	Anexo C. Software Arduino UNO.....	77
9.	Estimación de costes.....	79
10.	Referencias.....	81



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Índice de figuras.

Figura 1. Esquema básico de un altavoz.....	3
Figura 2. Vista frontal del equipo Sirius.....	7
Figura 3. Vista trasera del equipo Sirius.....	8
Figura 4. Toma de alimentación del láser.....	8
Figura 5. Cable de comunicación con el PC.....	9
Figura 6. Pantalla de inicio de Sirius.....	9
Figura 7. Vista de los 16 canales de medida disponibles.....	10
Figura 8. Pantalla de configuración del canal 1.....	10
Figura 9. Datos de configuración del láser.....	11
Figura 10. Datos de configuración de la célula de carga.....	11
Figura 11. Pantalla de mediciones ("Measure").....	12
Figura 12. Pantalla "Design".....	12
Figura 13. Menú donde seleccionar la FFT.....	13
Figura 14. Icono correspondiente a la FFT.....	13
Figura 15. Datos de configuración de la FFT.....	13
Figura 16. Equipo.....	14
Figura 17. Vista trasera de la etapa de potencia.....	14
Figura 18. Vista frontal de la etapa de potencia con los conectores RCA.....	15
Figura 19. Soportes del altavoz (sobre la célula de carga) y de la tuerca.....	16
Figura 20. Shaker.....	17
Figura 21. Arduino DUE.....	19
Figura 22. Arduino UNO.....	19
Figura 23. Características principales de distintos Arduinos.....	21
Figura 24. Equipo inicial.....	23
Figura 25. Equipo definitivo.....	23
Figura 26. Cable para alimentar con una sola fuente de alimentación.....	24
Figura 27. Parte inferior de las placas.....	24
Figura 28. Distintos muestreos en función del número de bits.....	25
Figura 29. Aplicación "Function Generator".....	30
Figura 30. Carrera para 2Hz. Shaker trabajando con la aplicación del móvil.....	33
Figura 31. Fuerza para 2Hz. Shaker trabajando con la aplicación del móvil.....	33
Figura 32. Registro para 2Hz y 100% de volumen. Shaker trabajando con la aplicación del móvil.....	34
Figura 33. Registro para 10Hz y 100%. Shaker trabajando con la aplicación del móvil.....	34
Figura 34. Carrera (mm). Shaker trabajando con la aplicación del móvil.....	35
Figura 35. Fuerza (N). Shaker trabajando con la aplicación del móvil.....	36
Figura 36. Registro para 2Hz y A = 0.25. Shaker trabajando con Matlab.....	38
Figura 37. Registro para 5Hz y A=0.05. Shaker trabajando con Matlab.....	38
Figura 38. Registro para 5Hz y A=0.45. Shaker trabajando con Matlab.....	39
Figura 39. Carrera (mm). Shaker trabajando con Matlab.....	40
Figura 40. Fuerza (N). Shaker trabajando con Matlab.....	41
Figura 41. Carrera con el 50% y el 100% de la amplitud.....	44
Figura 42. Carrera (mm). Altavoz sin masa trabajando con la aplicación del móvil.....	45
Figura 43. Carrera (mm). Altavoz sin masa trabajando con Matlab.....	48
Figura 44. Detalle del altavoz sobre el soporte y la célula de carga.....	50



Figura 45. Registro para 2Hz y 46.66% de volumen. Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.	52
Figura 46. Registro para 2Hz y 100% de volumen. Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.	53
Figura 47. Registro para 6Hz y 46.66% de volumen. Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.	53
Figura 48. Registro para 6Hz y 100% de volumen. Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.	54
Figura 49. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.	54
Figura 50. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.	55
Figura 51. Registro para 3Hz y A=0.3. Altavoz con masa trabajando con Matlab.	56
Figura 52. Registro para 3Hz y A=0.25. Altavoz con masa trabajando con Matlab.	57
Figura 53. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con Matlab.	58
Figura 54. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con Matlab.	59
Figura 55. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con Arduino.	61
Figura 56. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con Arduino.	61
Figura 57. Registro a 7 Hz y 50% de amplitud. Altavoz con masa trabajando con Arduino.	63
Figura 58. Registro a 7 Hz y 100% de amplitud. Altavoz con masa trabajando con Arduino. ...	63
Figura 59. Modos propios de una viga biapoyada.	66
Figura 60. Viga sobre la que se ensayó.	66
Figura 61. TMD instalado en la viga (anulado en la imagen).	67
Figura 62. Modos propios de la viga biapoyada calculados.	68
Figura 63. FRF de la estructura sin TMD.	68
Figura 64. TMD libre.	69
Figura 65. FRF de la estructura sin TMD.	70



Índice de tablas.

Tabla 1. Tensiones en la señal de la salida de audio.....	16
Tabla 2. Características principales del shaker.....	17
Tabla 3. Características fundamentales de los Arduinos DUE y UNO.....	20
Tabla 4. Mediciones para el ajuste de la frecuencia en la pantalla LCD.....	26
Tabla 5. Puntos y porcentaje de volumen en el Sony Xperia XA.....	31
Tabla 6. Registro de datos para 2Hz. Shaker trabajando con la aplicación del móvil.....	32
Tabla 7. Carrera (mm). Shaker trabajando con la aplicación del móvil.....	35
Tabla 8. Fuerza (N). Shaker trabajando con la aplicación del móvil.....	35
Tabla 9. Carrera (mm). Shaker trabajando con Matlab.....	39
Tabla 10. Fuerza (N). Shaker trabajando con Matlab.....	40
Tabla 11. Carrera (mm). Altavoz sin masa trabajando con la aplicación del móvil.....	45
Tabla 12. Frecuencia (Hz). Altavoz sin masa trabajando con la aplicación del móvil.....	46
Tabla 13. Carrera (mm). Altavoz sin masa trabajando con Matlab.....	47
Tabla 14. Valores de la variable A que generaban inestabilidades.....	48
Tabla 15. Frecuencia (Hz). Altavoz sin masa trabajando con Matlab.....	49
Tabla 16. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.....	51
Tabla 17. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.....	51
Tabla 18. Frecuencia (Hz). Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.....	55
Tabla 19. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con Matlab.....	57
Tabla 20. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con Matlab.....	58
Tabla 21. Frecuencia (Hz). Altavoz con masa trabajando con Matlab.....	59
Tabla 22. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con Arduino.....	60
Tabla 23. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con Arduino.....	60
Tabla 24. Frecuencia (Hz). Altavoz con masa trabajando con Arduino.....	62
Tabla 25. Carrera (mm) trabajando con y sin masa auxiliar.....	71
Tabla 26. Carreras máximas (mm) en el altavoz para todos los modos de funcionamiento.....	72
Tabla 27. Estimación de costes.....	79



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



1. Introducción.

1.1. Justificación.

Las vibraciones pueden llegar a ser un gran problema para las estructuras y las máquinas, ya porque generen molestias a las personas en contacto con ellas o por llegar a producir fallos estructurales debidos a la fatiga o a la resonancia, lo que puede llegar a comprometer la resistencia de dicha estructura.

Con elementos como los *shakers*, cuya traducción del inglés viene a ser “agitadores”, se consigue caracterizar dichas estructuras o máquinas, pudiendo conocer cuáles son sus propiedades modales (frecuencias propias y modos propios) e, indirectamente, sus propiedades físicas con el fin de poder realizar simulaciones y evaluar sus capacidades resistentes y de servicio.

Como es de esperar el precio de estos *shakers* es alto y con este TFG se ha buscado obtener, con equipos más baratos y que no han sido diseñados para realizar dichas tareas, resultados similares a los que se obtienen con los equipos creados para tal fin.

1.2 Objetivos.

El objetivo principal de este TFG es el del estudio y caracterización del altavoz reproduciendo en él una onda senoidal en la cual se va a variar tanto su frecuencia como su amplitud, para llegar a conocer su comportamiento en un determinado rango de frecuencias a las que se pretende se van a excitar las estructuras. Siempre buscando que el movimiento del altavoz sea lo más aceptable posible.

Se resalta el obtener un movimiento aceptable, porque como se va a poder ver a lo largo de las siguientes páginas, en determinadas condiciones el altavoz presenta movimientos muy bruscos. Estos falsean las mediciones y datos registrados, motivo por el cual dichos puntos inestables no se pueden considerar aceptables.

En la búsqueda por obtener un conjunto lo más económico posible se busca hacer funcionar el altavoz sin necesidad de ordenadores, de forma autónoma. Para ello se han programado, como ya se ha indicado, varios equipos de Arduino con los que se puede perfectamente seleccionar a que frecuencia y amplitud queremos que se nos mueva el altavoz y ver en una pantalla LCD estos datos.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

2. Funcionamiento de altavoz.

Antes de empezar a hablar todo lo que se ha estado haciendo durante estos meses, se explicará el funcionamiento de un altavoz, el elemento principal de este TFG.

Para entender dicho funcionamiento es necesario tener claro cómo se transmiten los sonidos. Al hablar o hacer cualquier ruido, lo que se produce es una presión en el aire que rodea al foco de dicho sonido, generándose ondas acústicas. Estas no son sino compresiones y descompresiones de las partículas que componen el aire y son estas variaciones de la presión las que se perciben con los oídos.

Dependiendo de la frecuencia en la que se perciben estas ondas acústicas, los sonidos que se escuchan son más o menos graves. Cuanto más agudo sea el sonido, mayor es la frecuencia con la que se percibe dicho sonido y viceversa.

Volviendo al altavoz, a fin de cuentas lo que éste hace es transformar señales eléctricas en sonidos. El móvil, el ordenador o el equipo de sonido envían a través del cable con el que se le une al altavoz una señal eléctrica para que éste último se mueva a una determinada frecuencia, moviéndose a esa misma frecuencia las partículas de aire próximas al bafle y transmitiéndose de éstas a las siguientes hasta que llegan al oído que es el que las percibe.

Hay diversos tipos de altavoz, pero los más comunes, desde cualquier auricular hasta los grandes altavoces de una discoteca por ejemplo, son los altavoces magnéticos, cuyo esquema fundamental puede verse en la Figura 1.

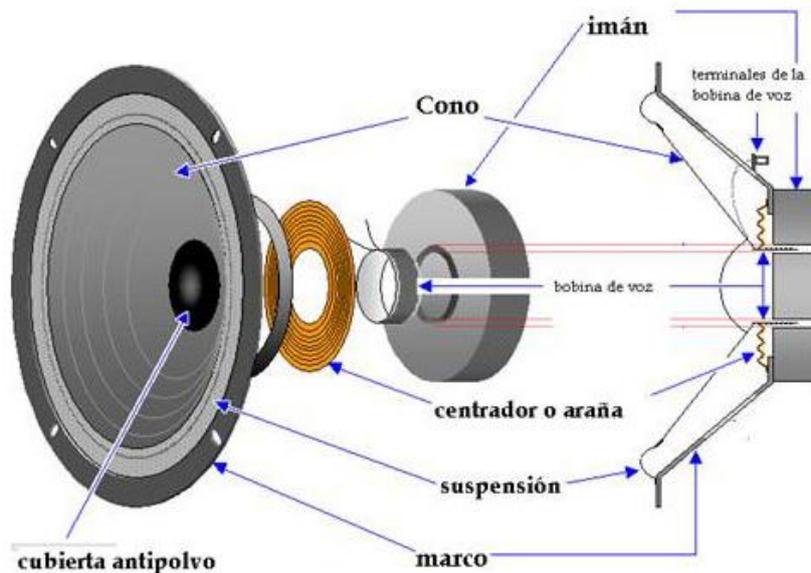


Figura 1. Esquema básico de un altavoz.

El funcionamiento está basado en la interacción que se produce en el bobinado situado entre imanes al hacer circular la corriente eléctrica que lleva codificada el sonido a reproducir. Así se mueve la bobina del altavoz, arrastrando consigo el cono que hace



que se generen esas variaciones de presión de las partículas de aire colindantes, que es lo que realmente son las ondas de sonido.

Paso a paso la explicación sería la siguiente:

1. El electroimán situado en el interior del altavoz, se alimenta mediante una corriente que lleva codificado (modulado en frecuencia o amplitud) el sonido a reproducir. Este sonido se ha codificado y modulado empleando un micrófono.
2. Esta corriente crea un campo magnético variable en el electroimán (bobina de voz según lo mostrado en la Figura 1), que al estar situado entre imanes interactúa con el campo magnético constante que estos generan.
3. El paso anterior, produce una fuerza de magnitud variable (fuerza de atracción o repulsión entre imanes), que depende de la corriente que atraviesa el electroimán. Es decir, depende de la señal de sonido codificada en la corriente eléctrica transmitida.
4. Esta fuerza hace que el electroimán se mueva, arrastrando consigo la membrana a la que está unido.
5. Finalmente, esta membrana produce las compresiones y descompresiones en el aire, generando el sonido que nosotros percibimos.

El oído humano es capaz de percibir ciertos sonidos, pero no todos (muchos animales son capaces de reconocer sonidos que para nosotros son imperceptibles). Es lo que se denomina espectro audible, también conocido como campo tonal, y no es más que la gama de frecuencias que es capaz de percibir el oído humano.

Un oído sano y joven es más sensible y capaz, llegando a percibir frecuencias comprendidas entre los 20Hz y los 20KHz. No obstante, dicho margen varía dependiendo de la persona y se reduce con la edad.

Este espectro audible, se puede subdividir en función de los tonos:

1. Tonos graves: frecuencias bajas correspondientes a las cuatro primeras octavas, y cuyo rango va desde los 16Hz a los 256Hz.
2. Tonos medios: frecuencias medias, correspondientes a las octavas quinta, sexta y séptima con frecuencias desde los 256Hz a los 2kHz.
3. Tonos agudos: frecuencias altas, correspondientes a las tres últimas octavas. El rango de frecuencias va desde los 2kHz hasta poco más de 16kHz.

En base a esto, se fabrican los altavoces, pues un altavoz que está diseñado para reproducir sonidos agudos difícilmente va poder trabajar en sonidos graves y viceversa. Por esto se pueden distinguir los siguientes tipos de altavoces:

1. Tweeters.

Altavoces destinados a reproducir altas frecuencias, normalmente entre los 2kHz y los 20000Hz. Su tamaño suele ser pequeño, entre 1 y 2 pulgadas (") en los sistemas de audio de los vehículos. Son muy delicados y hay que tener mucho cuidado en el filtraje de los sonidos, para protegerlos de excesos de potencia.



El sonido que generan al ser de alta frecuencia es muy direccional, por lo que hay que orientarlos correctamente (normalmente en la parte superior del coche y cerca de los oídos).

2. Medios.

Como se puede deducir de su nombre, son altavoces destinados a reproducir frecuencias de gama media. Dicha gama está comprendida entre los 200Hz y los 3000 o 4000Hz.

Se diferencian claramente dos tipos:

- De cúpula: forman una cúpula invertida y tienen un tamaño entre 2 y 3" (podríamos decir que son *tweeters* muy grandes)
- De cono: son como cualquier *woofer* o *subwoofer* pero en pequeño tamaño, ente 3 y 4".

3. Woofers.

Destinados a reproducir bajas frecuencias, su rango de utilización va desde los 70 Hz hasta los 2500-4000Hz, con una linealidad más o menos plana dependiendo del tamaño del altavoz.

Son de un tamaño considerable y puede ir desde las 4 a las 8", lo cual influye directamente en el rango de respuesta del altavoz. Cuanto más grande sea el altavoz, más bajará en dicho rango. Por ejemplo, un altavoz de 6" puede reproducir linealmente sin distorsión hasta los 70 Hz, mientras que uno de 8" lo podrá hacer sin problemas hasta los 50 Hz.

Cuando el altavoz aumenta considerablemente su tamaño y reproduce un pequeño rango de frecuencias muy bajo, entre 20 y 60 Hz, se les denomina *subwoofer*.

4. Subwoofer.

Como ya se ha apuntado son altavoces destinados a frecuencias por debajo de los graves (los sub-graves, con frecuencias comprendidas entre los 20 y 100 Hz)

Todos estos altavoces cuentan con estructura de cono y generalmente van montados en una caja hermética o abierta destinada a aumentar el rendimiento de los mismos.

Su tamaño suele ir desde las 6" de los destinados a reproducir unos sub-graves muy pequeños, hasta 18" o incluso 21 o 34", siendo estos últimos básicamente solo de demostración.

Su construcción es muy similar a la de los *woofer*, reforzando y sobredimensionando gran parte de sus piezas y componentes para que puedan soportar satisfactoriamente la potencia mayor que pueden generar comparada con el resto de altavoces.



Dicho esto, queda claro que para trabajar a bajas frecuencias que es lo que se va a hacer en este TFG, el *subwoofer* es el altavoz más adecuado. Partiendo de la base que ningún altavoz está diseñado para desempeñar lo se pretende porque los altavoces son elementos para reproducir sonidos y a tan bajas frecuencias no se genera sonido alguno audible para el hombre, el *subwoofer* es el más adecuado de todos los tipos de altavoces.

3. Equipo.

3.1 Equipos de adquisición de datos.

Para la adquisición de los datos que se deseaban registrar (frecuencia del movimiento, desplazamiento-carrera del altavoz y fuerza que dicho movimiento generado) se contaba con el equipo denominado *Sirius* y el software DEWESoft X asociado a éste. Este dispositivo, el cual puede verse en la Figura 2, disponía de hasta 16 canales en los que conectar diferentes medidores como láseres, células de carga o acelerómetros.



Figura 2. Vista frontal del equipo Sirius.

En uno de esos canales se conectaba el láser, encargado de determinar el valor de los puntos superior e inferior que alcanzaba el *shaker* o el altavoz en su movimiento senoidal y así poder calcular cual era la carrera que tenía el movimiento. Estos valores se registraban en metros, pero para su mejor lectura en el documento Excel en el que se recogían los datos se pasaron a mm, figurando estas unidades tanto en las tablas como en las gráficas que se incluyen en todo el documento. Gracias al software con el que contaba el Sirius, ese registro que proporcionaba el láser también permitía conocer la frecuencia del movimiento con la inclusión de la medición de la FFT, como se explica en páginas siguientes.

En otro puerto se conectaba la célula de carga, que como se puede deducir medía la fuerza (N) que se generaba por el movimiento que presentaba el altavoz/*shaker*, magnificándose su valor gracias a la inclusión de cierta masa sobre estos dos dispositivos. Esa masa era una tuerca, del mismo tipo para los dos casos, que contaba con una masa de 0.19 kg.

En la Figura 3 se muestra la parte posterior del equipo, donde puede verse, a la derecha de la imagen, el cable circular a través del cual se alimentaba el terminal. Para conectarlo de forma correcta, el punto rojo debía quedar en la parte superior.



Figura 3. Vista trasera del equipo Sirius.

Junto a dicho conector existe otro cuyo detalle puede verse en la Figura 4. En él se conectaba el otro cable que presentaba el láser y que servía para alimentarlo, emitiendo de esta forma la característica luz roja. Este haz de luz es el que permitía medir esos desplazamientos que se daban en el altavoz, mayores o menores en función de la frecuencia y la amplitud que tuviera la onda senoidal que se estaba reproduciendo. Para conectar correctamente el láser, el cable rojo debía insertarse en el orificio superior y el negro en el inferior como muestra la siguiente figura.



Figura 4. Toma de alimentación del láser.

En la parte trasera del equipo, como puede verse en la Figura 5, también se encontraba el puerto del cable USB con el que se establecía la comunicación con el ordenador.



Figura 5. Cable de comunicación con el PC.

Una vez que se conectaba ese cable al PC y que el equipo estaba alimentado, automáticamente en el ordenador aparecía la venta que se ve en la Figura 6. No era necesario instalar ninguna licencia en el ordenador, pues ésta ya venía incorporada en el software del equipo Sirius y con solo conectarlo al PC, éste lo reconocía y mostraba automáticamente la pantalla de acceso al software DEWESoft X2 que se ve en la Figura 6. Para abrirlo bastaba pulsar el botón “Run Dewesoft...”.



Figura 6. Pantalla de inicio de Sirius.

Tras esto aparecía la ventana donde figuraban los 16 canales de medida disponibles en este equipo Siruis, como se ve en Figura 7, debiendo seleccionar y configurar aquellos que se iban a utilizar. Para seleccionarlos se clicaba en la pestaña situada a la izquierda, dejándose así el canal marcado como “Used” (“Unused” significa no usado). El botón “Setup”, situado a la derecha de la línea permitía acceder al menú de la configuración.

ID	Used	C	Name	Ampl. name	Range	Measurement	Min	Values	Max	Physical quantity	Units	Zero	Setup
1	Used		AI 1	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	5,561	10,00		V	Zero	Setup
2	Unused		AI 2	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,006	10,00		V	Zero	Setup
3	Unused		AI 3	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,063	10,00		V	Zero	Setup
4	Unused		AI 4	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,036	10,00		V	Zero	Setup
5	Unused		AI 5	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,009	10,00		V	Zero	Setup
6	Unused		AI 6	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,046	10,00		V	Zero	Setup
7	Unused		AI 7	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	0,007	10,00		V	Zero	Setup
8	Unused		AI 8	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,111	10,00		V	Zero	Setup
9	Unused		AI 9	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,037	10,00		V	Zero	Setup
10	Unused		AI 10	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,115	10,00		V	Zero	Setup
11	Unused		AI 11	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,091	10,00		V	Zero	Setup
12	Unused		AI 12	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,119	10,00		V	Zero	Setup
13	Unused		AI 13	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,028	10,00		V	Zero	Setup
14	Unused		AI 14	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,098	10,00		V	Zero	Setup
15	Unused		AI 15	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,089	10,00		V	Zero	Setup
16	Unused		AI 16	SIRIUS-HD-STGS	10 V	Voltage	-10,00	-0,017	10,00		V	Zero	Setup

Figura 7. Vista de los 16 canales de medida disponibles.

En este caso el láser se encontraba en el canal 1, por lo que se debía pulsar el Setup de dicho canal para configurarlo. Tras esto emergía la pantalla de la Figura 8, correspondiente, como es lógico, al canal 1 (observar que en su cabecera figura el texto “Channel setup for channel 1”) que era el canal seleccionado en el paso previo.

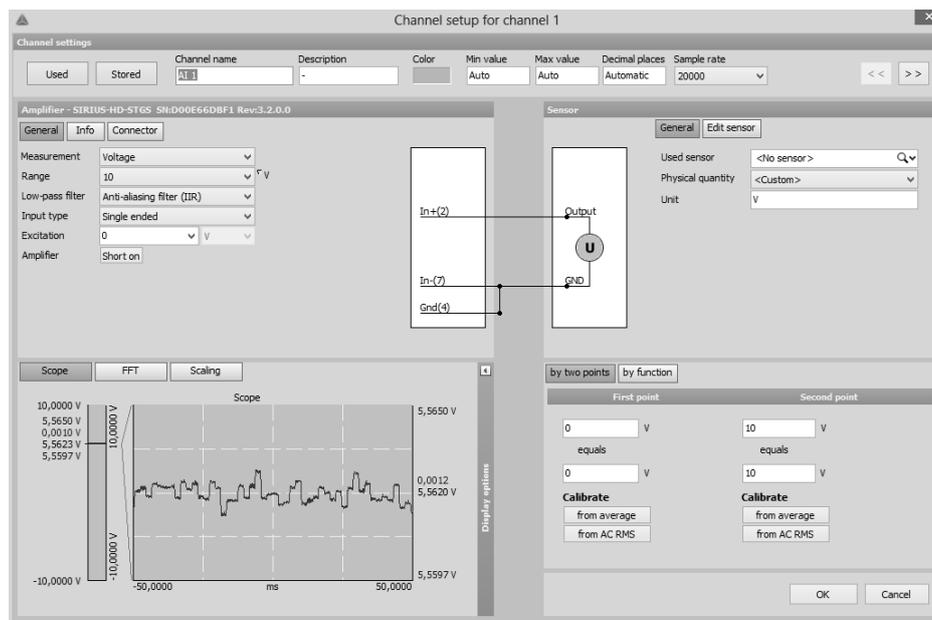


Figura 8. Pantalla de configuración del canal 1.

Tras realizar los cambios necesarios para la configuración del láser que se iba a emplear en las mediciones, la ventana presentaba los datos que se ven en la Figura 9.

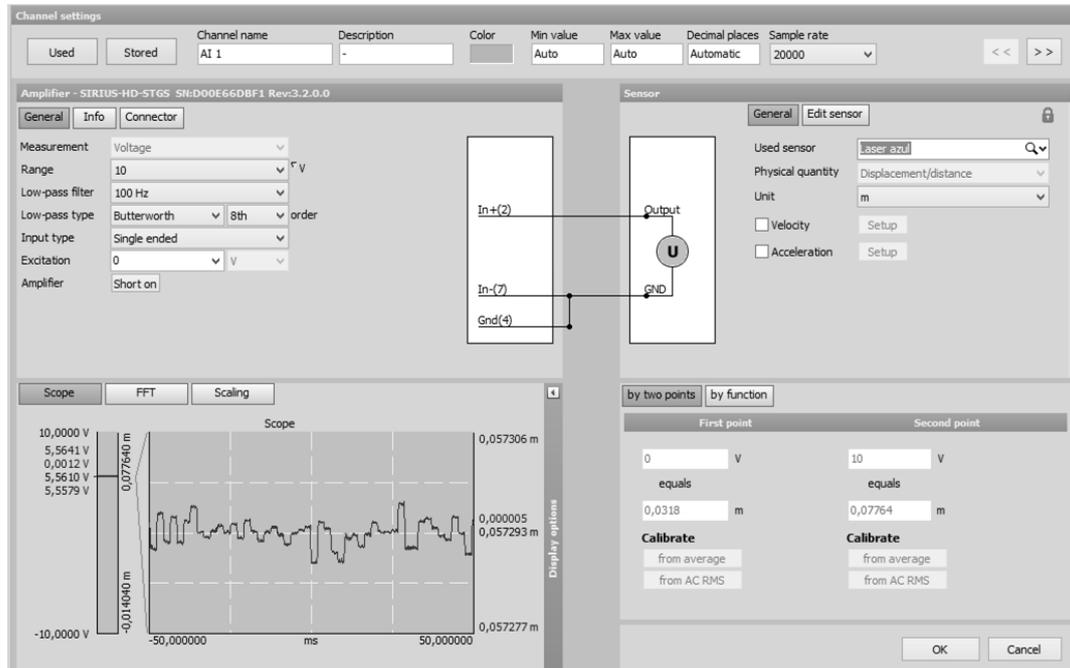


Figura 9. Datos de configuración del láser.

Para las mediciones en las que se empleó la célula de carga, el procedimiento fue exactamente el mismo, con la salvedad de que el canal al que se conectaba la célula era otro diferente. En este caso la pantalla de configuración para el registro de la fuerza presentaba el siguiente aspecto:

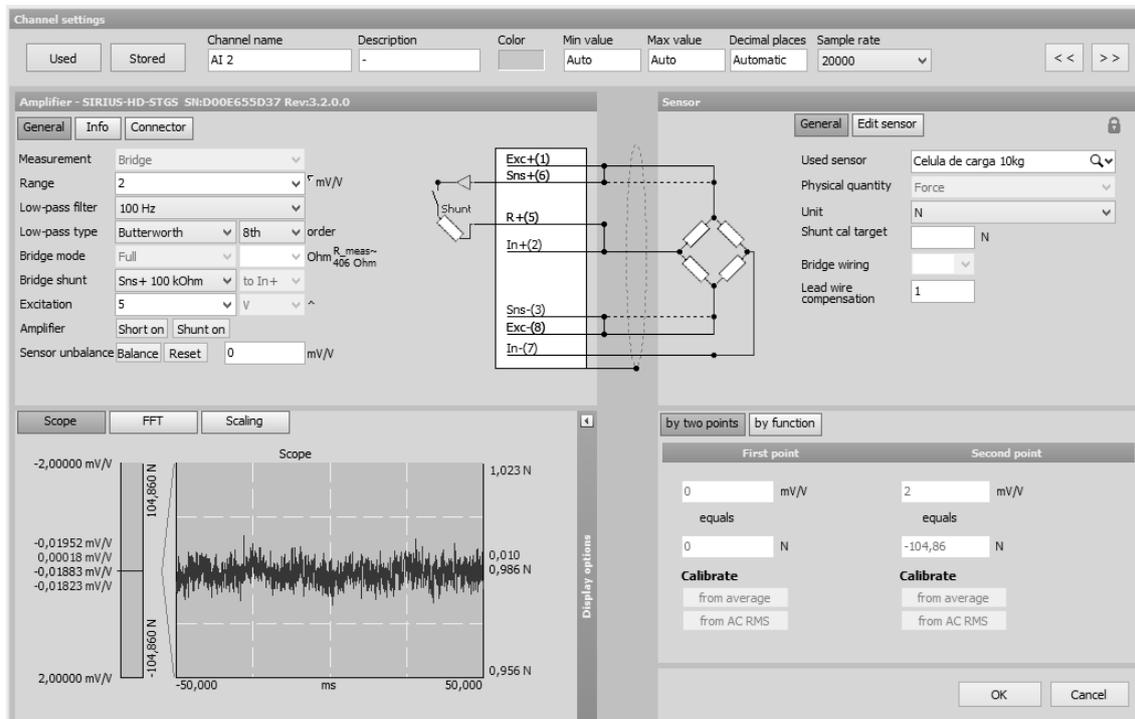


Figura 10. Datos de configuración de la célula de carga.

Tras realizar todas las configuraciones necesarias, en la pantalla mostrada en la Figura 7 había que clicar en la pestaña “Measure”. Esa pantalla, donde se iban a mostrar todos los datos de las diferentes variables que se iban a estudiar, es la que se recoge en la Figura 11.



Figura 11. Pantalla de mediciones (“Measure”).

En el momento de la captura de esa pantalla mostrada en la Figura 11, solo se tenía conectado al equipo Sirius el láser para registrar el desplazamiento, por eso solo aparece ese registro del desplazamiento en la pantalla. Para recoger también la frecuencia del movimiento que presentaba el altavoz, se tenía que incluir dicha variable, lo cual se hacía desde la ventana “Design” (Figura 12).

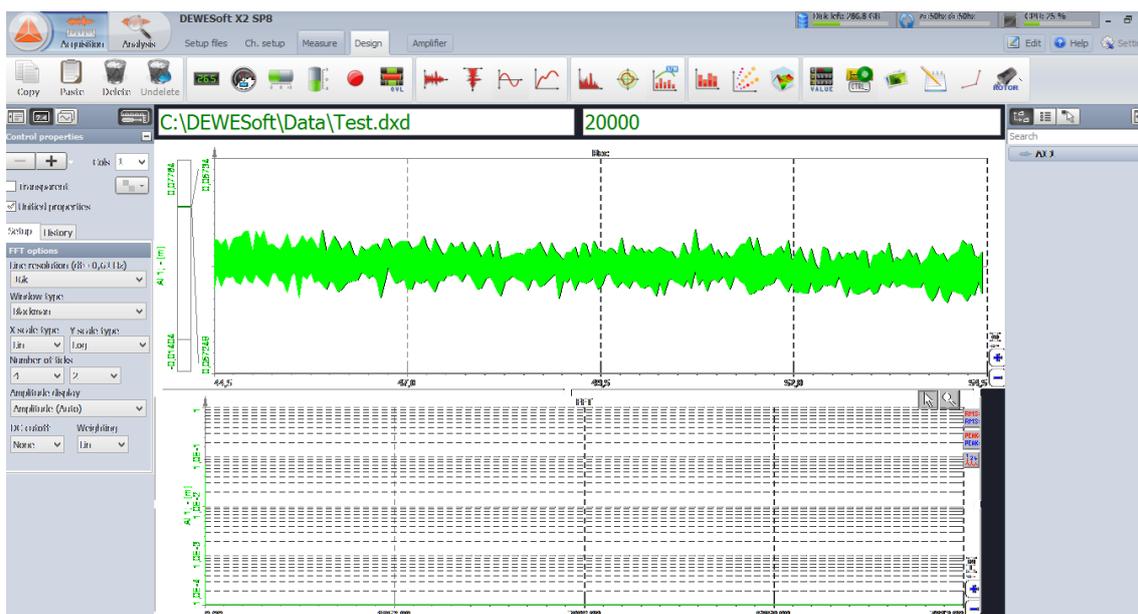


Figura 12. Pantalla “Design”.

En este caso, bajo el registro que mostraba el movimiento que presentaba el altavoz, se incluyó el de la frecuencia de dicho movimiento. Para ello, había que seleccionar el icono correspondiente a la FFT (Figura 14) que se encontraba en la barra superior de la pantalla “Design” (Figura 13).

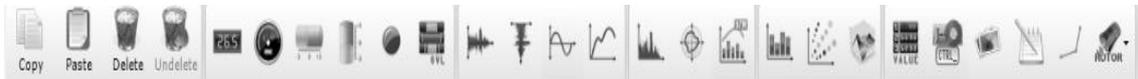


Figura 13. Menú donde seleccionar la FFT.



Figura 14. Icono correspondiente a la FFT.

A la izquierda de la pantalla de la Figura 12, teniendo seleccionada la parte de la pantalla correspondiente al registro de la FFT, aparecían diferentes campos para la configuración de ese registro de la frecuencia. Dichos campos se configuraron con los datos que se ven en la Figura 15.

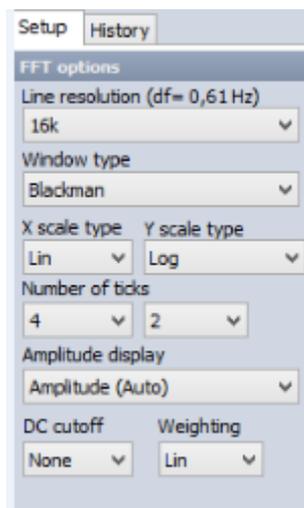


Figura 15. Datos de configuración de la FFT.

Por último en la pantalla de la Figura 11 se sustituyó el 20000 que figuraba sobre el registro del movimiento por un 1000 o 2000. Así se registraba un menor número de datos, facilitándose su lectura.

Con esto toda la configuración quedaba terminada, pudiendo iniciarse ya la realización de los ensayos y el registro de datos, deteniendo y reanudando las mediciones gracias a los botones habilitados para ello. Éstos pueden verse en la parte superior de la pantalla de medida (Figura 11).

3.2 Altavoz, fuente de alimentación y etapa de potencia.

Como ya se comentó, el elemento fundamental para la realización de este TFG en la búsqueda de una alternativa económica al *shaker* en la excitación de estructuras fue el altavoz. Éste se conectaba a un amplificador (etapa de potencia), que a su vez se unía con una fuente de alimentación que proporcionaba los 12 V necesarios para alimentar el bafle. Todo el conjunto es el que puede verse en la Figura 16.



Figura 16. Equipo.

El altavoz era un *subwoofer* de 8" proveniente del equipo de sonido de un automóvil. Se eligió éste tipo de bafle porque, como ya se explicó, los sonidos más graves y que se generan con frecuencias de vibración del altavoz bajas, se producen con altavoces de este estilo.

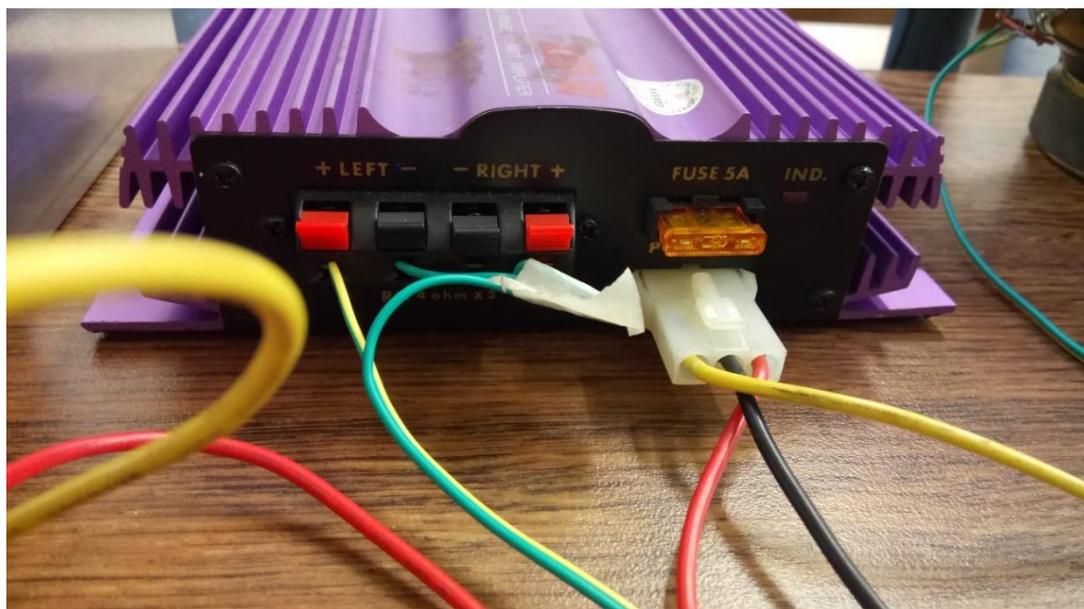


Figura 17. Vista trasera de la etapa de potencia.

El altavoz se conectaba a la etapa de potencia mediante los cables verde y amarillo como se ve en la Figura 17. En la parte derecha de esta imagen se aprecian los tres cables de alimentación de la etapa, siendo el negro el de tierra (conectado al borne negro de la fuente de alimentación) y el rojo y amarillo correspondientes al positivo y a la señal respectivamente (se conectaban los dos juntos al borne positivo, el rojo, de la fuente de alimentación).

La etapa de potencia amplificaba el nivel de la señal, incrementando la amplitud de dicha señal de entrada mediante corrientes de polarización en el transistor de salida. Internamente trabajaba con corriente continua de 12 V y por esto era necesaria la presencia en el conjunto de la fuente de alimentación. Ésta se conectaba a la red eléctrica y nos transformaba los 220 V de corriente alterna que tiene la red doméstica en los 12 V de continua que se necesitaban.

El extremo del cable de la señal de audio con el conector Jack de 3.5 se conectaba a la salida de audio del teléfono móvil, la del ordenador o la que se había adaptado en el equipo Arduino. El otro extremo, donde el cable se ramificaba en dos terminales RCA (una salida por cada altavoz), se unía a la etapa de potencia como se puede ver en la Figura 18. Decir que el RCA con su interior en rojo se tenía que conectar en el puerto superior (marcado como “RIGHT” en la etapa).



Figura 18. Vista frontal de la etapa de potencia con los conectores RCA.

Como se pudo observar en las distintas pruebas llevadas a cabo a lo largo de todo este TFG, las cuales se describirán en los siguientes capítulos, dependiendo del dispositivo que generase la señal, se obtenía una mayor o menor diferencia entre los puntos inferior y superior (la carrera del movimiento) a los cuales llegaba el altavoz en su movimiento y también un mayor o menor valor de la fuerza debida a dicho movimiento.

Dichas diferencias estaban relacionadas con el valor de la tensión que tuviera la señal de salida de audio de los distintos equipos utilizados (móvil, ordenador o el Arduino). En los tres casos que se tenían los voltajes de esa señal de audio eran los siguientes:

<i>Equipo</i>	<i>Tensión</i>
Teléfono móvil	Hasta 0.7 V
Ordenador	Hasta 0.7 V
Arduino	0.55 – 2.72 V

Tabla 1. Tensiones en la señal de la salida de audio.

Era importante conocer cuál era la tensión que se obtenía por la toma de audio, ya que de ésta dependía directamente la potencia que iba a desarrollar el altavoz. Recordar la ecuación de la ley de Watt de la potencia eléctrica:

$$P = V * I \quad (1)$$

Siendo P la potencia eléctrica (W), V el voltaje (V) e I la corriente eléctrica (A).

Comentar también que tanto el soporte situado en la parte superior del altavoz y sobre el que se atornillaba la tuerca de 0.19 kg como la base que se unió a la célula de carga y sobre la cual descansaba el altavoz, se realizaron expresamente para este TFG. Se crearon con una impresora 3D y el resultado es el que puede verse en la Figura 19.

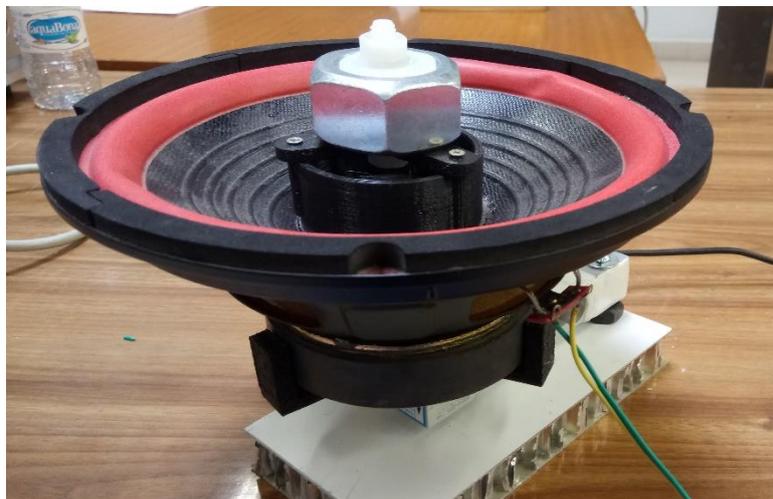


Figura 19. Soportes del altavoz (sobre la célula de carga) y de la tuerca.

3.3 Shaker.

La Figura 20 muestra el excitador electrodinámico (*shaker*) que se utilizó para realizar las medidas correspondientes a un dispositivo de este tipo y así poder comparar éstas con los datos obtenidos en los ensayos en los cuales se tenía el altavoz como elemento excitador.



Figura 20. Shaker.

Como puede verse en la figura anterior, el *shaker* tenía conectados dos cables (azul y marrón). El otro extremo de dichos cables se conectaban en los terminales de la etapa de potencia en los que se conectaban los cables del altavoz de igual manera que estos (ver Figura 17).

El *shaker* que se utilizó era un LDS modelo V101 M4 y sus características principales eran las siguientes:

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
<i>Sine Force (pico)</i>	8.9 N
<i>Rango de frecuencia útil</i>	5 Hz – 12 kHz
<i>Masa efectiva del elemento móvil</i>	0.00065 Kg
<i>Velocidad (pico senoidal)</i>	1.31 m/s
<i>Aceleración máxima</i>	140 g
<i>Desplazamiento (pk-pk) – continuo</i>	2.5 mm

Tabla 2. Características principales del shaker.



El resto del equipo empleado en todos los ensayos en los que intervino el *shaker* fue exactamente el mismo que el comentado anteriormente (la etapa de potencia y la fuente de alimentación). La única diferencia era que en un caso se tenía conectado el altavoz a la etapa de potencia y en el otro era el *shaker*.

Recordar que para que las medidas que se tomaron con el altavoz y con el *shaker* fuesen equiparables, sobre ambos se instaló la misma tuerca de 0.19 kg. La masa propia del *shaker* era de 1 kg, mientras que la del altavoz llegaba hasta los 1.2 kg. Estos valores no eran determinantes en la medida de la fuerza debida al movimiento de los equipos ya que la masa que influía sobre dicha fuerza era la asociada a ese movimiento, y en ambos casos ésta era muy similar dado que la masa auxiliar, la tuerca, era igual en los dos casos.

La base sobre la que se colocó el *shaker* para realizar su caracterización era la misma que se había desarrollado para el altavoz. Evidentemente, debido a la diferencia de geometría y tamaño con el altavoz, el *shaker* no quedaba fijo en dicha base, pero en ningún momento se dieron movimientos bruscos en él que hicieran echar en falta esa falta de anclaje y la necesidad de haber creado otro soporte específico en la impresora 3D para estas pruebas.

3.4 Arduino.

En la última parte del TFG se utilizaron dos unidades de Arduino, una placa de Arduino DUE (Figura 21) y otra de Arduino UNO (Figura 22). Como ya se comentó, el objetivo era obtener un conjunto totalmente autónomo que permitiese controlar el movimiento del altavoz (tanto su frecuencia como la amplitud de dicho movimiento) gracias a los elementos asociados al mismo (potenciómetros, pantalla LCD, etc.).

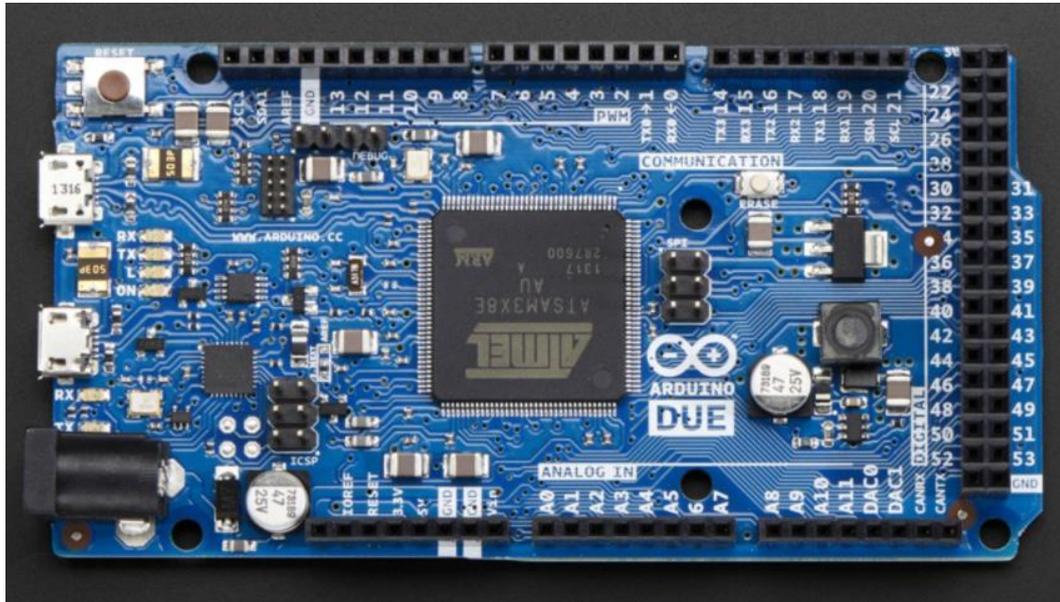


Figura 21. Arduino DUE.



Figura 22. Arduino UNO.

La decisión de emplear dos de estos equipos y no sólo uno se debió a las limitaciones que presentaban. El objetivo principal era el de obtener movimientos en el altavoz con una frecuencia de salida perfectamente controlada, lo cual dependía directamente de los tiempos de ejecución en las operaciones que se programaban para ejecutarse en los Arduinos. La interacción con la pantalla LCD, los potenciómetros u otros periféricos podrían requerir grandes tiempos de ejecución, por lo que para evitar la posible saturación de la memoria y así la ralentización en las operaciones se decidió externalizar el control de algunas de esas operaciones mediante una segunda tarjeta de Arduino.

La Figura 23 es un resumen de algunas de las tarjetas Arduino disponibles y de sus características más importantes. Por otra parte, en la Tabla 3 se recogen las propiedades fundamentales de las dos tarjetas empleadas.

<i>Características</i>	<i>Arduino UNO</i>	<i>Arduino DUE</i>
<i>Tensión de trabajo</i>	5 V	3.3 V
<i>Tamaño de palabra</i>	8 bits	32 bits
<i>Velocidad de reloj</i>	16 MHz	84 MHz
<i>Nº Pines digitales (entrada/salida)</i>	14	54
<i>Nº Salidas PWM</i>	6	12
<i>Nº Entradas analógicas</i>	6	12
<i>Nº Salidas analógicas</i>	0	2

Tabla 3. Características fundamentales de los Arduinos DUE y UNO.

En base a esas diferencias entre todas las placas de Arduino existentes, se eligieron las dos que se iban a utilizar y se repartió entre ellas las tareas a realizar, teniendo en cuenta sus características.

De las dos, la placa Arduino DUE fue la seleccionada para “crear” la onda senoidal que se reproduciría en el altavoz por las siguientes razones:

1. Era la única que contaba con salidas analógicas, necesarias para poder generar la onda senoidal. Dicho pin de salida analógica (DAC) era el empleado para controlar el altavoz a través del Jack de audio que se adaptó al equipo.
2. Tenía una mayor velocidad de reloj (84 MHz frente a 16 MHz del Arduino UNO) por lo que las lecturas y escrituras analógicas se realizaban a mayor velocidad. Gracias a esto las variaciones en la frecuencia y la amplitud de la onda se ejecutaban con gran rapidez y precisión.
3. Contaba con 12 bits de resolución de escritura y lectura analógica frente a los 6 de la otra placa, lo cual multiplicaba por cuatro la precisión de las lecturas y escrituras.

Fabricante	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino	Arduino
Modelo	Pro Mini	Nano	Uno	Mega / Mega 2560	Leonardo	Micro	Due
Microcontrolador	AVR Atmega 168 ó 328 8bits	AVR ATmega 168 ó 328 8bits	AVR ATmega 328 8bits	AVR ATmega2560 8bits	AVR ATmega 32u4 8bits	AVR ATmega 32u4 8bits	ARM SAM3X8E Cortex-M3 32bits
Frecuencia	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	16Mhz	84Mhz
Memoria RAM	2KiB	2KiB	2KiB	8KiB	2.5KiB	2.5KiB	96KiB (64+32KiB)
Memoria EEPROM	1KiB	1KiB	1KiB	4KiB	1KiB	1KiB	0
Memoria FLASH	16 ó 32KiB	16 ó 32KiB	32KiB	128 ó 256KiB	32KiB	32KiB	512KiB
Pines digitales entradas/salidas	14/14	14/14	14/14	54/54	20/20	20/20	54/54
Tensión/corriente pines digitales	3.3v ó 5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	5v 40mA	3.3v 3~15mA (130mA entre todos)
Pines analógicos entradas/salidas	6/0	8/0	6/0	16/0	12/0	12/0	12/2
Tensión/resolución pines analógicos	3.3v ó 5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	5v 10bits (1024 valores)	3.3v 12bits (4096 valores)

Figura 23. Características principales de distintos Arduinos.

De esta placa DUE se utilizaron los siguientes pines:

- Pin de salida de 3.3 V.
- Pin de tierra (GND).
- Pin de salida analógica (DAC), para el altavoz.
- Dos pines de entrada analógica para los potenciómetros.

A ese Arduino DUE se asociaron los elementos descritos a continuación y los cuales se pueden apreciar en las Figuras 24 y 25:

- Dos potenciómetros (uno para controlar la frecuencia y el otro para la amplitud de la señal).
- Un LED en el cual se reflejaba dicha frecuencia y amplitud (la frecuencia del movimiento se reflejaba en la cadencia de parpadeo y la amplitud en la intensidad lumínica con que se iluminaba).
- Una resistencia limitadora de 220 Ω en serie con el citado LED.
- Puerto del Jack de 3.5 de la señal de audio.

El pin de 3.3 V disponible en el Arduino DUE alimentaba toda la placa de prototipos (*protoboard*) y los componentes añadidos a ésta ya descritos, mientras que el pin GND era el que cerraba el circuito, haciendo las funciones de tierra. Del pin DAC se obtenía la tensión necesaria para la señal de salida del altavoz. Por último los pines analógicos A0 y A1 estaban conectados con los dos potenciómetros, controlándose así la frecuencia y la amplitud de la señal.

Por su parte la función del Arduino UNO era la de leer la frecuencia y la amplitud que teníamos en base a la posición de los dos potenciómetros y mostrar esos valores en la pantalla LCD dispuesta para tal fin.

De esta placa se utilizaron los siguientes puertos:

- Pin de 5 V.
- Pin GND.
- Pines analógicos: A0 y A1.
- Pines digitales: SCL, SDA y AREF.

El pin de 5 V era el encargado de alimentar la pantalla LCD, haciendo de tierra y cerrando el circuito de la placa el pin GND. Por su parte los pines digitales SCL y SDA transmitían los datos de la frecuencia y la amplitud a mostrar en la pantalla. A los pines analógicos A0 y A1 llegaban los valores de tensión que se tenían en esos mismos pines en el Arduino DUE, pudiendo así transformar esa señal eléctrica y mostrar en la pantalla respectivamente los valores de la frecuencia y la amplitud de la señal generada. Por último el pin AREF se conectaba al pin de 3.3 V de la placa DUE para medir tensiones entre 0 y 3.3 V al igual que esa placa.

La pantalla LCD (modelo 2004A) venía instalada sobre una placa que contaba con un interfaz I2C que simplificaba mucho las conexiones entre ésta y la placa Arduino UNO con la que la que se comunicaba. Si no se tuviera dicha interfaz, se tendrían que haber utilizado gran parte de los pines del Arduino para realizar las 16 conexiones con las que cuenta la pantalla 2004A. De este modo ya sólo eran necesarios cuatro pines de dicho Arduino:

- Pin de 5 v.
- Pin GND.
- Pines digitales: SDA (Serial Data) y SCL (Serial Clock).

En los momentos iniciales de este punto del TFG con los equipos Arduino, se trabajó con una *protoboard* de forma temporal, quedando el conjunto como puede verse en la Figura 24. Se puede apreciar en dicha imagen que existía una gran cantidad de cables solamente conectados, sin ningún tipo de sujeción, que de haberse dejado así corrían el riesgo de desconectarse, con el consiguiente fallo de funcionamiento de todo el equipo.

Para evitar estos riesgos se decidió trabajar en unos circuitos permanentes empleando unas placas de circuito impreso (*PCBs*) de prototipos en las cuales se recogían todos los componentes que antes se tenían en la *protoboard*, con las mismas conexiones ya comentadas. Las *PCBs* que se crearon para ambos Arduinos, las cuales pueden verse en las Figuras 25 y 27, no eran *PCBs* al uso, si no que se crearon empleando una placa perforada, cables y uniones estañadas.

En el desarrollo de las *PCBs* se siguió un código de colores para facilitar la comprensión de los circuitos y la intervención sobre los mismos en caso de tener que ser modificados o arreglados. Dicho código puede resumirse de la siguiente manera:

- Cables rojos: cables con tensión para la alimentación de los componentes (a 3.3 o 5 V).
- Cables blancos: cables de tierra, todos conectados entre sí.

- Cables amarillos: cables de comunicación con puertos analógicos/digitales permitiendo la transmisión de información.

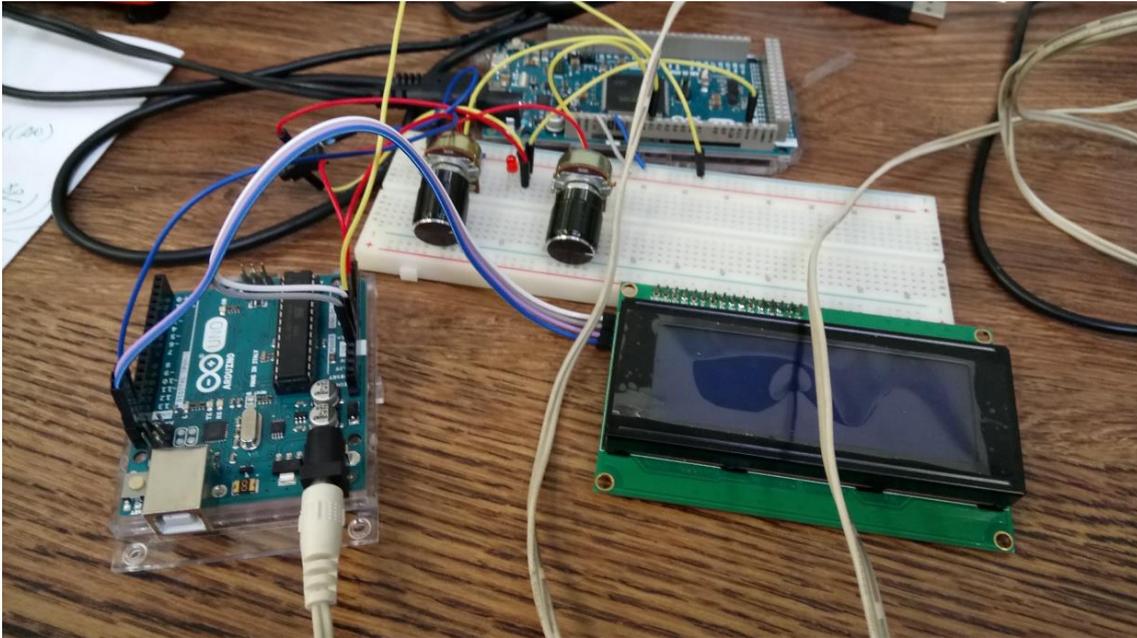


Figura 24. Equipo inicial.

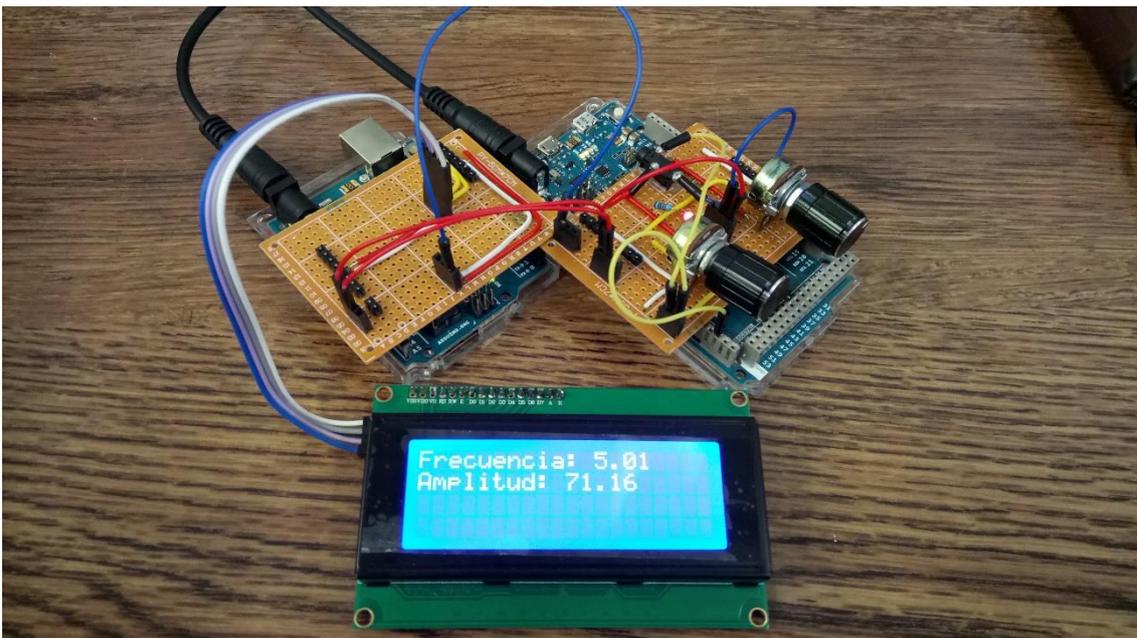


Figura 25. Equipo definitivo.

La alimentación de los Arduinos se podía realizar a través de los puertos USB presentes en todas las placas (y que a su vez servían para cargar en ellos el software correspondiente) o a través de la toma de alimentación específica para dicho uso. La alimentación a través de esa conexión debía realizarse a una tensión comprendida entre los 6 y los 12 V, no debiendo sobrepasar nunca ese último valor para evitar dañar las placas, mientras que por los puertos USB se suministraban unos 5 V.

Para que fuese lo más autónomo posible, se pensó en alimentar ambos equipos con una sola fuente de tensión. Para eso se creó el cable que se ve en la Figura 26. En él se unían los cables que alimentan a cada uno de los Arduinos en un solo extremo permitiendo así conectar a ese extremo común el cable correspondiente a la fuente de alimentación de 9 V.



Figura 26. Cable para alimentar con una sola fuente de alimentación.

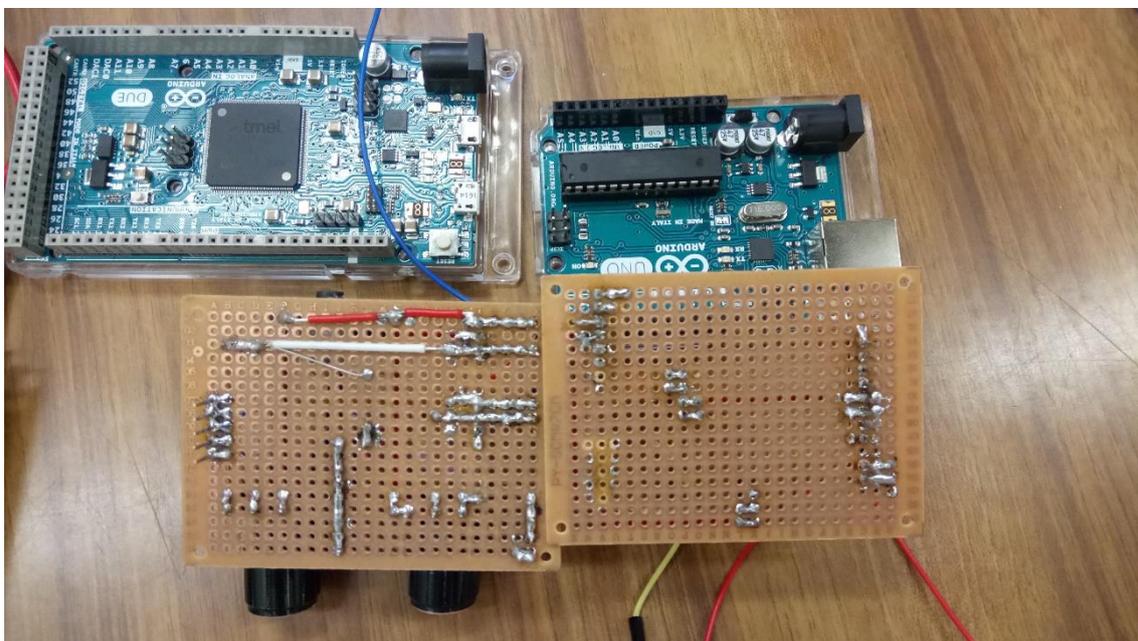


Figura 27. Parte inferior de las placas.

Softwares de Arduino.

Para cada placa se creó, lógicamente, un programa diferente ya que cada Arduino iba a realizar determinadas tareas. El *software* que se desarrolló para generar la onda senoidal con el Arduino DUE puede encontrarse en el Anexo B, junto con el resto de programas que se crearon para este TFG y sus funciones y comandos principales son los siguientes.

La onda que se deseaba generar estaba guardada punto a punto en el fichero aparte, de nombre *Waveforms.h*. Este fichero se cargaba al inicio del programa con la instrucción `#include "Waveforms.h"`. Durante la ejecución, avanzándose punto a punto en bucle por todo el fichero, se controlaba la salida de tensión hacia el altavoz.

La frecuencia de oscilación se controlaba mediante el ajuste del tiempo que transcurría entre dos puntos sucesivos. Dicha relación era inversa pues a mayor frecuencia menor era el tiempo de espera y viceversa. Por esta razón era muy importante la mayor velocidad de reloj del Arduino DUE y la externalización de las operaciones de escritura en la pantalla LCD (las más lentas de todas las operaciones).

A la exactitud de la onda senoidal contribuía el número de puntos en los que se dividiese el período de dicha onda. El fichero *Waveforms.h* contenía un total de 960 puntos, asegurándose así una exactitud de onda más que aceptable. No se configuró para generar un mayor número de puntos porque eso hubiera implicado reducir mucho los tiempos entre puntos consecutivos, perdiendo así continuidad en la señal. Como se puede ver en la Figura 28 cuanto mayor número de puntos se le diera a la onda generada punto a punto (la aproximada) más se iba a aproximar ésta a la real.

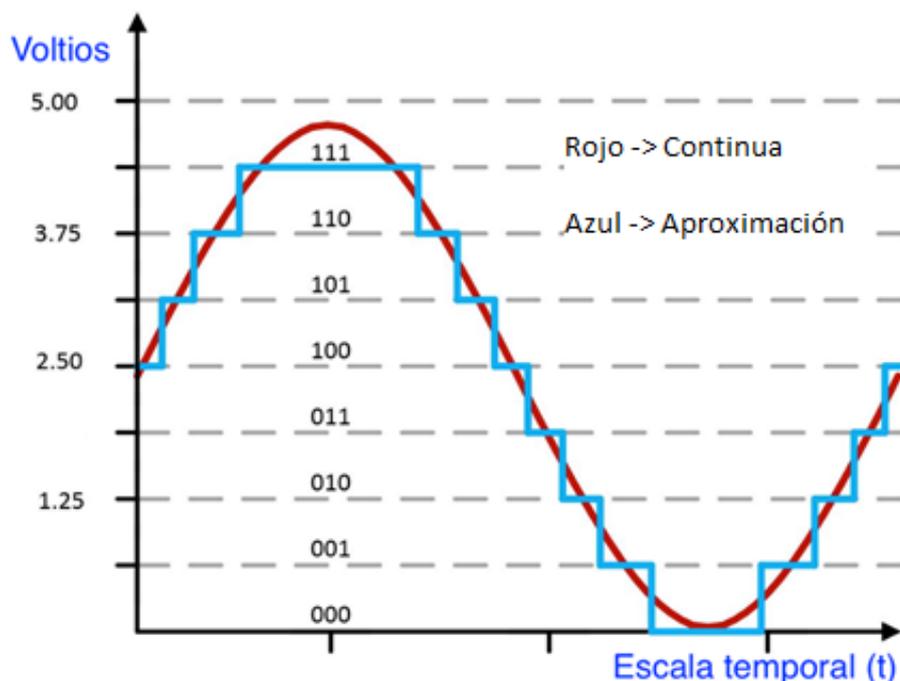


Figura 28. Distintos muestreos en función del número de bits.

Tras la inclusión de la onda en el fichero *Waveforms.h* y definir las variables que se iban a necesitar, en el bucle *void loop()* del programa diseñado para el control del altavoz se realizaban secuencialmente las siguientes operaciones:

1. *“analogRead(A0)”* → lectura del potenciómetro de selección de la frecuencia.
2. *“sample=map(analogRead(A0),0,4095*1.,oneHzSample*0.09,oneHzSample*0.5);”* → la lectura se transformaba en un tiempo de espera (en microsegundos).
3. *“analogRead(A1)”* → lectura del potenciómetro de control de la amplitud.
4. *“analogWrite(DAC1,(Amplitud/4095.0)*waveformsTable[wave0][i]);”* → se avanzaba un punto en la onda y se multiplicaba su amplitud en función de la lectura anterior. El valor resultante se escribía de forma analógica.
5. *“delayMicroseconds(sample);”* → tiempo de espera que se había calculado en el apartado dos.

Gracias a la elevada velocidad de ejecución del Arduino DUE, el tiempo empleado en ejecutar todas las operaciones descritas, estaba gobernado casi en su totalidad por el punto 5, asegurándose así el buen control sobre la frecuencia de oscilación que tenía la onda y la inmediata respuesta en los momentos en los que se actuaba sobre los potenciómetros.

En el Anexo C se recoge el software desarrollado para el Arduino UNO, que se encargaba de la lectura y muestra en el LCD de los valores de la frecuencia y la amplitud de la onda senoidal generada.

A la *PCB* asociada a dicha placa Arduino, llegaban dos cables desde los pines A0 y A1 del DUE con los valores de tensión que se tenían en los potenciómetros. Estos cables se unían a los mismos pines A0 y A1 con los que también contaba la placa UNO. Los valores de la tensión que se tenía en esos pines en el Arduino DUE eran necesarios para, después de transformarlos, saber, gracias a la pantalla LCD, cuáles eran los datos de la frecuencia y del porcentaje de amplitud que se tenía (el 0 o el 100% del valor del potenciómetro).

El pin A0 recogía la tensión correspondiente a la frecuencia (al igual que en la placa de Arduino DUE). Tras una primera medición, se comprobó que el valor de la frecuencia que se mostraba en la pantalla LCD, tarada para mostrar entre 1.93 y 10 Hz, no se correspondía con la medida de la frecuencia que se obtenía con el equipo Sirius. En la Tabla 4 se puede observar en la fila superior las frecuencias que se leían en la pantalla LCD, mientras que en la inferior figuran las frecuencias reales medidas con el láser.

<i>LCD</i>	1.95	3.03	4	5.01	6.47	7.52	8	8.5	9	9.5	9.75	9.99	10.01
<i>Sirius</i>	1.95	2.20	2.49	2.82	3.57	4.43	4.94	5.68	6.62	8	8.9	9.95	10

Tabla 4. Mediciones para el ajuste de la frecuencia en la pantalla LCD.

Con los datos mostrados en la tabla anterior, se obtuvo con Matlab una ecuación que ajustaba el valor real de frecuencia que tenía el movimiento del altavoz o el *shaker* con los grados girados en el potenciómetro a los que correspondía dicha frecuencia. Tras



incluirla en el *software*, ya se conseguía mostrar con exactitud la frecuencia que en realidad tenía el movimiento oscilatorio. Dicha ecuación era la siguiente:

$$y = 0.001307 * e^{0.8226x} + 1.516 * e^{0.1209x} \quad (2)$$

En la programación de este *software* también se tuvo en cuenta que la resolución de los pines analógicos era diferente en cada placa, siendo de 12 bits en el Arduino DUE y de sólo 10 bits en el UNO. Por ello en ciertos puntos del código se realizaban los ajustes necesarios para trabajar con los 1024 valores que permitía el Arduino UNO y no los 4096 que podían tenerse con el DUE.

En el código, tras inicializar las librerías correspondientes y definir todas las variables necesarias, en el bucle *void loop()* se realizaban secuencialmente las operaciones elementales para poder ver los valores de la amplitud y frecuencia en la pantalla LCD. Las principales instrucciones de dicho bucle tenían las siguientes funciones:

1. "*Frec = analogRead(PinPot);*" → en la variable "*Frec*" se almacenaba el valor del potenciómetro encargado de modificar la frecuencia, asociado en ambos Arduinos al pin A0.
2. "*Frecuencia2=0.001307*exp(0.8226*(10.01-8.06*Frec/1023.0))+1.516*exp(0.1209*(10.01-8.06*Frec/1023.0));*" → con la ecuación (2) ya comentada como base, se ajustaba la frecuencia para mostrar la que se tenía realmente, adaptándola al número de 10 bits con los que cuenta el Arduino UNO. Esta instrucción también establecía los valores mínimos y máximos a mostrar de la frecuencia: 1.93 y 10.01 Hz.
3. "*Ampli = analogRead(PinPot2);*" → la variable "*Ampli*" recogía el valor del segundo potenciómetro, asociado a la amplitud de la señal.
4. "*Amplitud2 = (Ampli/1023.0)*100.0;*" → dicho valor de la tensión del pin A1 del Arduino DUE se adaptaba a los 10 bits (1024 valores) de los que disponía la tarjeta UNO y se multiplicaba por 100 para mostrar esa amplitud como un porcentaje de los grados que se giraba el potenciómetro.
5. Las últimas instrucciones, las cuales comenzaban por "*lcd.setCursor*" o "*lcd.print*" eran las necesarias para mostrar en la pantalla y en la línea deseada esos valores de la frecuencia y de la amplitud.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



4. Caracterización del *shaker*.

Para poder realizar las comparaciones necesarias entre el altavoz y el *shaker*, y determinar así el grado de similitud existente entre ambos equipos, se realizaron mediciones con ambos. En este cuarto punto de la memoria se van a tratar las medidas y conclusiones que se obtuvieron de la caracterización del *shaker*.

Recordar que para hacer funcionar al *shaker*, éste se conectaba como el altavoz a la etapa de potencia. Los extremos libre de los cables que se aprecian en la Figura 20 se conectaban a la etapa de igual manera que los que procedían del altavoz (ver Figura 17).

Para llevar a cabo este estudio sobre el *shaker*, éste se hizo funcionar sólo con dos de las tres formas que se habían planteado:

1. Con la aplicación instalada en el teléfono móvil.
2. Con el *script* creado con Matlab.

No se caracterizó con los equipos Arduino, con los que si se haría posteriormente trabajar al altavoz, porque al ser el objetivo principal obtener una alternativa lo más barata posible a dicho *shaker*, se consideró algo antagónico emplear el elemento oscilante caro (el *shaker*) con el equipo barato (el conjunto de ambos Arduinos).

4.1 Caracterización de *shaker* a través de la aplicación móvil.

La oferta de aplicaciones gratuitas que se encontró para generar todo tipo de ondas y sonidos con el teléfono móvil fue inmensa. La principal característica a la hora de elegir una ellas era que permitiese trabajar con esas bajas frecuencias a las que se pretendía mover el altavoz.

En este TFG se optó por la aplicación denominada "*Function Generator*". Ésta permitía seleccionar frecuencias del orden de milésimas de Hz mientras que otras aplicaciones que se barajaron no daban la opción de seleccionar valores inferiores a 20 Hz, que eran muy superiores a los que se necesitaban. Es lógico que la mayoría de dichas aplicaciones solo permitieran bajar hasta aproximadamente esos 20 Hz, pues en entorno a dicho valor es donde se encuentra el límite inferior del umbral de percepción auditiva por el ser humano y estas aplicaciones están concebidas para generar sonidos.

En dicha aplicación, cuya pantalla presentaba el aspecto que puede verse en la Figura 29, se disponía de dos canales (CH1 y CH2), pero para lo requerido sólo se necesitaba uno de ellos. En cada uno de dichos canales se podían elegir diferentes tipos de ondas (senoidal, cuadrada o triangular) así como la opción de variar, entre otros, la frecuencia, la amplitud y la fase (ésta última por defecto venían a 0° y es con ese valor con el que se trabajó).

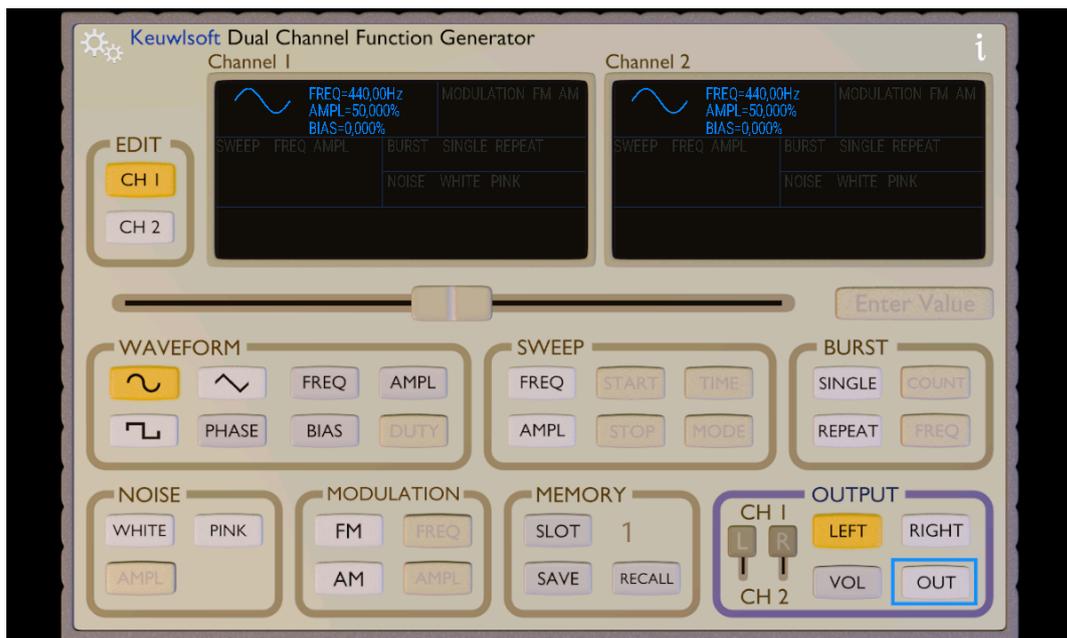


Figura 29. Aplicación "*Function Generator*".

La amplitud, cuando la aplicación se iniciaba, aparecía tarada al 50%. Para poder obtener un mayor desplazamiento en el altavoz, la mayor carrera posible en el movimiento de éste, se aumentó este valor hasta llevarlo al 100%. Esto significaba que la tensión que se aplicaba en el altavoz era la máxima de salida del móvil. Dicho valor estaba además sometido a la ponderación del propio volumen del dispositivo, variándose éste, como se verá más adelante en las explicaciones de la pruebas realizadas, en vez de ese campo de la amplitud en la aplicación para realizar un ajuste más fino.

Para comprobar que dicho cambio del 50 al 100% en el porcentaje de la amplitud y justificar así esa modificación, se realizaron unas mediciones con el altavoz, que serán descritas más adelante en el capítulo concerniente a éste, en las cuales se midió para una frecuencia de 10 Hz las diferentes carreras en el movimiento del baffle obtenidas tanto al 50% como al 100% (se pueden apreciar dichos resultados en la Figura 41).

Las pruebas realizadas con el *shaker* trabajando con la aplicación del teléfono móvil consistieron en la realización de diferentes mediciones variando el porcentaje de volumen del teléfono móvil para frecuencias comprendidas entre los 2 y los 10 Hz. Así se obtenía para cada frecuencia el desplazamiento en el *shaker*, lo denominado carrera o amplitud a lo largo de todo el TFG, mayor o menor en función del porcentaje que se tuviera seleccionado con los botones del audio del teléfono.

El terminal con el que se realizaron todas las pruebas a lo largo del TFG era un Sony Xperia XA. Éste disponía de 15 intervalos de volumen, con lo que entre cada intervalo existía una diferencia de $\pm 6.67\%$. Se indica esto pues dependiendo del móvil que se conectara al altavoz se tendrían unos puntos u otros para alcanzar cierto porcentaje de volumen. Por ejemplo en este móvil el 80% del volumen se conseguía teniendo el nivel de audio en la posición 12, mientras que en otro terminal que, por ejemplo, sólo tuviera 10 intervalos de volumen, ese 80% estaría en la posición 8.

En la siguiente tabla se puede ver, para el móvil empleado, el porcentaje de volumen que corresponde con cada uno de los puntos:

<i>% Volumen</i>	<i>Nivel volumen</i>
100	15
93,33	14
86,66	13
80	12
73,33	11
66,66	10
60	9
53,33	8
46,66	7
40	6
33,33	5
26,66	4
20	3
13,33	2
6,66	1
0	0

Tabla 5. Puntos y porcentaje de volumen en el Sony Xperia XA.

Para la primera frecuencia con que se ensayó, 2 Hz, se comenzó dando un porcentaje de volumen del 0%. A continuación se fue dando un incremento constante del 20% de volumen en las pruebas sucesivas, recorriendo así el 0, 20, 40, 60, 80 y 100% de volumen del dispositivo.

Como era de esperar, para el valor de 0% de volumen, el *shaker* no presentó movimiento alguno, y por tanto no se registró ningún valor ni de la carrera ni de la fuerza. Para esta primera frecuencia ensayada el primer valor de un desplazamiento considerable del *shaker* no se observó hasta que se alcanzó un porcentaje de volumen del 40%, mientras que la fuerza registrada por la célula de carga fue inapreciable para porcentajes de volumen por debajo del 80%.

Los datos que se recogieron para esos 2 Hz y los distintos porcentajes de volumen a los que se ensayó son los que se muestran en la Tabla 6 y en las Figuras 30 y 31. En estas se recogía respectivamente la carrera en mm (datos que aparecen en la columna “Carrera” de la Tabla 6) que se midió gracias al láser y la fuerza en N (columna “Fuerza Neta”) registrada por la célula de carga sobre la cual descansaba el *shaker*.

2Hz

%Vol.	Punto Inf.	Punto Sup.	Carrera (mm)	Fuerza Inf.	Fuerza Sup.	Fuerza Neta (N)	Frec. (Hz)
0	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-
40	56,79	56,81	0,02	-	-	-	-
60	56,75	56,84	0,09	-	-	-	1,98
80	56,74	56,84	0,10	12,60	12,61	0,01	1,98
100	56,62	56,92	0,30	12,60	12,61	0,01	2,01

Tabla 6. Registro de datos para 2Hz. Shaker trabajando con la aplicación del móvil.

Para apreciar la forma en la que se obtenían los datos con el equipo Sirius, se muestra la toma de datos para 2 Hz y 100% de volumen del teléfono en la Figura 32. En su parte superior aparece el registro del movimiento que presentaba el *shaker* (como puede apreciarse era totalmente senoidal dicho desplazamiento, lo cual nos indicaba que se reproducía fielmente la onda que se estaba generando con la aplicación). En esa medición se podía ver el punto más bajo y más alto a los que se situaba la tuerca colocada sobre el *shaker* (valores mostrados en la Tabla 6 respectivamente en las columnas denominadas “Punto Inf.” y “Punto Sup.”). La resta de esos puntos superior e inferior generaba los valores recogidos en la columna denominada “Carrera”.

Debajo del recorrido que presentaba la tuerca se registraba la fuerza que detectaba la célula de carga (N), cuyos valores máximo y mínimo se recogían en las columnas denominadas “Fuerza Sup” y “Fuerza Inf” en la Tabla 6. Su resta proporcionaba la columna nombrada como “Fuerza Neta” y cuyos valores son los reflejados en la Figura 31.

Esta es la forma en que se obtuvieron los valores de la carrera tanto en shaker como en el altavoz y la fuerza debida a ese movimiento a lo largo de todos los ensayos que se realizaron durante este TFG.

En la parte inferior de la Figura 32 se ve el registro de la frecuencia del movimiento (Hz). Este permitía corroborar que la frecuencia medida, la que presentaba el movimiento inducido en el *shaker*, era aquella que se seleccionaba en la aplicación (observar la columna “Frec.” de la Tabla 6 para ver cómo la frecuencia programada se correspondía con la medida).

Como puede verse en la Tabla 6 y en la figura correspondiente, la mayor carrera medida para esos 2 Hz se obtuvo para el 100% de volumen, algo lógico pues es cuando mayor tensión recibía el altavoz. Por ende, como puede verse en la Figura 31, para ese 100% de volumen fue también cuando mayor fuerza se registró.

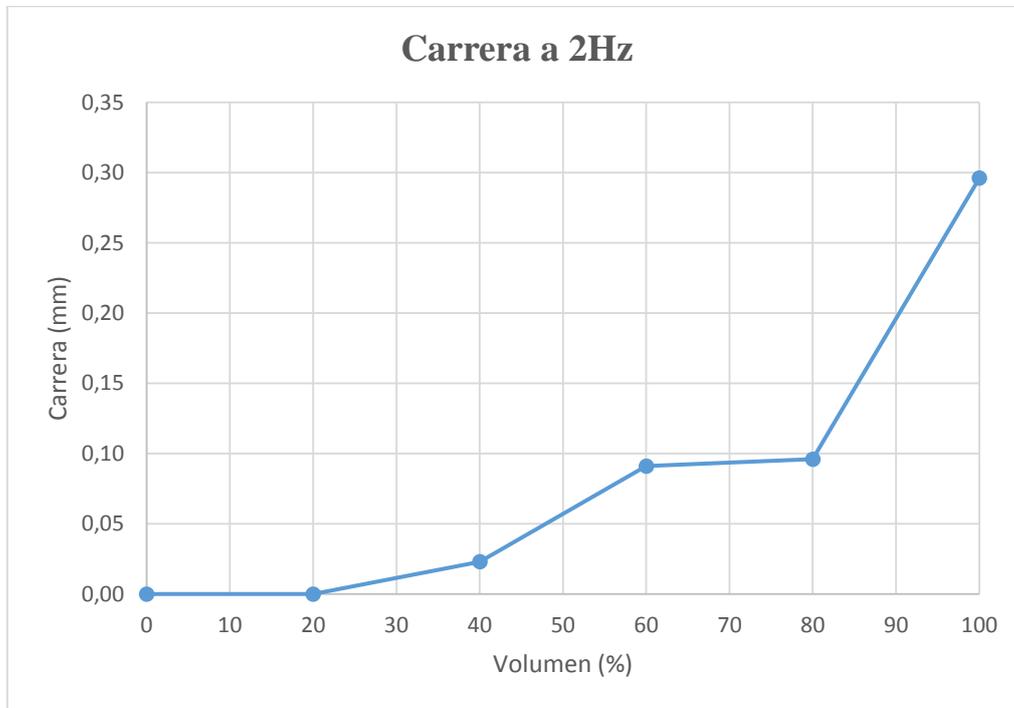


Figura 30. Carrera para 2Hz. Shaker trabajando con la aplicación del móvil.



Figura 31. Fuerza para 2Hz. Shaker trabajando con la aplicación del móvil.

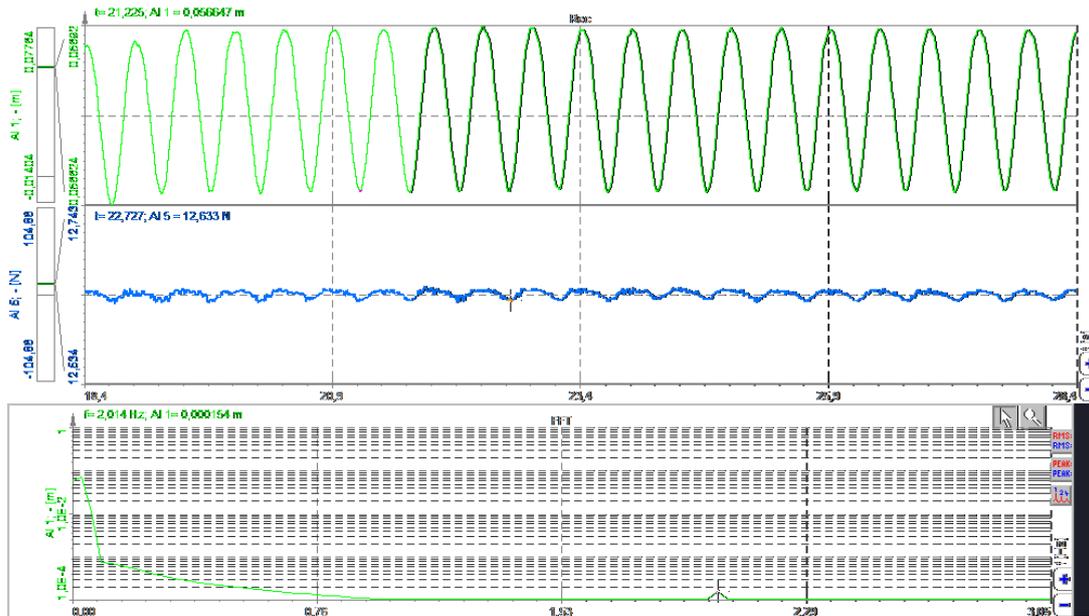


Figura 32. Registro para 2Hz y 100% de volumen. Shaker trabajando con la aplicación del móvil.

Para el resto de las frecuencias se procedió de igual forma que para 2 Hz, con una salvedad. En las mediciones para frecuencias de 8, 9 y 10 Hz se realizaron ensayos también para valores del 86.66 y 93.33% de volumen, pues para el 100% de volumen, el *shaker* a dichas frecuencias se movía en exceso, no apreciándose unos registros nítidos ni para el movimiento ni la fuerza. En la Figura 33, correspondiente a 10 Hz y el 100% del volumen, puede verse en el registro de la fuerza (en color azul) dicha falta de nitidez en comparación con el registro de para 2 Hz y 100% de volumen. Se observa así como para los valores superiores de frecuencia, a medida que los ensayos se acercaban al 100%, el mayor voltaje suministrado hacia que la virulencia del movimiento del shaker y la fuerza fuesen muy elevados, motivo por el cual había que procurar no alcanzar estos límites.

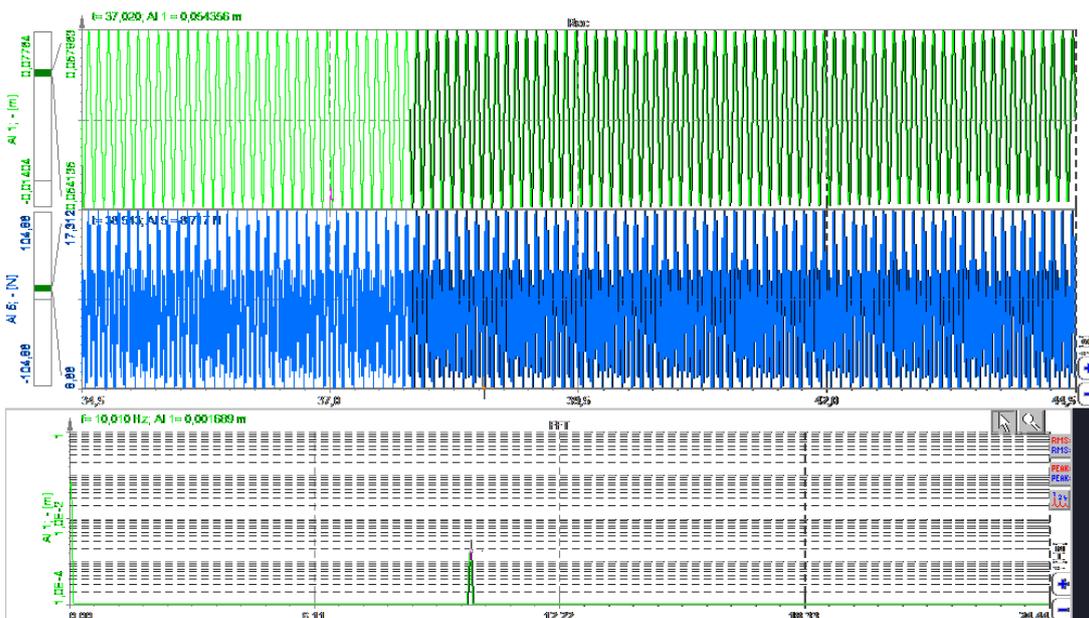


Figura 33. Registro para 10Hz y 100%. Shaker trabajando con la aplicación del móvil.

A continuación en las Tablas 7 y 8 y en las Figuras 34 y 35 se muestran los datos de las carreras y las fuerzas recogidos para todas las mediciones realizadas en este punto de la caracterización del *shaker*.

Frecuencias (Hz)

%Vol.	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
40	0,02	0,04	0,09	0,09	0,12	0,15	0,13	0,23	0,24
60	0,09	0,12	0,19	0,26	0,34	0,49	0,41	0,69	0,73
80	0,10	0,22	0,34	0,51	0,72	0,96	1,05	1,26	1,58
86,66	-	-	-	-	-	-	-	-	2,30
93,33	-	-	-	-	-	-	2,45	2,40	2,97
100	0,30	0,63	1,04	1,50	2,04	2,45	3,73	3,24	3,73

Tabla 7. Carrera (mm). Shaker trabajando con la aplicación del móvil.

Frecuencias (Hz).

%Vol.	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
40	-	-	0,01	0,02	0,04	0,07	0,1	0,2	0,3
60	-	0,01	0,03	0,07	0,15	0,26	0,6	1,1	1,0
80	0,01	0,02	0,07	0,16	0,34	0,64	1,8	2,7	2,2
86,66	-	-	-	-	-	-	-	-	3,4
93,33	-	-	-	-	-	-	6,0	7,2	5,1
100	0,01	0,08	0,27	0,71	1,47	2,43	9,2	11,1	8,6

Tabla 8. Fuerza (N). Shaker trabajando con la aplicación del móvil.

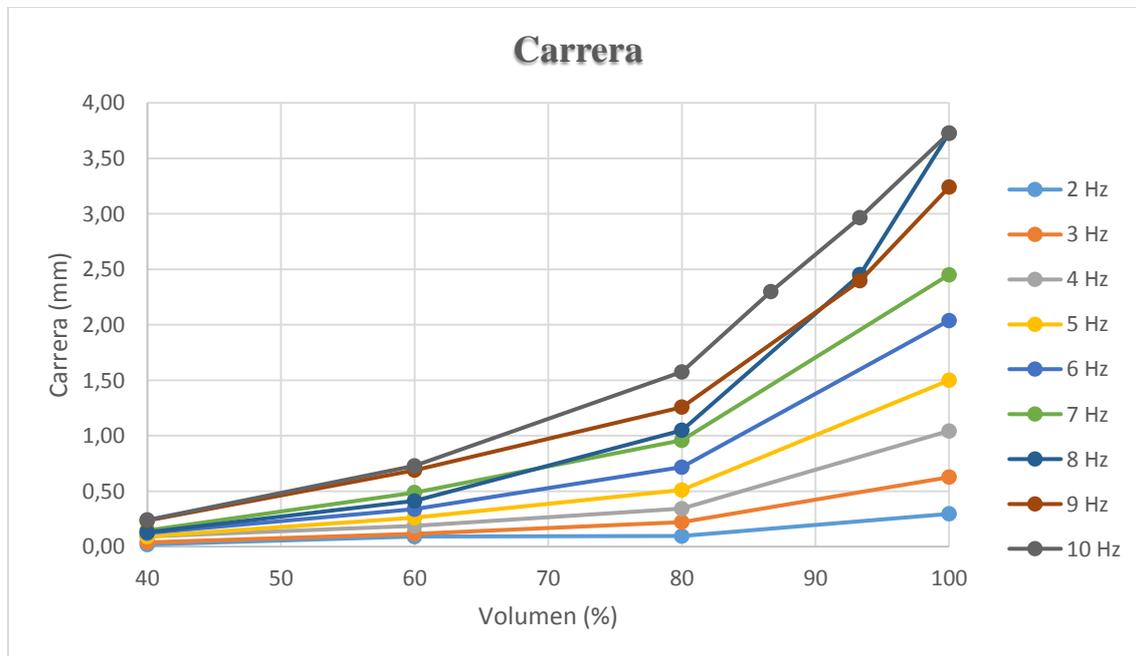


Figura 34. Carrera (mm). Shaker trabajando con la aplicación del móvil.

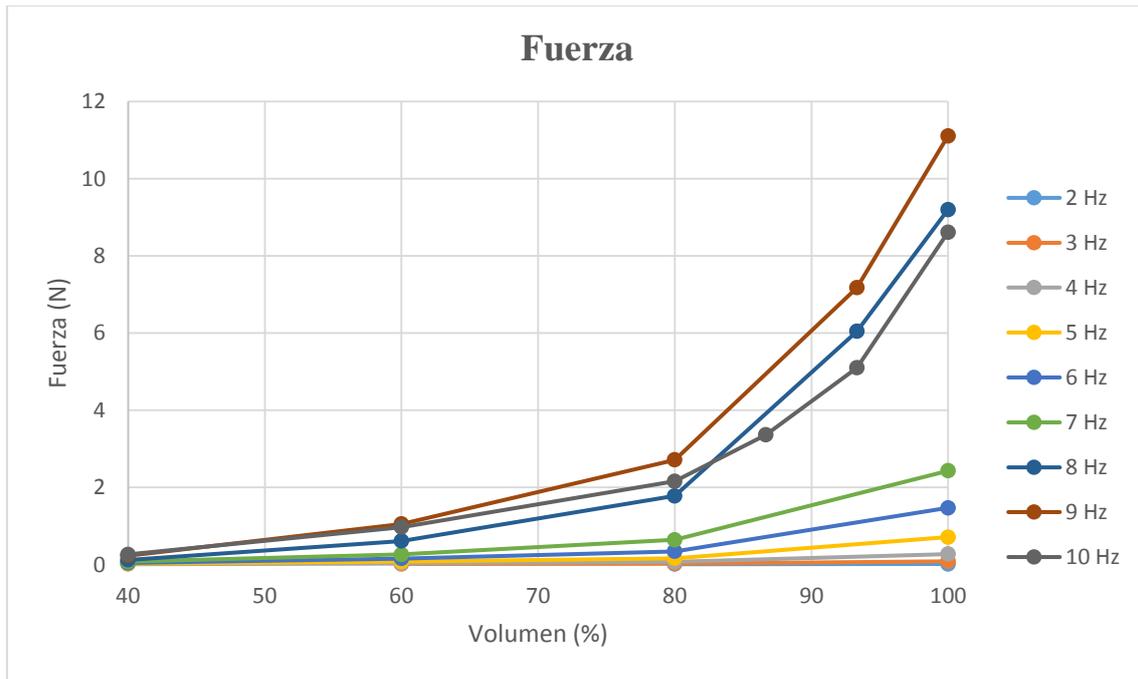


Figura 35. Fuerza (N). Shaker trabajando con la aplicación del móvil.

Al igual que se pudo observar en el registro de la carrera para 2 Hz, en la Figura 34 se ve como a medida que aumentaba el volumen del teléfono móvil, para cualquiera de las frecuencias ensayadas, la carrera que se podía observar en el *shaker* era cada vez mayor. También se ve como para un mismo porcentaje de volumen, cuanto mayor era la frecuencia elegida en la aplicación mayor lo fue también esa carrera, con la única excepción de que para el 93.33 y 100% a 8 Hz se conseguía un valor mayor que para 9 Hz.

En consonancia con esto, en la Figura 35 se puede observar un resultado similar para la fuerza registrada con la célula de carga. Excepto para 10 Hz, cuya fuerza a partir de un porcentaje de 60% de volumen quedó por debajo de la que se tenía con 9 Hz de frecuencia y para 93.33 y 100%, momento en el cual con 8 Hz también se consiguió una mayor fuerza, en el resto de las mediciones cuanto mayor era la frecuencia mayor lo era también la fuerza registrada.

Por lo que en el caso de trabajar en el *shaker* con la aplicación del teléfono móvil, para obtener la mayor fuerza posible sería recomendable trabajar con una frecuencia de 9 Hz y el 100% del volumen.



4.2 Caracterización del *shaker* a través del *script* de Matlab.

El siguiente punto del TFG fue la caracterización del *shaker* utilizando el *script* desarrollado en Matlab. El programa se encuentra completo en el Anexo A pero a continuación se explican brevemente las variables que aparecían en ese *script* y cuál era su funcionamiento:

- T_f → tiempo que se deseaba ejecutar la señal antes de detenerse.
- f → frecuencia del movimiento.
- A → variable asociada a la amplitud del movimiento.
- f_s → número de puntos por periodo.
- T → vector de tiempos
- $y = A * ones(1, length(T))$ → genera la onda con la amplitud indicada (A) que multiplica a la matriz “ones” de dimensiones 1 y longitud igual a la de T .
- “sound” → reproduce una señal de audio dada por y

La forma de caracterizar el *shaker* con el *script* de Matlab fue la misma que la seguida con la aplicación del teléfono. Se comenzaba ensayando con una frecuencia de 2 Hz para, realizando un aumento constante de uno en uno del valor de la frecuencia, llegar hasta los 10 Hz de máximo que se habían alcanzado en las pruebas realizadas con la aplicación del móvil. En cada una de esas frecuencias se tomaban mediciones a distintos valores de la variable A presente en el código.

Como se podrá ver en el capítulo correspondiente, en los ensayos realizados con el altavoz y el programa de Matlab, se observaron unas zonas críticas a determinados valores de la variable A relacionada con la amplitud de la onda en las cuales el altavoz presentaba movimientos inestables. Para identificar mejor esos valores de A en los cuales se daba ese comportamiento anómalo, se creó la Tabla 14 que se incluye más adelante.

Exactamente esas mismas zonas críticas se observaron en los registros llevados a cabo en el *shaker*, por lo que se puede decir que no era un problema del altavoz o del *shaker*, sino que lo era de la señal que entraba en ellos procedente del ordenador.

Uno de los registros realizados es el que se observa en la Figura 36. En él se puede observar, la falta de nitidez tanto en el registro de la fuerza como en el del movimiento del baffle obtenido con el láser, lo cual reflejaba el comportamiento ese inestable (como se ve en la Tabla 14, ese valor de $A=0,25$ se incluía como uno de los valores a los cuales se observaban ese comportamiento errático en el altavoz).

En las mediciones efectuadas entre 2 y 6 Hz se trabajó con valores de la variable A de entre 0.05 y 0.45. La razón de estos umbrales residía en que para amplitudes inferiores a esos 0.05 el *shaker* no presentaba movimiento alguno, mientras que para valores superiores a $A=0.45$ se apreciaban de forma continua las ya comentadas inestabilidades en su funcionamiento.

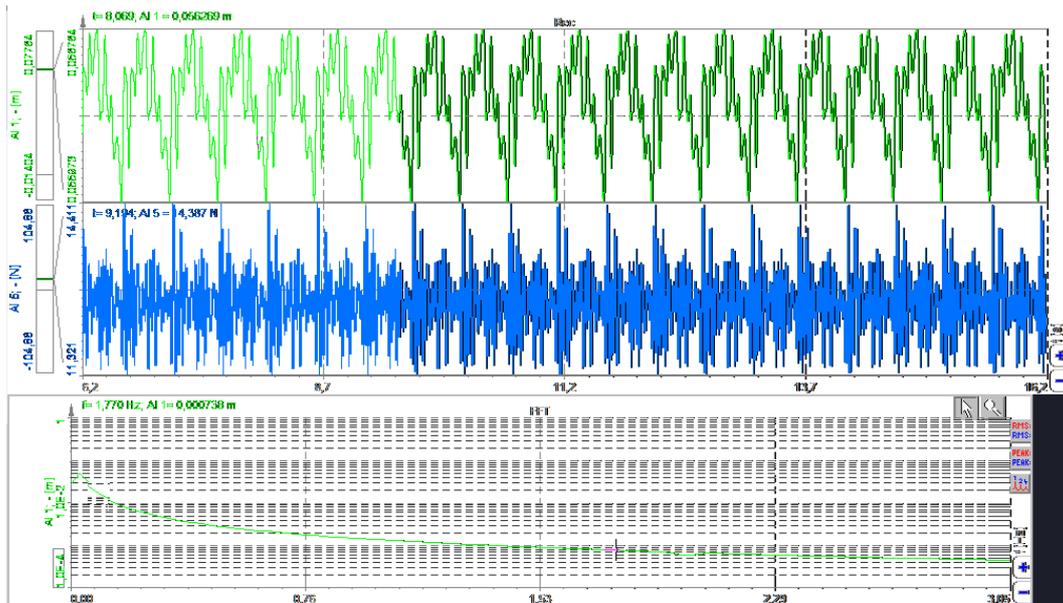


Figura 36. Registro para 2Hz y $A = 0.25$. Shaker trabajando con Matlab.

Para observar la diferencia en el registro de la fuerza que había entre una zona aceptable y otra en la que se tenía ese comportamiento errático, se muestran a continuación los datos tomados para una frecuencia de 5 Hz a amplitudes dadas de 0.05 y 0.45 respectivamente. Observar las diferencias entre las Figuras 37 y 38 y cómo en esta última se reflejaban dichas inestabilidad en la parte superior del registro del movimiento del shaker además de la menor nitidez en el registro de la célula de carga.

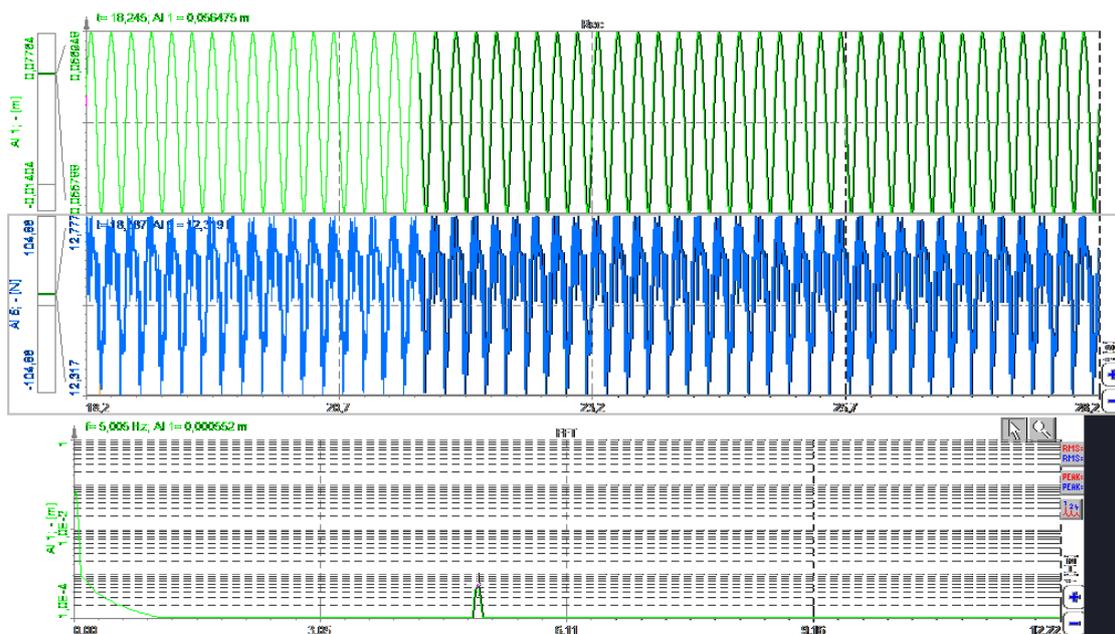


Figura 37. Registro para 5Hz y $A=0.05$. Shaker trabajando con Matlab.

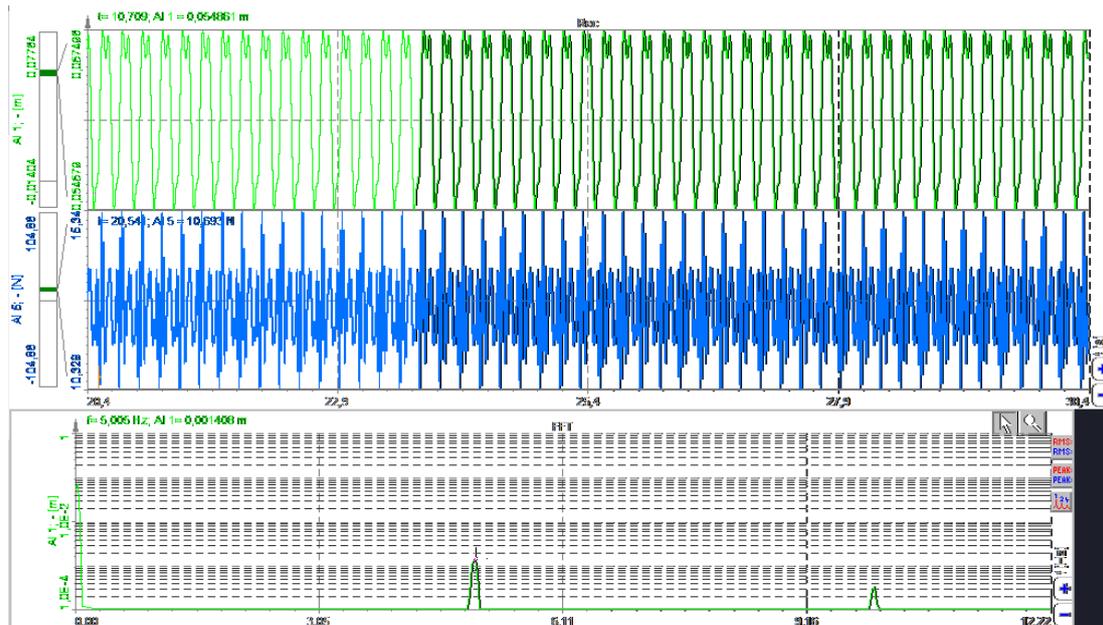


Figura 38. Registro para 5Hz y A=0.45. Shaker trabajando con Matlab.

Para las frecuencias comprendidas entre 7 y 10 Hz, el número de valores de la variable A en los cuales el *shaker* podía trabajar de manera satisfactoria era cada vez menor. Mientras que para 7 Hz a partir de un valor de superior a 0.2 el comportamiento ya no era aceptable, para 8 y 9 Hz sucedía lo mismo a una amplitud de 0.1 y para 10 Hz con A = 0.05. Por ello, para estas tres frecuencias superiores se realizaron ensayos con valores de esa variable A comprendidos entre 0.01 y 0.05.

Las Tablas 9 y 10 y las Figuras 39 y 40, recogen los datos de todas las mediciones tomadas en esta caracterización con Matlab. Las casillas que en dichas tablas figuran sin valores numéricos, como por ejemplo en el caso de 2Hz y A=0.25, se correspondían con los puntos de movimiento inestable, o puntos donde la variable A tenía un valor superior al máximo admisible para esa frecuencia. Esas inestabilidades, en ambas figuras, quedaron reflejadas en forma de valles (por esa ausencia de valores numéricos).

		Frecuencias (Hz)								
Variable A		2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
0,01		-	-	-	-	-	-	0,64	0,73	1,16
0,025		-	-	-	-	-	-	2,19	2,38	2,68
0,05		0,14	0,38	0,77	1,16	1,74	2,06	4,19	2,99	3,07
0,1		0,19	0,57	1,20	2,21	2,19	3,04	-	-	-
0,15		0,25	0,84	1,58	2,79	2,78	3,60	-	-	-
0,2		0,34	1,00	2,27	2,77	3,85	-	-	-	-
0,25		-	1,21	-	-	2,86	-	-	-	-
0,3		-	0,84	1,63	2,31	3,06	-	-	-	-
0,35		0,33	0,94	1,77	2,44	3,20	-	-	-	-
0,4		0,36	1,04	1,95	2,67	3,53	-	-	-	-
0,45		0,40	1,16	2,11	2,92	-	-	-	-	-

Tabla 9. Carrera (mm). Shaker trabajando con Matlab.

Variable A	Frecuencias (Hz)								
	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
0,01	-	-	-	-	-	-	1,03	1,39	2,65
0,025	-	-	-	-	-	-	5,28	5,71	7,89
0,05	0,01	0,04	0,20	0,45	1,74	2,41	11,76	8,86	9,50
0,1	0,05	0,07	0,40	1,17	2,19	4,82	-	-	-
0,15	0,02	0,13	0,50	4,02	2,78	10,06	-	-	-
0,2	0,05	0,16	1,94	4,16	3,85	-	-	-	-
0,25	-	0,78	-	-	2,86	-	-	-	-
0,3	-	0,13	0,50	1,40	3,06	-	-	-	-
0,35	0,02	0,16	0,56	1,73	3,20	-	-	-	-
0,4	0,04	0,17	0,73	3,33	3,53	-	-	-	-
0,45	0,03	0,20	0,91	4,91	-	-	-	-	-

Tabla 10. Fuerza (N). Shaker trabajando con Matlab.

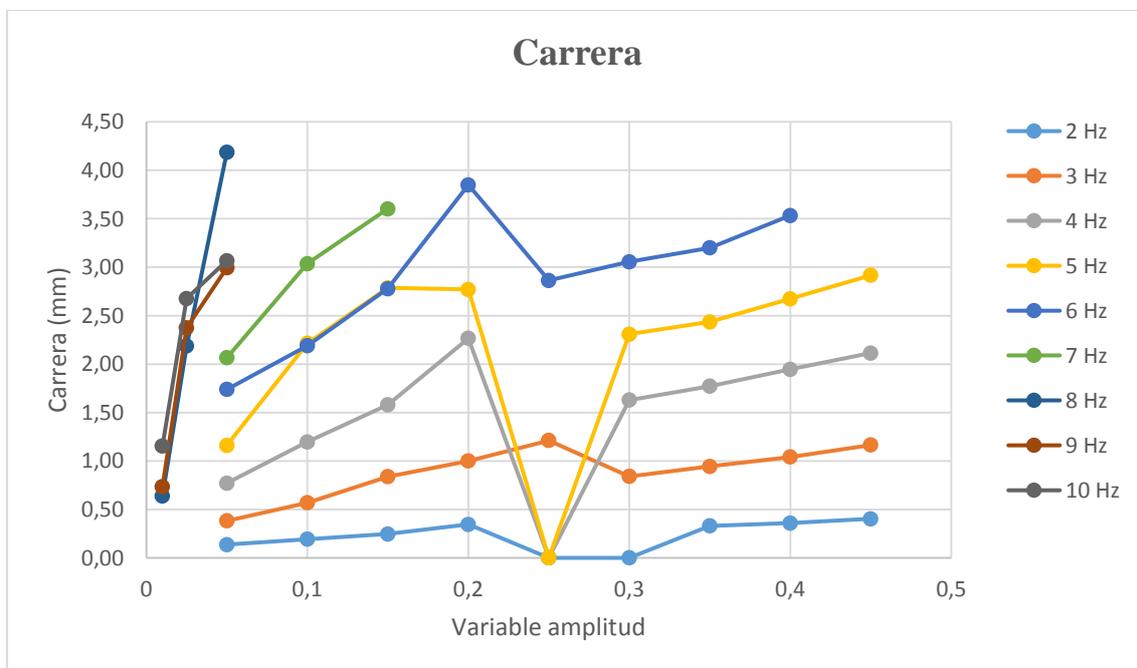


Figura 39. Carrera (mm). Shaker trabajando con Matlab.

Al igual que en la caracterización del *shaker* realizada con la aplicación del teléfono móvil, en estos ensayos con el *script* de Matlab para un valor de la variable A determinado, siempre cuanto mayor era la frecuencia mayor eran también tanto carrera como la fuerza registrada por la célula de carga. Sólo se dio una excepción. Para A=0.05 los registros correspondientes a 8 Hz estaban por encima de los referentes tanto a 9 como a 10 Hz.

También, salvo para amplitudes dadas en las que se tenían los ya comentados funcionamientos inestables en el altavoz o valores de la variable A muy próximas a los críticos, los registros tanto de la carrera como de la fuerza en todas las frecuencias aumentaban a medida que se incrementaba el valor de la variable A en el *script*. Esto se puede observar perfectamente en la siguiente figura.

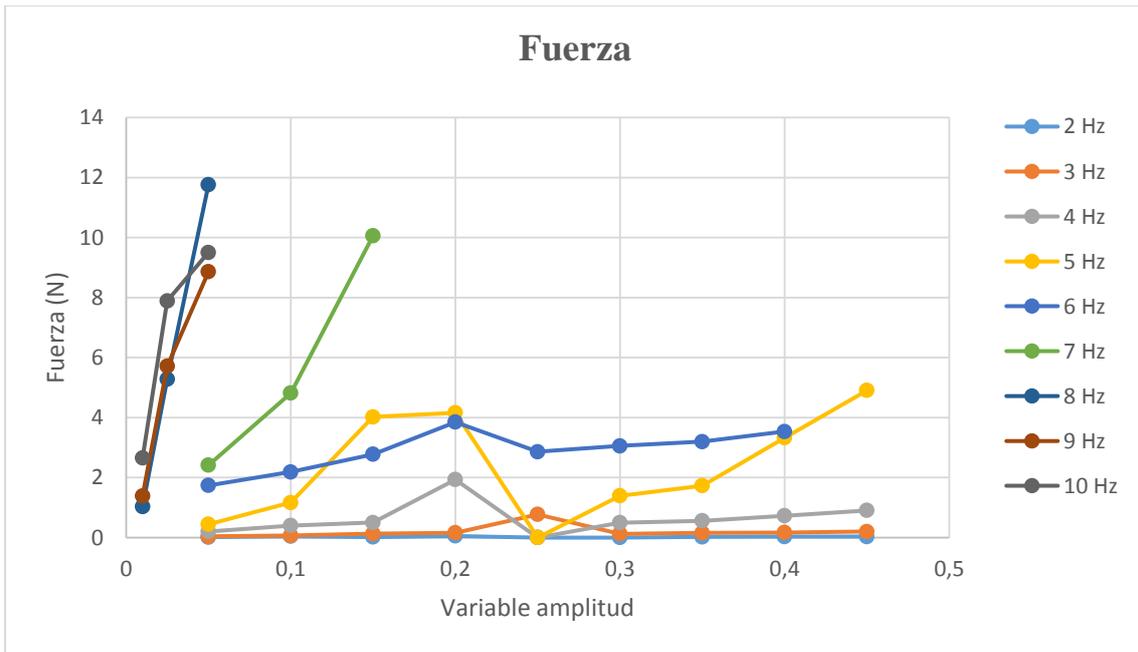


Figura 40. Fuerza (N). Shaker trabajando con Matlab.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



5. Caracterización del altavoz.

En las siguientes páginas se van a exponer los resultados de las pruebas que se realizaron para la caracterización del altavoz. Dichos ensayos se llevaron a cabo con el baffle libre de masa auxiliar, buscando determinar cuáles eran las condiciones más favorables en el funcionamiento del altavoz, y con una masa como la que se instaló sobre el *shaker* (la tuerca de 0.19 kg), para obtener los datos necesarios que permitieran determinar el grado de similitud entre ambos equipos.

5.1. Caracterización sin masa.

En esta primera toma de datos con el altavoz se trabajó sin masa auxiliar alguna sobre él. Los principales objetivos fueron:

1. Observar la respuesta del altavoz a las diferentes frecuencias y amplitudes ensayadas.
2. Localizar zonas de trabajo inestables en su funcionamiento para así poder evitarlas en un futuro.
3. Comprobar la correspondencia entre la frecuencia que se programaba/seleccionaba y la que realmente presentaba el movimiento del altavoz (la medida con el equipo Sirius).
4. Comprobar la similitud en el comportamiento del altavoz ante las diferentes formas de generar la onda senoidal.

En estas mediciones sin masa se registraron solamente la frecuencia que presentaba el movimiento del altavoz y dicho movimiento senoidal que desarrollaba, de donde se obtenía la diferencia existente entre los puntos más alto y más bajo a los que llegaba el altavoz en su movimiento (la carrera). Estos valores dependían de las frecuencias a las que se ensayaba y de los valores de la variable A o del porcentaje de volumen ya se ensayara con el script de Matlab o con la aplicación del teléfono móvil.

Con el registro de la frecuencia que presentaba el movimiento del altavoz se buscaba comprobar que las frecuencias que se programaban de una forma u otra forma y se reproducían en el altavoz eran las que realmente presentaba el movimiento de éste.

Como no se pretendía medir en ningún momento la fuerza que el movimiento del altavoz generaba, como se hizo más tarde en otra serie de mediciones, en estas primeras pruebas realizadas sobre el altavoz, éste trabajó sin soportar la tuerca de 0.19 kg.

5.1.1. Caracterización sin masa a través de la aplicación móvil.

Ya se indicó en el apartado donde se exponían los resultados de las mediciones realizadas sobre el *shaker* bajo la acción de la aplicación del teléfono móvil, que la aplicación elegida fue la denominada “*Function Generator*”. Como es lógico ésta es la misma que se empleó en la caracterización del baffle.

Recordar que al iniciar la aplicación la variable amplitud aparecía por defecto con un porcentaje del 50%, pero podía regularse entre el 0 y 100%. Para comprobar que se obtenía una mayor carrera, con dicha amplitud al 100% en vez de al 50%, se realizó un primer ensayo que consistió en realizar a 10 Hz un barrido a distintos porcentajes de volumen del teléfono móvil teniendo esa variable amplitud de la aplicación primero un valor del 50% y después del 100%. El resultado es el que se muestra a continuación en la Figura 41.

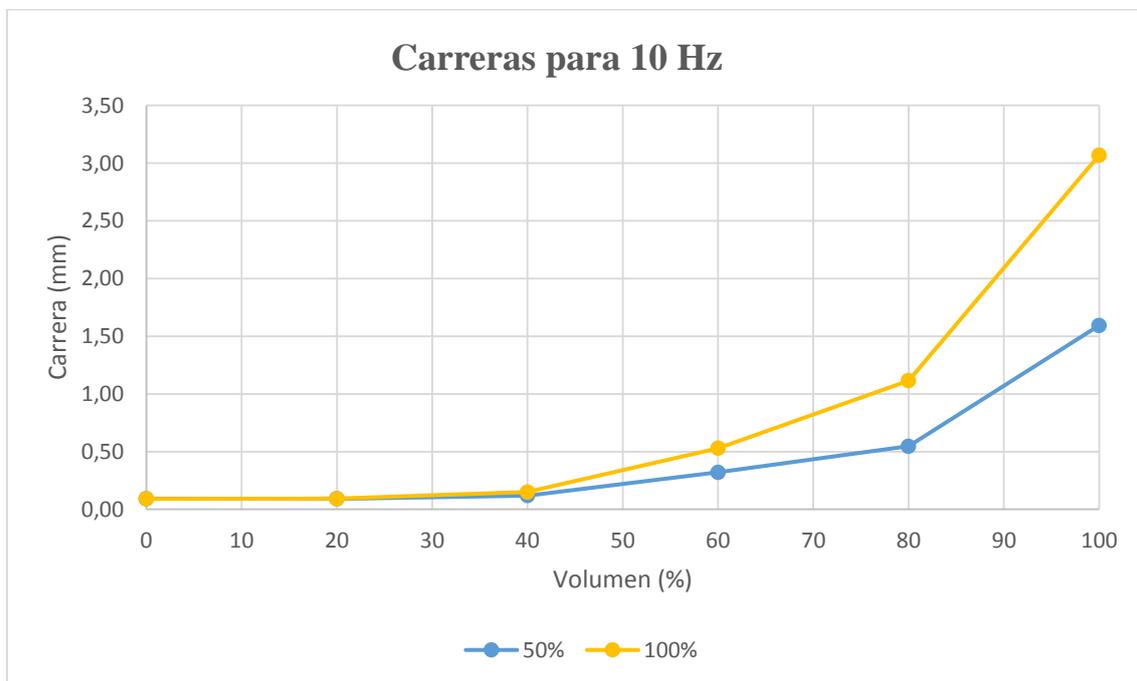


Figura 41. Carrera con el 50% y el 100% de la amplitud.

Como puede verse, al doblar ese valor de la amplitud que se seleccionaba en la aplicación, se pudo afirmar que los valores de la carrera medidos en el altavoz prácticamente en todos los porcentajes de volumen en los que se tenía un valor del movimiento apreciable también se multiplicaban por dos. Por esta razón, para las todas las pruebas que se realizaron con esta aplicación a lo largo de todo el TFG, esa amplitud presente en la aplicación siempre se taró al 100% y no al 50% como aparecía por defecto.

Tras este primer ensayo se procedió de igual manera que en las mediciones que se realizaron sobre el *shaker*. Para una frecuencia de 2 Hz se realizaron pruebas a distintos porcentajes de volumen del teléfono móvil. Esas mediciones se volvieron a repetir para el resto de frecuencias hasta alcanzar los 10 Hz. En la Figura 42 y la Tabla 11 se recogen los datos que se registraron para todas las frecuencias y porcentajes de audio ensayados.

% Vol.	Frecuencias (Hz)								
	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
100	0,59	1,34	2,14	2,97	3,70	4,37	4,86	5,43	3,07
80	0,20	0,45	0,72	1,04	1,34	1,67	1,97	2,24	1,12
60	0,11	0,23	0,36	0,51	0,68	0,82	0,99	1,10	0,53
53,33	0,09	0,18	0,30	0,40	0,54	0,66	0,76	0,87	0,42
46,66	0,09	0,12	0,19	0,26	0,32	0,40	0,47	0,54	0,27
40	0,09	0,09	0,14	0,17	0,21	0,25	0,29	0,33	0,15
33,33	0,09	0,09	0,09	0,11	0,15	0,17	0,19	0,23	0,10
20	0,10	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09
0	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09

Tabla 11. Carrera (mm). Altavoz sin masa trabajando con la aplicación del móvil.

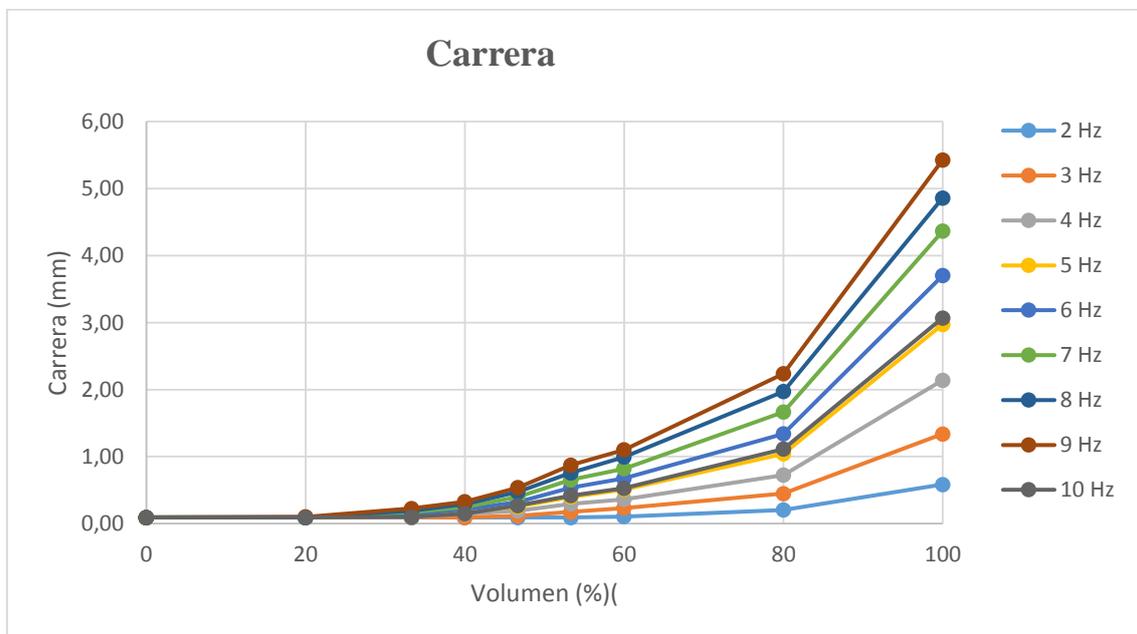


Figura 42. Carrera (mm). Altavoz sin masa trabajando con la aplicación del móvil.

Como puede verse, para todas las frecuencias cuanto mayor era el porcentaje de volumen que se tenía seleccionado mayor era la diferencia entre los puntos superior e inferior que alcanzaba el altavoz. También puede indicarse que, a excepción de para la frecuencia de 10 Hz (que como puede verse sus registros fueron muy similares a los obtenidos a 5 Hz), para todos los porcentaje de volumen, la carrera era mayor cuanto mayor lo fuese la frecuencia, dándose en este ensayo el mayor valor de esa carrera a 9 Hz y el volumen al 100%.

Esa Figura 42 muestra también que para mediciones con un nivel de volumen inferior al 40%, los registros de esos desplazamientos medidos en el altavoz apenas eran apreciables, independientemente de la frecuencia a la que se estaba ensayando. Esto justifica que en sucesivas pruebas en las que intervenía esta aplicación del teléfono móvil, se obviasen los ensayos con porcentajes de volumen inferiores al 46.66%.

En la Tabla 12 puede comprobarse que para todas las mediciones efectuadas, el registro de la frecuencia con el equipo Sirius que presentaba el movimiento coincidía con la seleccionada en la aplicación. Las casillas sin valores numéricos se debían a que en esos casos el porcentaje de volumen que se tenía seleccionado era tan bajo que el movimiento en el altavoz era casi inapreciable, siendo imposible así obtener la frecuencia de ese movimiento.

Frecuencias (Hz).

<i>% Vol.</i>	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
100	1,98	3,02	4,00	5,01	6,01	6,99	8,00	9,00	10,01
80	1,95	2,99	4,00	5,01	6,01	6,99	8,00	9,00	9,98
60	1,95	2,99	3,97	5,04	5,98	6,99	8,00	9,00	9,95
53,33	1,98	2,99	3,94	5,04	6,01	6,99	8,00	9,03	10,01
46,66	1,98	2,99	3,94	5,01	6,01	7,02	8,00	9,00	10,01
40	2,08	2,99	4,03	4,97	5,98	7,05	7,97	9,06	10,01
33,33	-	2,99	4,03	-	6,01	6,99	8,00	9,03	-
20	-	-	3,97	-	5,97	7,02	8,03	9,06	-
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 12. Frecuencia (Hz). Altavoz sin masa trabajando con la aplicación del móvil.

5.1.2. Caracterización sin masa a través del *script* de Matlab.

La forma en la que se realizaron las medidas sobre el altavoz trabajando bajo la acción de *script* de Matlab fue la misma que con el *shaker*. Se realizaron ensayos a frecuencias comprendidas entre los 2 y los 10 Hz, dando en cada una éstas determinados valores a la variable A asociada con la amplitud del movimiento senoidal.

En las primeras de esas mediciones (las realizadas para frecuencias comprendidas entre los 2 y los 5 Hz) se tomaron 8 mediciones con valores de esa variable A comprendidos entre 0.1 y 0.45. La razón para dar esos valores límite a esa variable fue totalmente experimental como ya se explicó en estas pruebas realizadas con el *shaker* (para valores inferiores a 0.1 a esas bajas frecuencias el altavoz apenas presentaba movimiento, mientras que para valores superiores a $A=0.45$ el movimiento que se daba en el altavoz era muy inestable, por lo que no se ensayó con valores superiores a éste).

En las mediciones llevadas a cabo a una frecuencia de 6 Hz se partió del mismo valor ($A = 0.1$), pero en este caso el límite superior debió fijarse en un valor de $A=0.3$, pues ese comportamiento inestable aparecía antes a medida que se iba aumentando el valor de la frecuencia. Para contrarrestar esa disminución en el número de mediciones posibles, para las frecuencias superiores (entre los 7 y los 10 Hz) el valor mínimo de A con el que se ensayó fue de 0.05 y no de 0.1, teniendo con 7 Hz un valor máximo de A de 0.15 y en los restantes casos (a 8, 9 y 10 Hz) de $A= 0.1$.

Toda esta explicación se comprende mejor observando la Tabla 13 y la Figura 43 que se muestran a continuación.

Variable A	Frecuencias (Hz)								
	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
0,05	-	-	-	-	-	3,69	5,36	4,51	4,89
0,1	0,40	1,18	2,35	4,04	3,90	4,95	5,50	6,69	6,33
0,15	0,53	1,69	2,92	4,89	4,69	6,30	-	-	-
0,2	0,77	1,96	4,35	4,96	-	-	-	-	-
0,25	-	2,43	-	-	-	-	-	-	-
0,3	-	1,68	3,00	4,23	5,03	-	-	-	-
0,35	0,68	1,82	3,21	4,48	-	-	-	-	-
0,4	0,72	2,06	3,56	4,80	-	-	-	-	-
0,45	0,79	2,28	3,88	5,11	-	-	-	-	-

Tabla 13. Carrera (mm). Altavoz sin masa trabajando con Matlab.

Para algunas de esas frecuencias ensayadas, antes de llegar al valor máximo de la variable A ya descrito para todos los casos, había mediciones para algunos valores de A en los cuales el baffle presentaba ese movimiento inestable. En la Tabla 13, donde se recogen los valores de la carrera (mm) que experimentó el baffle en todos los casos ensayados, esas zonas inestables figuran como guiones y como valles en la Figura 43, por la imposibilidad de tomar registros con valores fiables.

Los valores de la variable A (incluidos también los mostrados en la tabla) para todas las frecuencias ensayadas a los cuales se tenían esas zonas inestables son los que se muestran en la Tabla 14.

Frecuencia	Amplitudes críticas
2 Hz	0,24 - 0,34
3 Hz	0,23 - 0,24 y 0,26 - 0,29
4 Hz	0,23 - 0,27
5 Hz	0,22 - 0,26
6 Hz	0,20 - 0,25
7 Hz	-
8 Hz	-
9 Hz	-
10 Hz	-

Tabla 14. Valores de la variable A que generaban inestabilidades.

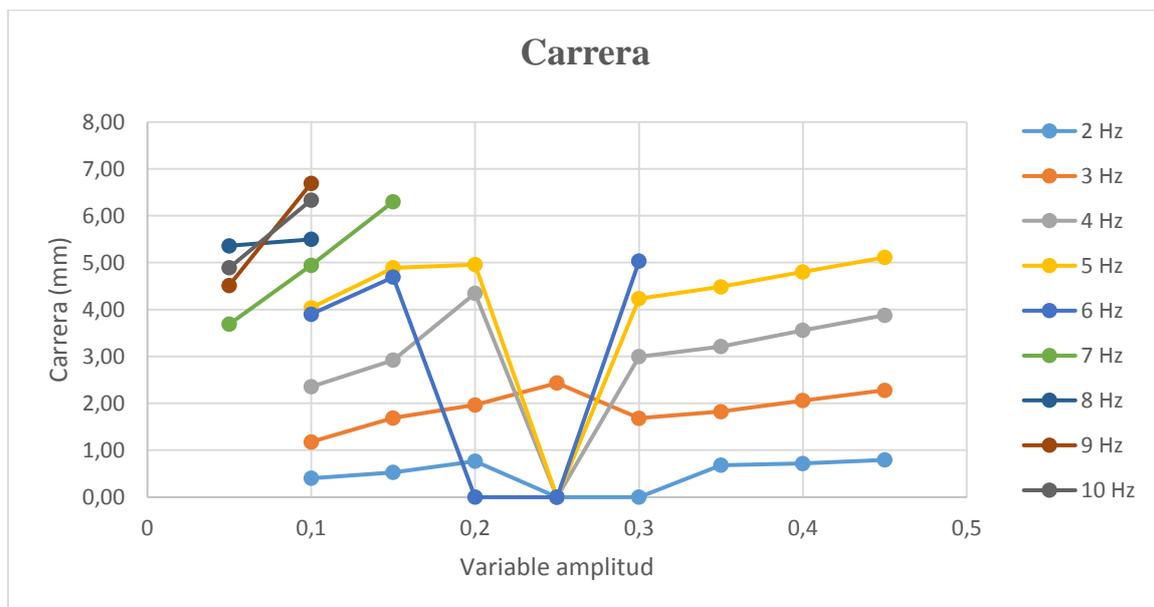


Figura 43. Carrera (mm). Altavoz sin masa trabajando con Matlab.

En estas mediciones se pudo comprobar cómo, al igual que había sucedido en los ensayos con el script de Matlab sobre el *shaker*, la carrera era en general mayor cuanto mayor lo era la frecuencia. La única excepción considerable se encontró para los valores de 8, 9 y 10 Hz, alcanzándose el máximo desplazamiento para un valor de A de 0.05 con una frecuencia de 8 Hz, mientras que para A=0.1 el mayor desplazamiento se dio para 9 Hz.

También es visible como para todas las frecuencias, el recorrido en la carrera que experimentó el altavoz era cada vez mayor a medida que aumentaba el valor de la variable A a lo largo del ensayo. Había ciertas excepciones, las cuales se dieron en los mismos valores de A que cuando el *shaker* trabajaba con el *script* de Matlab, y que eran esos valores de A en los que se tenía el comentado comportamiento inestable en el baffle. Para



observar dichas similitudes basta con mirar la Figura 39 correspondiente a los registros de los recorridos medidos en el *shaker*.

En la Tabla 15 se puede ver como las frecuencias que se programaron en el *script* de Matlab en todas las mediciones realizadas, se correspondían con aquellas que se medían con el equipo Sirius.

Frecuencias (Hz)

<i>Variable A</i>	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
0,05	-	-	-	-	-	6,99	8,00	9,00	10,01
0,1	2,01	2,99	4,00	5,01	6,01	6,99	8,00	9,00	10,01
0,15	1,98	2,99	4,00	5,01	6,01	6,99	-	-	-
0,2	2,01	2,99	4,00	5,01	-	-	-	-	-
0,25	-	2,99	-	-	-	-	-	-	-
0,3	-	2,99	4,00	5,01	6,01	-	-	-	-
0,35	1,98	2,99	4,00	5,01	-	-	-	-	-
0,4	2,01	2,99	4,00	5,01	-	-	-	-	-
0,45	2,01	2,99	4,00	5,01	-	-	-	-	-

Tabla 15. Frecuencia (Hz). Altavoz sin masa trabajando con Matlab.

5.2. Caracterización con masa.

El siguiente punto en la caracterización del altavoz fueron los ensayos realizados añadiendo sobre él el soporte de plástico y la tuerca de 0.19 kg que pueden observarse en la Figura 44. Como se ha explicado con anterioridad, la presencia de dicha tuerca tenía como fin aumentar la fuerza que registraba la célula de carga. El movimiento que se iba a tener en el altavoz era el mismo, así que para incrementar esta fuerza solo cabía modificar esa masa asociada al movimiento, pues la fuerza no deja de ser una masa por una aceleración.

Para garantizar que los ensayos se realizaban en iguales condiciones que los llevados a cabo con el *shaker*, la tuerca era exactamente la misma que la colocada sobre éste.

Esta caracterización del baffle soportando esa masa de 0.19 kg se realizó, además de con la aplicación del teléfono móvil y con el *script* creado en Matlab, con los dos equipos Arduino que se habían creado exprofeso para este TFG.

Debido a la inclusión de esa masa sobre el altavoz, en estas pruebas se incluyeron, además de los registros del desplazamiento que experimentaba el altavoz y la frecuencia de su movimiento, el correspondiente a la fuerza fruto de dicho movimiento. De este registro, al igual que se realizó en las mediciones con el *shaker*, se encargaba la célula de carga situada bajo el soporte en el que descansaba el altavoz. Todo el conjunto puede verse con total claridad en la Figura 19 y en la siguiente.

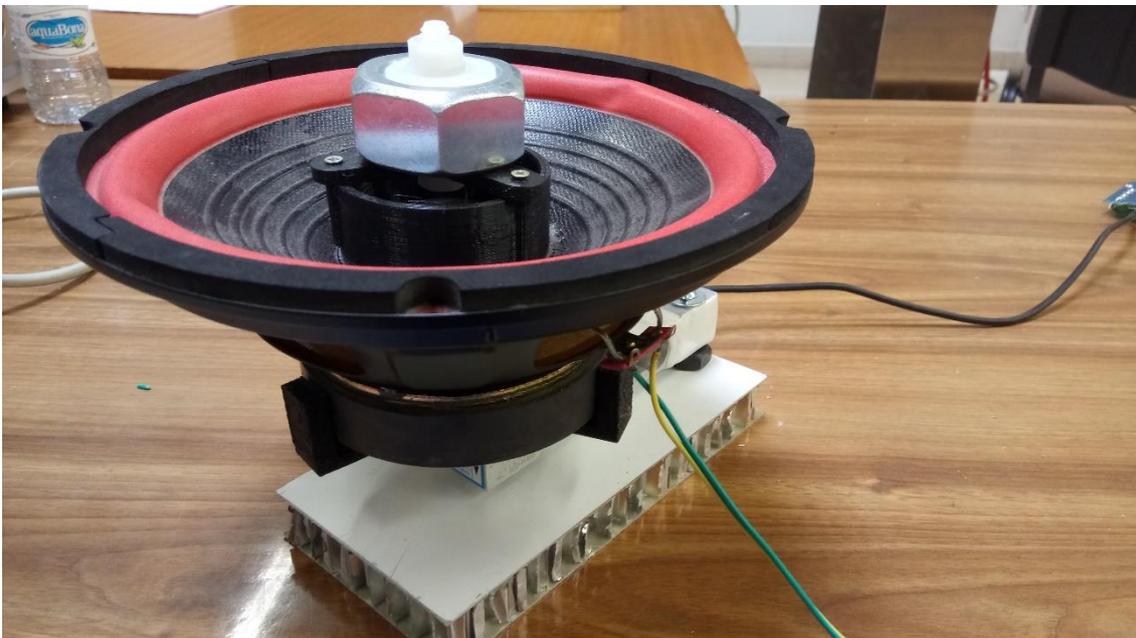


Figura 44. Detalle del altavoz sobre el soporte y la célula de carga.

5.2.1. Caracterización con masa a través de la aplicación móvil.

La forma de proceder en los siguientes ensayos realizados fue exactamente la misma que cuando sobre el altavoz no se tenía la tuerca. Se realizaron mediciones para distintos porcentajes de volumen de la señal de audio del teléfono en el rango de frecuencias comprendido entre los 2 y los 10 Hz. En base a los estudios previos que se habían realizado sin masa sobre el baffle, en los cuales pudo verse como para bajos porcentajes de volumen el altavoz en cualquiera de las frecuencias no presentaba un movimiento significativo, en este punto del TFG se decidió restringir el intervalo de la señal de audio en el que se iba a ensayar. Así se estableció un volumen mínimo del 46.66%.

Como puede verse en las Tablas 16 y 17, para los valores de entre 7 y 10 Hz, se ensayó también con el volumen al 93.33%, pues para el 100% el altavoz ya se movía de forma muy violenta, siendo prácticamente ingobernable, motivo por el cual se fijó el máximo de esa señal de audio en 93.33% tanto para 9 como para 10 Hz.

Decir también que, para las frecuencias comprendidas entre los 2 y los 6 Hz, ambas incluidas, no se realizaron mediciones para el 93.33% de volumen dado que las mediciones realizadas al 100% eran lo suficientemente estables como para considerarlas válidas.

		<i>Frecuencias (Hz)</i>								
<i>%Vol.</i>	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz	
46,66	0,09	0,09	0,11	0,17	0,22	0,25	0,34	0,52	0,78	
60	0,09	0,16	0,23	0,31	0,43	0,59	0,78	1,08	1,65	
80	0,14	0,31	0,47	0,72	0,97	1,25	1,92	2,34	3,82	
93,33	-	-	-	-	-	0,93	4,28	5,53	8,18	
100	0,41	1,02	1,45	2,38	4,76	4,53	6,20	-	-	

Tabla 16. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.

		<i>Frecuencias (Hz)</i>								
<i>% Vol.</i>	2 Hz	3Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz	
46,66%	-	0,01	0,02	0,05	0,10	0,22	0,30	0,53	1,04	
60%	-	0,02	0,04	0,10	0,26	0,56	0,75	1,16	2,26	
80%	0,01	0,03	0,09	0,23	0,87	1,67	2,45	2,69	5,53	
93,33%	-	-	-	-	-	5,83	6,44	7,07	13,33	
100%	0,02	0,10	0,49	1,76	6,46	9,35	11,56	-	-	

Tabla 17. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.

Para observar con más facilidad como a medida que la frecuencia era mayor se tenían registros cada vez menos nítidos en los porcentajes de volumen mayores tanto en la carrera como en la fuerza medida por la célula de carga, se muestran de la Figura 45 a la 48 las capturas de pantalla obtenidas para 2 Hz y el 46.66 y 100% del volumen y las de 6 Hz al 46.66 y 100%.

En la Figura 45 puede verse para 2 Hz y el 46.66% de volumen como, a pesar de que en el registro del movimiento que presentaba el altavoz se apreció con total claridad la onda reproducida, la célula de carga no contempló variaciones significativas en la fuerza debida a ese movimiento. Por esto en la Tabla 17 la casilla correspondiente al registro de la fuerza para esa frecuencia y el 46.66% de volumen aparece sin datos.

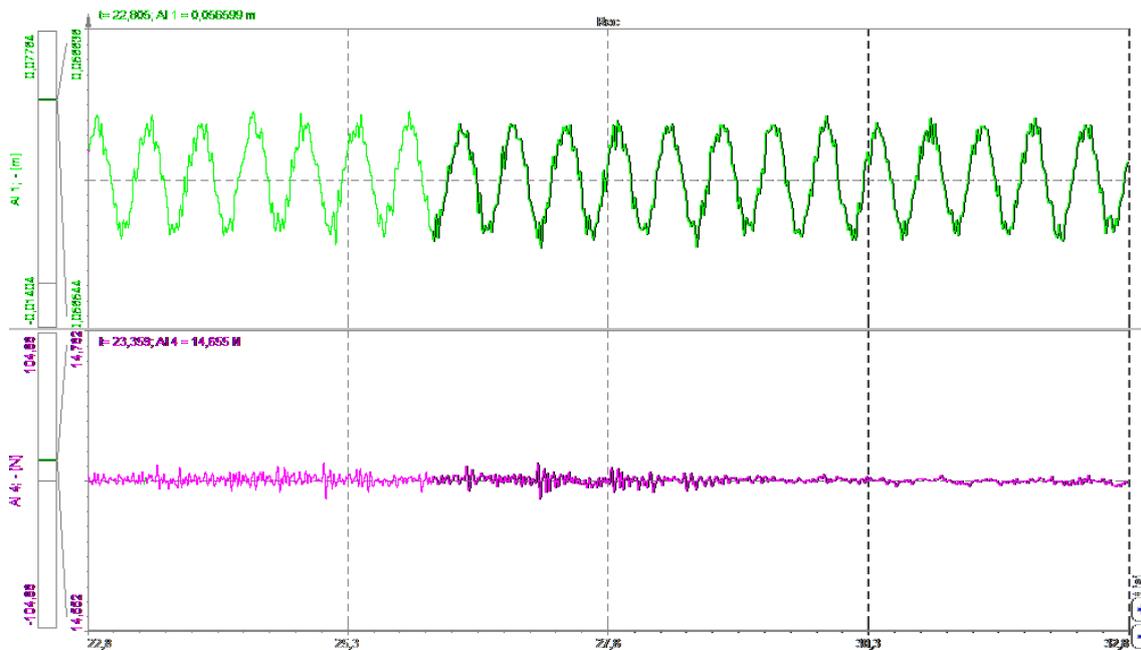


Figura 45. Registro para 2Hz y 46.66% de volumen. Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil..

En cambio, para la medida de 2Hz y el 100% de volumen que aparece en la Figura 46, ese registro de la fuerza, aunque leve, ya presenta un valor apreciable, por lo que en este caso sí se pudo recoger en la tabla de las fuerzas el valor correspondiente a esta medida.

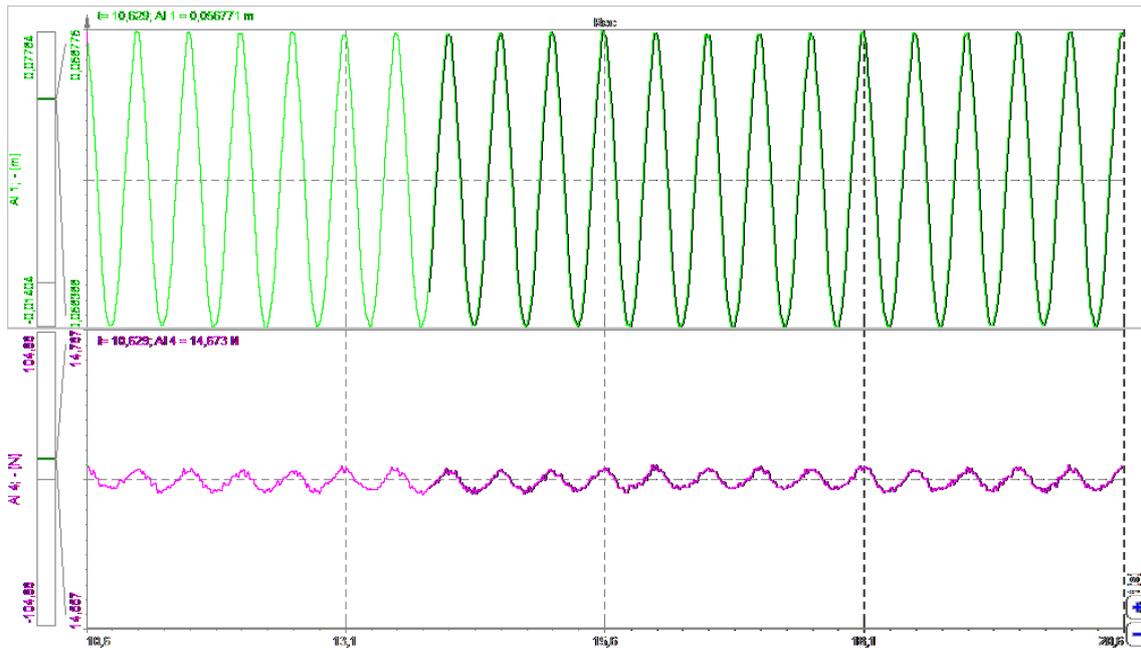


Figura 46. Registro para 2Hz y 100% de volumen. Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil..

Por otro lado se puede observar como para una frecuencia mayor, 6 Hz en el caso que se muestra en las Figuras 47 y 48, en todo momento la fuerza era lo suficientemente grande como para poder medirla. En la última de estas figuras se aprecia como la fuerza presentaba un registro mucho menos nítido que para el 46.66% de volumen, siendo para los porcentajes de volumen superiores dichas inestabilidades más acusadas cuanto mayor fuese la frecuencia seleccionada.

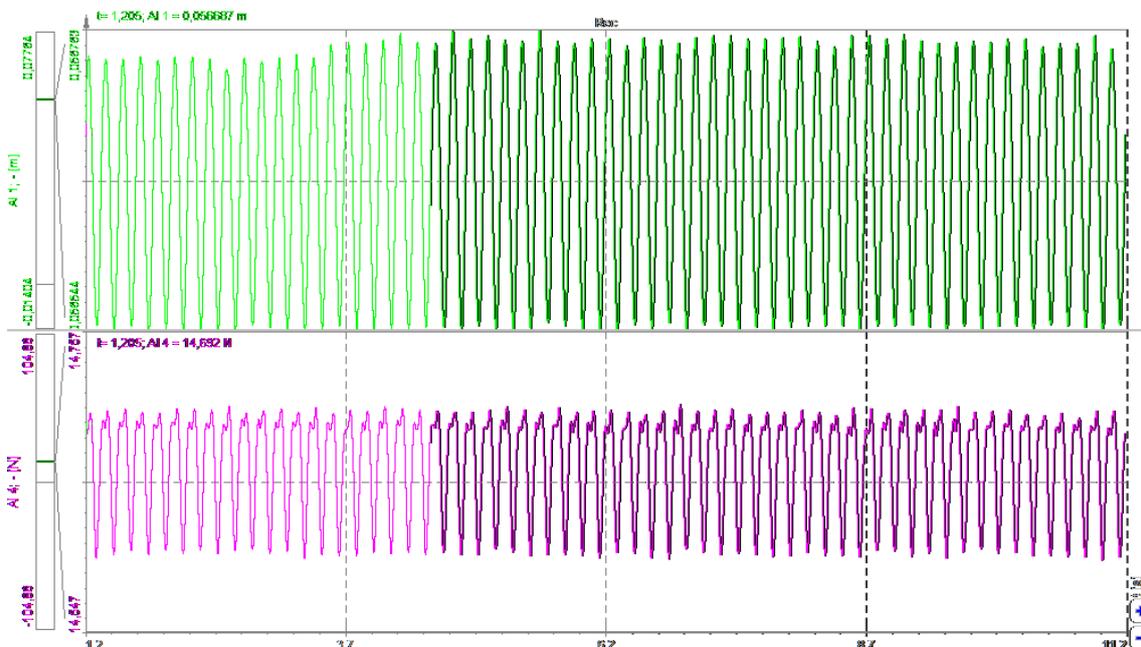


Figura 47. Registro para 6Hz y 46.66% de volumen. Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.

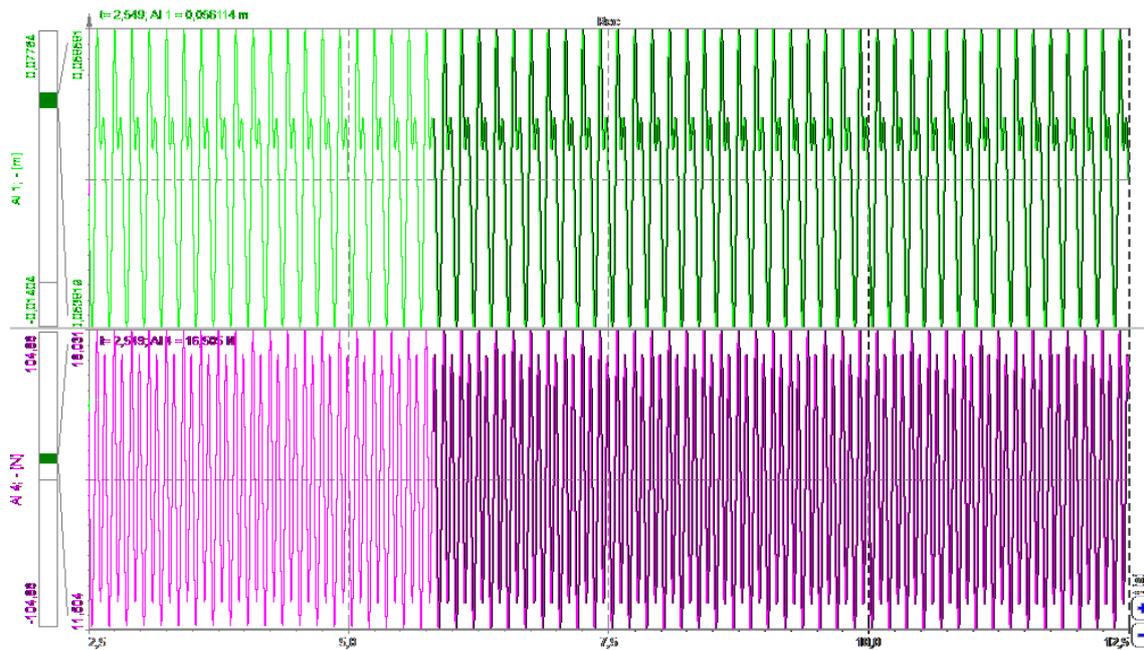


Figura 48. Registro para 6Hz y 100% de volumen. Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.

En la Figura 49 se ver cómo, a pesar de la incorporación de la masa sobre el altavoz, el aumento de la carrera seguía siendo totalmente lineal a medida que se aumentaba tanto la frecuencia como el porcentaje de volumen, igual que sucedía en las mediciones realizadas sin la tuerca. Tan sólo para 7 Hz al 93.33% de volumen se apreció un desplazamiento menor que en el anterior punto que se había ensayado (80%). Como se verá en las conclusiones descritas al final de este TFG, el altavoz no acusó la incorporación de la tuerca de igual forma a unas frecuencias que a otras.

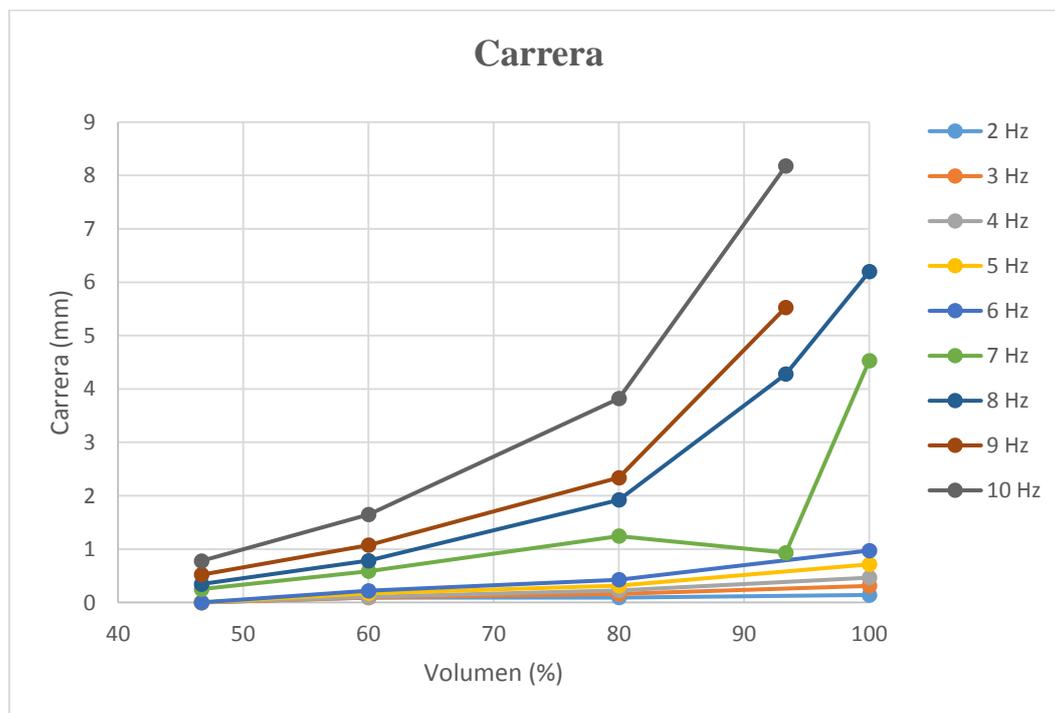


Figura 49. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.

Los registros de la célula de carga estaban en consonancia con los datos referentes al movimiento como se puede ver en la Figura 50. Ese valor de la fuerza para una frecuencia concreta aumentaba a medida que lo hacía el porcentaje de volumen seleccionado en el teléfono. También se apreciaba que para todos los porcentajes de volumen, cuánto mayor era la frecuencia mayor lo era también ese valor de la fuerza.

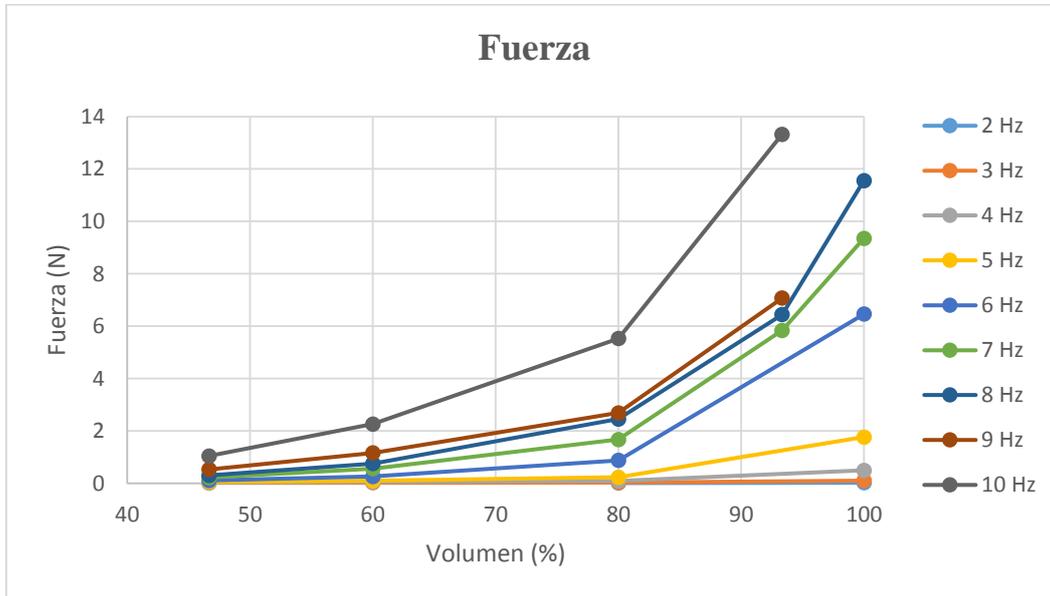


Figura 50. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.

Para cada una de las frecuencias ensayadas se efectuó uno registro de ésta junto al movimiento del altavoz para asegurar la correspondencia entre la frecuencia medida y la que se seleccionaba en la aplicación del teléfono móvil. En la Tabla 18 se muestran en la columna de la derecha los registros de la frecuencia realizados, correspondiéndose perfectamente estos valores con los de las frecuencias seleccionadas en la aplicación del móvil.

<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia medida</i>
2Hz	2,01
3Hz	3.00
4Hz	4.00
5Hz	5,01
6Hz	5,98
7Hz	6,99
8Hz	8.00
9Hz	9,00
10Hz	10,01

Tabla 18. Frecuencia (Hz). Altavoz con masa trabajando con la aplicación del móvil.

5.2.2. Caracterización con masa a través del *script* de Matlab.

Como en las mediciones llevadas a cabo en la caracterización del altavoz sin masa, en estas que se van a describir a continuación, se empleó el *script* de Matlab ya comentado y la misma forma de proceder.

Esto es, para frecuencias comprendidas entre los 2 y los 5 Hz se realizaron mediciones para valores de la variable *A* del *script* entre 0.1 y 0.45 (valores límite que, como ya se explicó, se habían obtenido de forma experimental al observar que entre dicho valores era cuando se tenía el comportamiento esperado tanto en el altavoz como en el *shaker*) con incrementos entre mediciones de 0.05. Como en las pruebas libres de masa, para 6 Hz sólo se pudo alcanzar una amplitud programada máxima de $A=0.3$, $A=0.15$ para 7 Hz y $A=0.05$ para las tres frecuencias superiores.

En estas mediciones, a pesar de contar con la masa de la tuerca sobre el altavoz, se observaron las mismas zonas de funcionamiento inestable en el baffle que cuando se ensayó sin esa masa extra, y las mismas que también se habían visto en el *shaker*. Recordar que en la Tabla 14 se recogían esos valores de la variable *A* para cada frecuencia en los cuales se presentaba el movimiento anómalo del altavoz.

Para ilustrar mejor dichas inestabilidades basta observar la diferencia entre los registros de la fuerza (de color morado) en las Figuras 51 y 52. En la primera de ellas, correspondiente a una zona sin inestabilidades para esa frecuencia ($f=3$ Hz y $A=0.30$) el registro de la fuerza, a pesar de los picos en la parte superior, fue limpio. Por el contrario, en el registro de una zona crítica, como lo era el correspondiente a esos 3 Hz y una amplitud de 0.25, no era nada nítido.

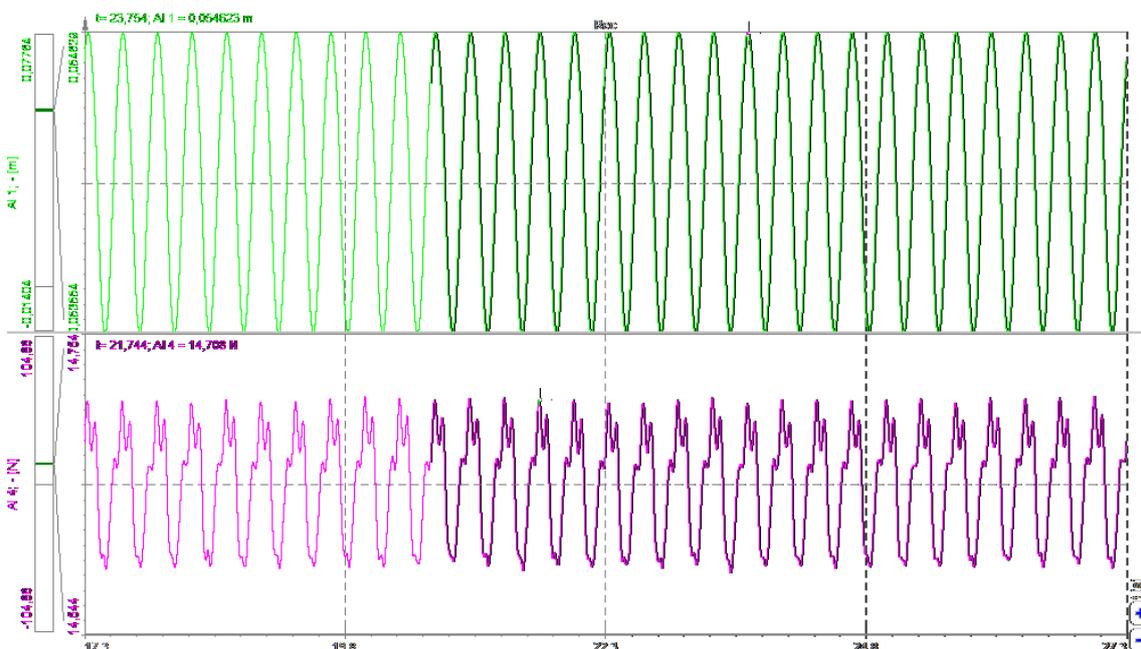


Figura 51. Registro para 3Hz y $A=0.3$. Altavoz con masa trabajando con Matlab.

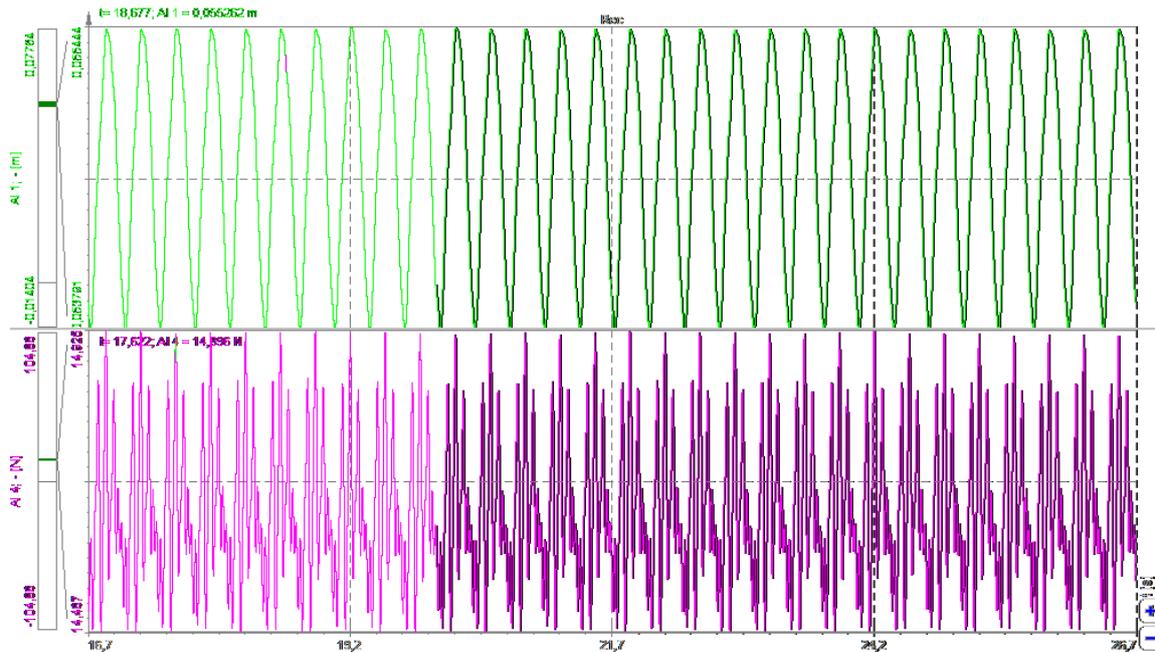


Figura 52. Registro para 3Hz y A=0.25. Altavoz con masa trabajando con Matlab.

Las Tablas 19 y 20 reflejan los valores de carrera que experimento el altavoz y la fuerza fruto de ese movimiento. Como en otros registros comentados, las casillas sin valores numéricos se corresponden con esos valores de la variable A o que estaban por encima del límite superior o en los cuales se tenían inestabilidades. También puede verse como para frecuencias superiores a 5 Hz el número de ensayos válidos que se podían realizar era cada vez menor, pudiendo para 8, 9 y 10 Hz tomar tan solo una medida.

Frecuencias (Hz).

Variable A	2Hz	3Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
0,05	-	-	-	-	-	3,94	6,86	6,19	9,27
0,1	0,26	0,69	1,65	4,14	5,27	6,07	-	-	-
0,15	0,31	1,11	2,17	5,54	7,26	8,29	-	-	-
0,2	0,47	1,35	3,70	5,57	-	-	-	-	-
0,25	-	1,65	-	-	-	-	-	-	-
0,3	-	1,08	2,50	4,57	7,40	-	-	-	-
0,35	0,47	1,23	2,83	5,01	-	-	-	-	-
0,4	0,42	1,35	3,14	5,52	-	-	-	-	-
0,45	0,52	1,56	3,15	5,76	-	-	-	-	-

Tabla 19. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con Matlab.

Como en los ensayos realizados sin masa, en los registros con ésta sobre el altavoz y el programa de Matlab, para todos los valores de esa variable A para los que se caracterizó el altavoz, cuanto mayor era la frecuencia mayor eran también el valor de la carrera en el movimiento del baffle (ver Figura 53) y las fuerzas registradas (Figura 54). Sólo se dio una excepción, en ambos casos, a la frecuencia de 8 Hz. Aquí el desplazamiento y la fuerza que se registró en el altavoz fueron superiores a los medidos a 9 Hz de frecuencia.

Frecuencias (Hz)

Variable A	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
0,05	-	-	-	-	-	7,02	13,22	8,79	14,77
0,1	0,02	0,08	0,55	4,23	7,46	11,51	-	-	-
0,15	0,02	0,12	0,99	4,31	10,02	15,51	-	-	-
0,2	0,03	0,15	2,28	4,23	0,00	-	-	-	-
0,25	-	0,45	-	-	-	-	-	-	-
0,3	-	0,12	1,04	4,74	10,63	-	-	-	-
0,35	0,02	0,14	1,29	5,06	-	-	-	-	-
0,4	0,03	0,17	1,61	4,58	-	-	-	-	-
0,45	0,03	0,21	1,93	4,38	-	-	-	-	-

Tabla 20. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con Matlab.

Puede verse en esas representaciones de la carrera medida en el altavoz y de la fuerza como, por lo general, para todas las frecuencias ensayadas los valores máximos de ambos registros se dieron para el valor superior de la variable A que se había podido alcanzar. Atendiendo a las Figuras 53 y 54 se observan dos excepciones a las siguientes frecuencias:

- 3Hz → el máximo se observó para una amplitud A=0.25 correspondiente, como se ve en la Tabla 14, a un valor de la variable A situado entre dos zonas críticas en el comportamiento del altavoz. Por lo que para esta frecuencia el máximo desplazamiento en el altavoz o la máxima fuerza era preferible considerarlo para una amplitud A=0.45.
- 4Hz → el máximo fue registrado para un valor de A=0.2, al igual que en las pruebas sin masa. En este caso si puede considerarse un punto aceptable porque para una frecuencia de 4 Hz y una amplitud A=0.20 el comportamiento del altavoz era totalmente estable.

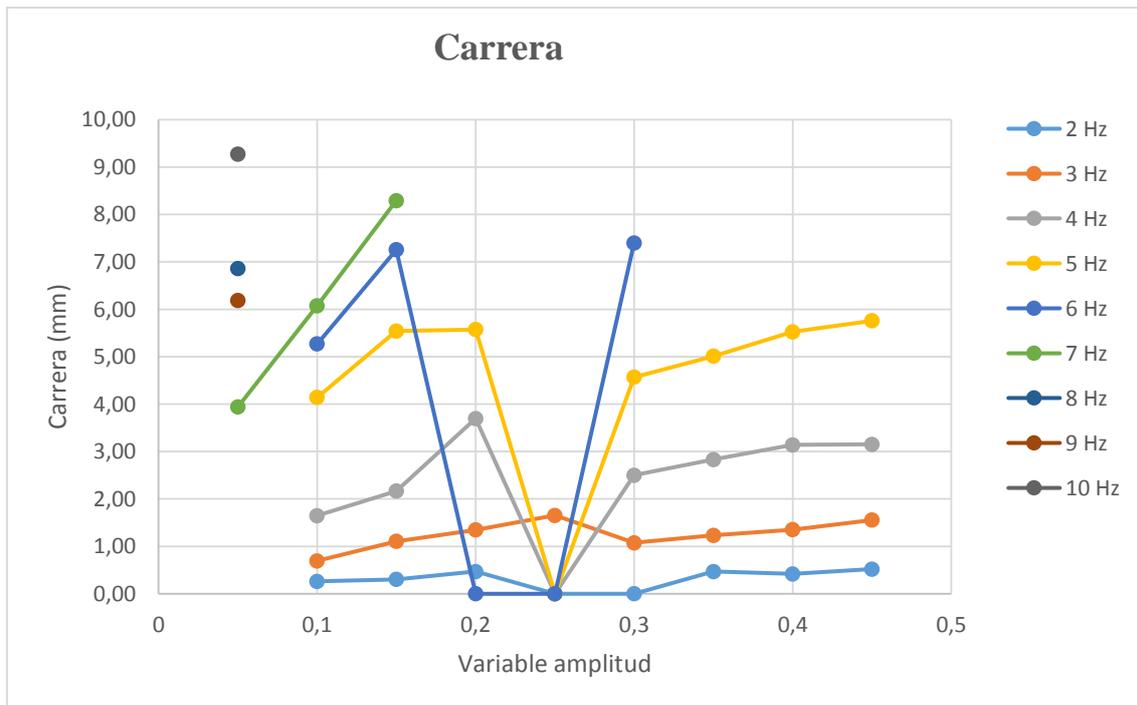


Figura 53. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con Matlab.

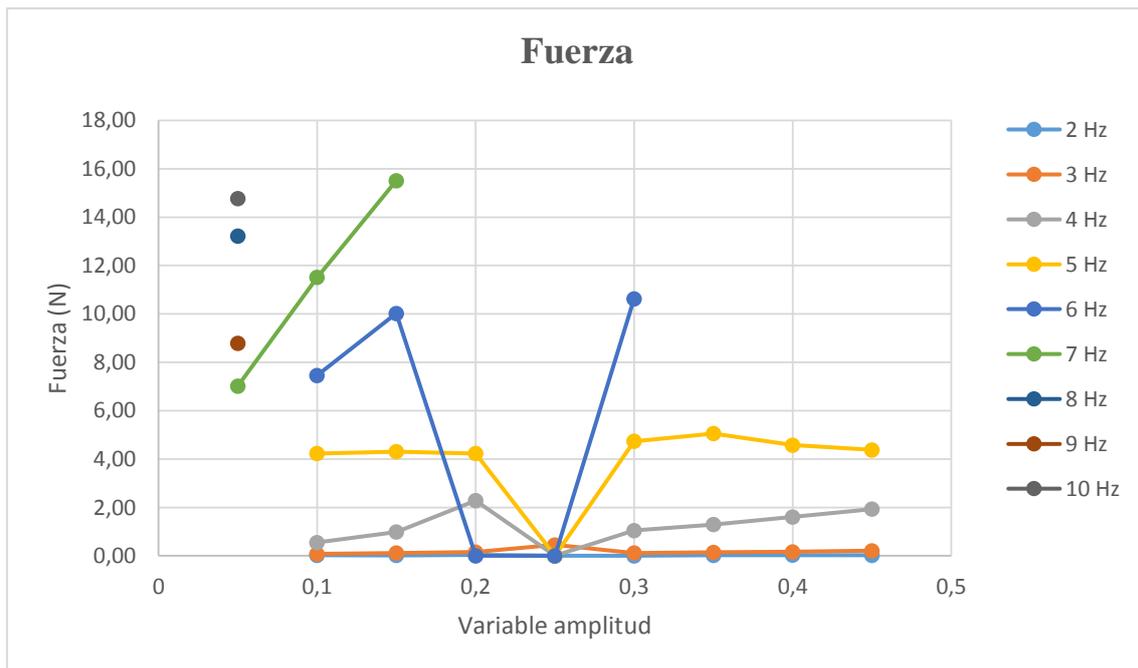


Figura 54. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con Matlab.

En la Tabla 21 se recogen los resultados de los registros de la frecuencia que se tomaron para asegurar que los valores que se habían programado de la frecuencia (columna “Frecuencia” en la Tabla 21) se correspondían con los medidos por el equipo Sirius (“Frecuencia medida”).

<i>Frecuencia</i>	<i>Frecuencia medida</i>
2Hz	1,98
3Hz	2,99
4Hz	4,00
5Hz	5,01
6Hz	6,01
7Hz	6,99
8Hz	8,00
9Hz	9,00
10Hz	10,01

Tabla 21. Frecuencia (Hz). Altavoz con masa trabajando con Matlab.

5.2.3. Caracterización con masa a través de Arduino.

En el último punto de la caracterización del altavoz se llevaron a cabo unas pruebas haciendo funcionar ahora éste con los dos equipos Arduino que se crearon expreso.

En las pruebas realizadas durante la creación y configuración de dichos Arduinos, se comprobó que, tras los ajustes llevados a cabo en el software de las dos placas, las frecuencias mostradas en la pantalla LCD asociada al Arduino UNO eran finalmente las que se tenían en realidad. Teniendo total certeza de que se cumplía dicha igualdad con las frecuencias, se procedió a realizar la caracterización del altavoz con el conjunto de Arduinos.

Se realizaron mediciones a frecuencias comprendidas entre los 2 y los 10 Hz variando el porcentaje de amplitud con el segundo potenciómetro. Recordar que los valores tanto de la frecuencia como de la amplitud de la onda se podían observar en la pantalla LCD conectada al Arduino UNO. Los porcentajes de amplitud con los que se ensayó fueron del 20, 40, 50, 60, 80 y 100%, buscando mostrar la evolución tanto del movimiento del altavoz como de la fuerza que debido a éste se generaba de la mejor forma posible.

En todas las frecuencias ensayadas, salvo para la de 10 Hz, pudieron realizarse los ensayos a todos esos porcentajes de amplitud mencionados. Para la frecuencia mayor, cuando se pretendió ensayar con el potenciómetro correspondiente a la amplitud tarado al 80 y 100%, el altavoz se movía con gran virulencia, llegando incluso a botar sobre el soporte. Por este motivo los registros tanto del movimiento como de la fuerza aparecen sin valores en las Tablas 22 y 23 para el 80 y el 100% de la amplitud.

		<i>Frecuencias (Hz)</i>								
<i>% Ampli.</i>	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz	
20	0,11	0,19	0,26	0,38	0,62	0,79	1,20	1,67	2,78	
40	0,17	0,33	0,56	0,83	1,45	2,11	2,71	5,08	7,37	
50	0,21	0,38	0,69	1,05	2,16	2,57	3,56	7,05	10,07	
60	0,24	0,49	0,81	1,13	3,25	3,82	4,94	8,98	11,76	
80	0,34	0,77	1,28	2,25	5,43	5,54	7,54	11,49	-	
100	1,13	1,37	1,74	3,43	6,18	6,70	9,37	12,86	-	

Tabla 22. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con Arduino.

		<i>Frecuencias (Hz)</i>								
<i>%Ampli.</i>	2Hz	3Hz	4Hz	5Hz	6Hz	7Hz	8Hz	9Hz	10Hz	
20	0,16	0,21	0,18	0,21	0,56	0,55	1,19	2,15	5,74	
40	0,32	0,35	0,33	0,53	1,37	2,94	4,79	12,85	19,03	
50	0,38	0,45	0,60	0,72	2,71	5,26	8,11	18,43	25,48	
60	0,46	0,59	0,57	0,87	5,28	7,69	12,52	23,42	28,78	
80	0,61	0,77	1,28	2,51	12,14	12,12	16,61	27,09	-	
100	1,38	2,06	1,54	5,14	12,34	13,19	19,59	27,14	-	

Tabla 23. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con Arduino.

Como puede verse en la siguiente figura, sin excepción alguna en este caso, para todas las frecuencias ensayadas cuanto mayor era el porcentaje de amplitud que se seleccionaba en el potenciómetro correspondiente también lo era la carrera que presentaba el movimiento del altavoz. Además, para cualquier valor del porcentaje de la amplitud, ese valor del desplazamiento del baffle era superior cuanto mayor lo fuese la frecuencia.

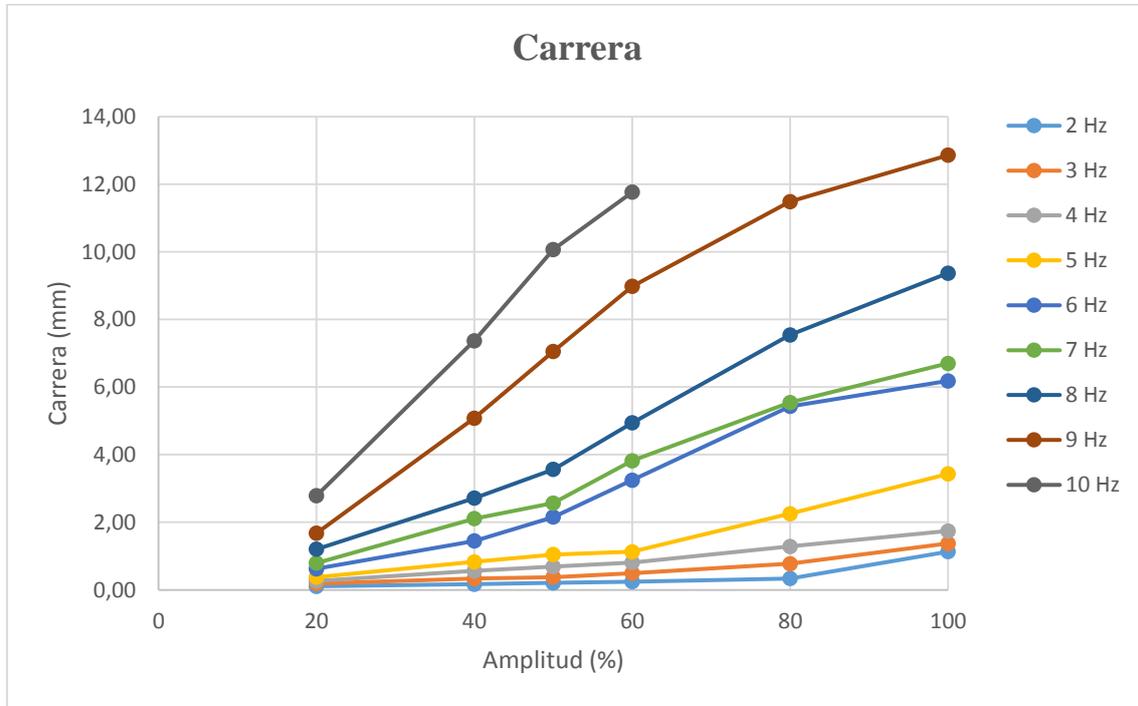


Figura 55. Carrera (mm). Altavoz con masa trabajando con Arduino.

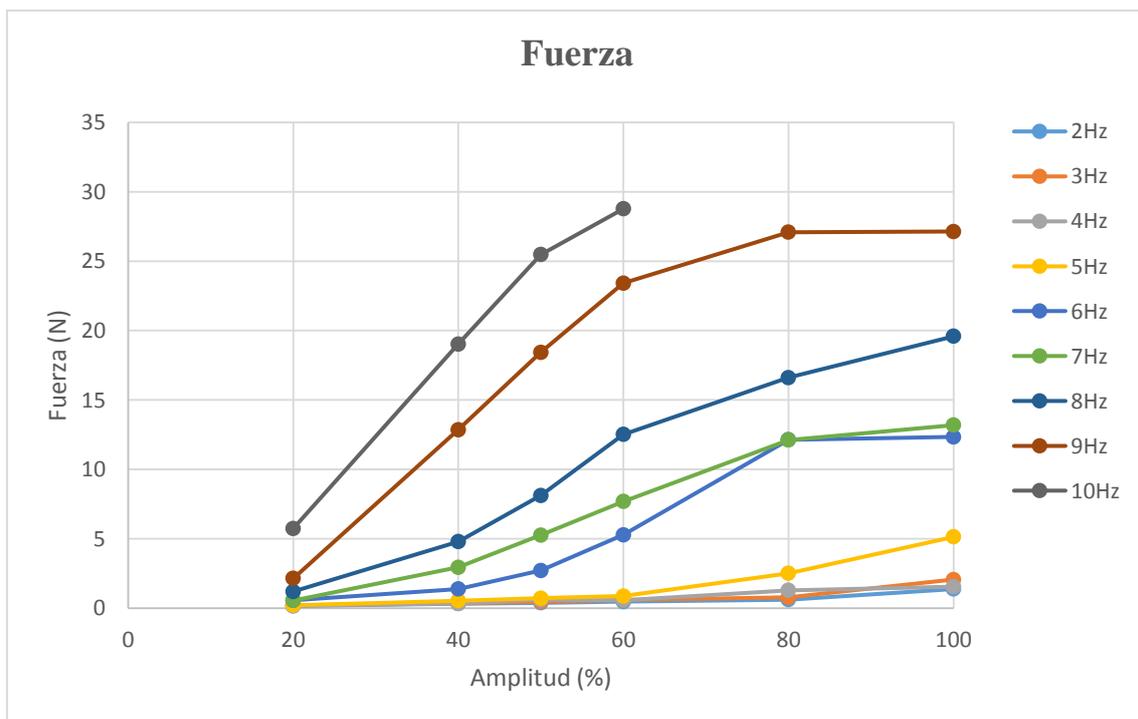


Figura 56. Fuerza (N). Altavoz con masa trabajando con Arduino.

En lo referente a las fuerzas registradas, sucedía exactamente lo mismo. Para las tres frecuencias menores (2, 3 y 4 Hz) apenas se apreciaron diferencias en todos los porcentajes de amplitud ensayados. Para 5 Hz esta fuerza, sobre todo para el 80 y 100% de la amplitud, presentó cierto aumento, el cual se certificó para 6 Hz cuando esa fuerza prácticamente se triplicó en todo el rango de amplitudes a las que se ensayaba respecto de los datos de las tres frecuencias menores.

Como en los registros de la carrera, en la Figura 56 también se puede ver como el mayor valor de la fuerza se obtenía, para todas las frecuencias, con el potenciómetro de la amplitud al 100% (salvo para 10 Hz cuando, como ya se dijo, el valor máximo aceptable fue del 60% debido a los golpes que se daban en el altavoz con la amplitud al 80 y 100%)

Además de los registros del láser y de la célula de carga, en todas las pruebas realizadas se incluía la medida la frecuencia que presentaba el movimiento del altavoz. De esta forma se aseguraba la correspondencia entre la frecuencia que se estaba generando (la cual podía leerse en la pantalla LCD) y la que en realidad el movimiento del altavoz presentaba. En la Tabla 24 puede verse como para todos los ensayos realizados la frecuencia que se registraba con el equipo Sirius era exactamente aquella, con muy poca diferencia en todos los casos, que se seleccionaba con el potenciómetro correspondiente.

Frecuencias (Hz) para diferentes frecuencias y amplitudes.

<i>Amplitud\F</i>	2Hz	3Hz	4Hz	5Hz	6Hz	7Hz	8Hz	9Hz	10Hz
20%	-	-	3,94	4,94	5,95	6,93	8,00	9,09	10,10
40%	-	2,90	3,94	4,94	5,95	6,93	8,00	9,09	10,10
50%	-	2,90	3,94	4,94	5,95	6,93	8,00	9,09	10,10
60%	1,95	2,87	3,94	4,94	5,95	6,93	8,00	9,09	10,10
80%	1,95	2,87	3,94	4,94	5,95	6,93	8,00	9,09	10,10
100%	1,95	2,87	3,94	4,94	5,95	6,93	8,00	9,09	10,10

Tabla 24. Frecuencia (Hz). Altavoz con masa trabajando con Arduino.

En ese registro de la frecuencia también se reflejaba como cuando el potenciómetro de la amplitud llegaba a su máximo (al 100%) aparecían armónicos (el 1° y hasta el 2° armónico) de la frecuencia que en ese momento se tenía. Esto se puede ver en la Figura 58, donde en el registro de la FFT (parte inferior de la imagen) se puede apreciar tres frecuencias: a 6.93 Hz (correspondiente a los 7 Hz seleccionados), 14 Hz (su primer armónico) y 21 Hz (el segundo armónico).

La Figura 57 correspondía al ensayo de 7 Hz y un 50% de amplitud y en ella no se reflejaron esos armónicos, pues ya se dijo que de aparecer lo hacían cuando la amplitud se encontraba prácticamente al 100%. Entre estas dos imágenes puede observarse también como el aumento del porcentaje de la amplitud llevaba asociado un registro menos nítido, sobre todo en el caso de la fuerza que captaba la célula de carga, fruto de esas inestabilidades presentes en los porcentajes superiores de la amplitud.

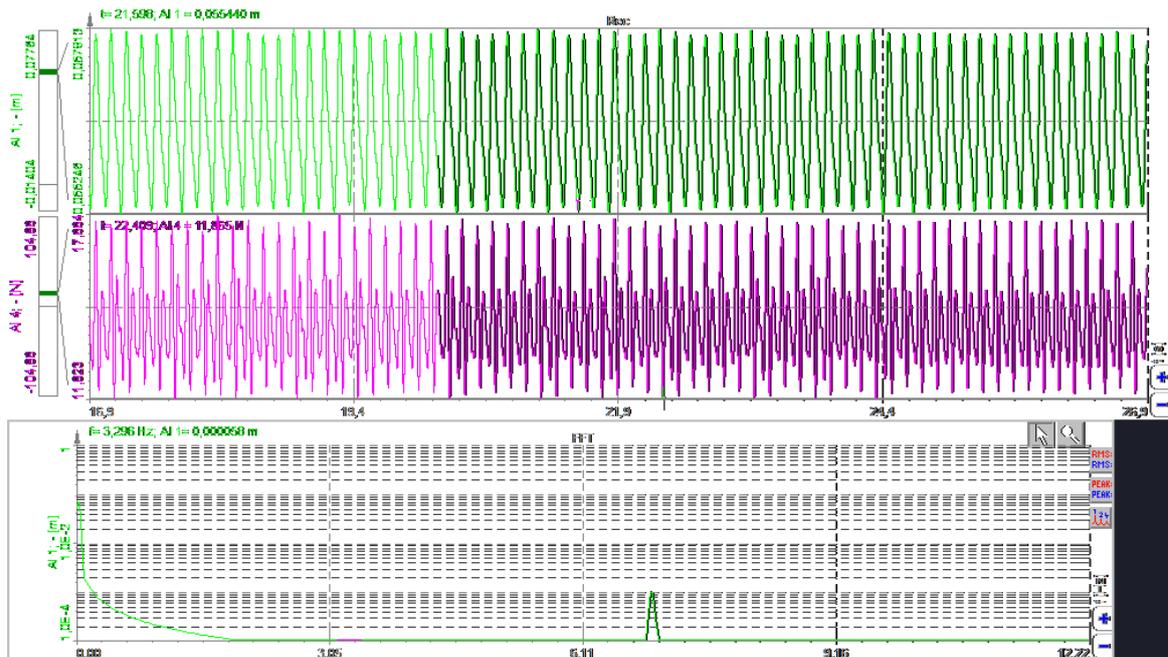


Figura 57. Registro a 7 Hz y 50% de amplitud. Altavoz con masa trabajando con Arduino.

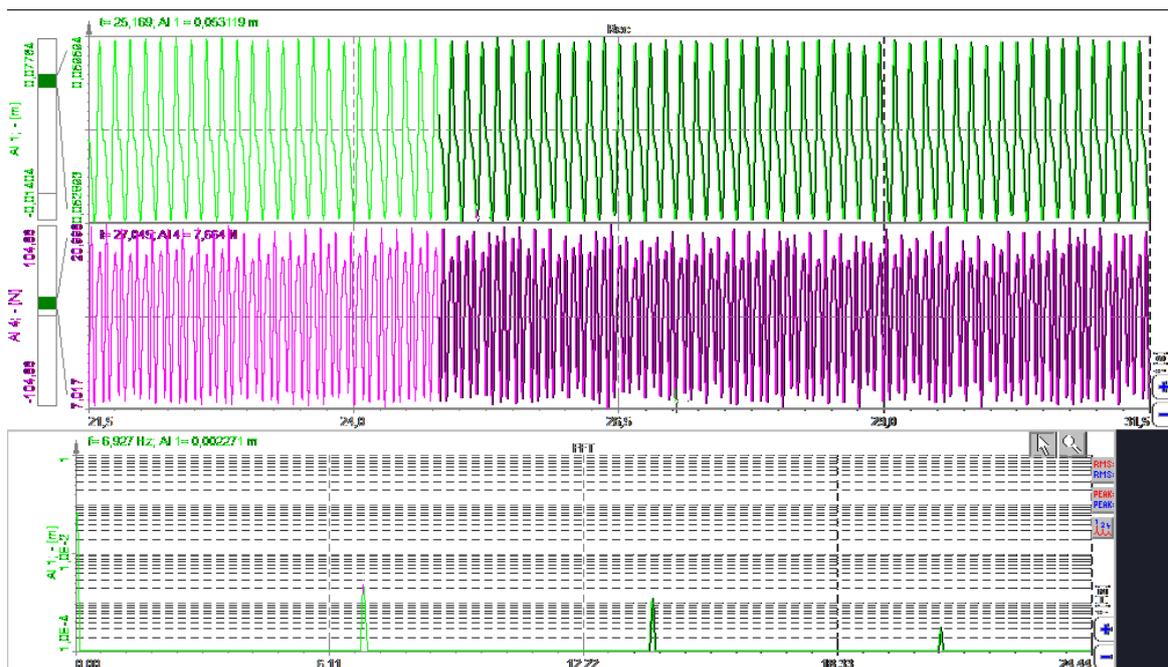


Figura 58. Registro a 7 Hz y 100% de amplitud. Altavoz con masa trabajando con Arduino.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

6. Caracterización de la viga con el equipo Arduino.

Como ya se dijo, el objetivo de este TFG era la caracterización electromecánica de un altavoz para comprobar su posible valía de cara a emplearse como un *shaker low cost*. Con todas las pruebas descritas hasta este momento, se podía decir que, sin llegar al grado de exactitud que tienen los equipos diseñados para tal fin, el altavoz podía ser esa alternativa barata a los *shakers* que se buscaba.

Llegados a este punto, se decidió instalar el altavoz sobre una de las vigas presentes en el laboratorio y ver como ésta respondía cuando se generaba la onda senoidal con el equipo Arduino que se creó para este TFG. Se pretendía así ver un caso práctico en el que ver de forma directa la influencia de ese movimiento del altavoz sobre una estructura real. Más concretamente, se planteó el objeto de estimar las propiedades modales de la estructura mediante técnicas de análisis modal. La filosofía era sencilla: realizando un barrido en frecuencias en la excitación en un punto y midiendo la respuesta en una serie de ellos, era posible obtener las curvas de respuesta en frecuencia que informaban, simultáneamente, de las frecuencias y los modos propios de la estructura.

La viga sobre la que se llevaron a cabo los ensayos tenía 6 m de largo y se encontraba biapoyada. Este dato tiene su relevancia pues, sin entrar en muchos detalles, según las condiciones de contorno que se tuvieran en la viga, la forma de sus modos propios sería una u otra.

En este caso, al estar biapoyada, los tres modos obtenidos tendrían la siguiente forma:

- Primer modo → presentaría una sola cresta, en torno al punto medio de la viga (si la distribución de masas respecto a ese punto medio fuese totalmente simétrica, el pico de la cresta estaría exactamente en el punto medio), esto es a 3 m ($L/2$, siendo L la longitud total de la viga).
- Segundo modo → tendría un nodo de vibración intermedio cerca del punto medio, apareciendo por ello dos crestas, una positiva y otra negativa, a $L/4$ y a $3L/4$, esto es a 1.5 y 4.5 m del extremo izquierdo de la Figura 60.
- Tercer modo → tendría dos nodos de vibración intermedios y por ello tres crestas de signos alternos. Las posiciones de las crestas en este tercer modo eran: $L/6=1$ m, $L/2=3$ m y $5L/6=5$ m.

Para poder comprender mejor esos puntos donde se tenían las crestas de los tres modos lo mejor es observar la Figura 59. En esta se pueden ver de forma teórica los tres modos propios correspondientes a una viga biapoyada como la que se tenía en el laboratorio.

En base a esos puntos donde se tenían las crestas de los distintos modos para esta viga biapoyada, se colocaron los acelerómetros con los que se iba a ensayar. Así se determinaba la aceleración a 1, 1.5, 3, 4.5 y 5 m desde uno de los extremos de la viga, exactamente en los puntos donde se tenían esas crestas.

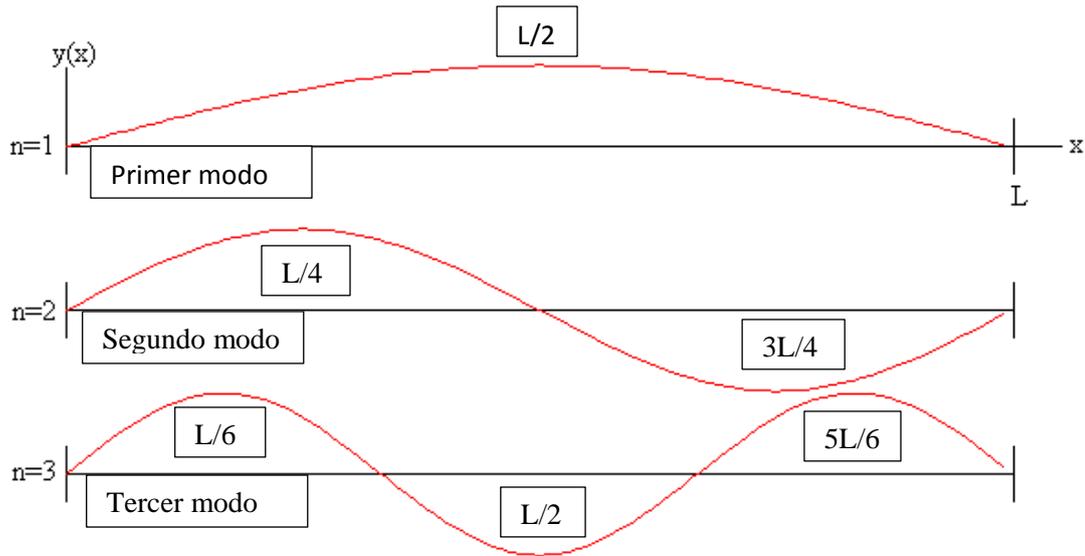


Figura 59. Modos propios de una viga biapoyada.

Por su parte el altavoz se colocó a $3L/4$, es decir a 4.5 m del extremo izquierdo de la viga que se puede ver en la Figura 60, vientre del segundo modo y un lugar que no era nodo de vibración de ninguno de los otros dos. Como control del altavoz se empleó el equipo que más potencia inyectaba al altavoz, las placas Arduino, que, además de ser un sistema completamente autónomo, proporcionaba información precisa de las frecuencias por las que se pasaba a lo largo del ensayo.

En la Figura 60 no se aprecian los acelerómetros colocados en los puntos descritos porque estaban situados en la parte inferior de la viga. Por otra parte, el acelerómetro que medía la variación de la velocidad del altavoz, aunque no se aprecia en la figura, estaba situado sobre el bafle (en el plano visible de todo el conjunto).



Figura 60. Viga sobre la que se ensayó.

La viga contenía además en su punto medio un dispositivo de mitigación de vibraciones: un amortiguador de masas sintonizado (TMD). Éste se encontraba instalado y optimizado gracias a otros trabajos previos que se habían realizado sobre esta viga. A continuación se verá como mediante el uso del altavoz como *shaker* fue posible estimar los cambios que introducía este TMD, al tenerlo activo o no mediante el desbloqueo o bloqueo de alguna de sus partes, en las funciones de respuesta en frecuencia

En la primera de las pruebas el TMD presente en el centro de la viga se encontraba bloqueado. Esto se consiguió colocando dos cintas en sus extremos, como se puede ver en la Figura 61, impidiendo así que la masa presente en el TMD oscilase y llevara a cabo su función.



Figura 61. TMD instalado en la viga (anulado en la imagen).

Se realizó un barrido en frecuencia, partiendo de los 1.93 Hz que ésta podía tener como valor mínimo en el equipo de Arduino programado. Ese valor se fue aumentando de forma lenta, constante y uniforme hasta alcanzar los 10 Hz que se tenían como máximo. A continuación, sin detener el experimento, se procedió de manera inversa hasta volver a llegar a esos 1.93 Hz de frecuencia mínima. De esta forma, y gracias al software de adquisición y post-procesado Dewesoft X2®, integrado en el equipo Sirius, se pudo obtener la curva de respuesta en frecuencia que se puede ver en la Figura 63, la cual correspondía a la FRF entre el acelerómetro situado en $L/2$ y el que registraba la fuerza del movimiento en el altavoz (situado a $3L/4$), y los modos propios mostrados en la Figura 62. Como se aprecia en la figura que reflejaba la FRF, aparecieron las correspondientes crestas a las frecuencias naturales del sistema, a 3.36, 12.7 y 29.6 Hz

Al comparar los gráficos de los modos obtenidos con el software del equipo Sirius (Figura 62) con la representación teórica y exacta mostrada en la Figura 59, se pueden observar leves diferencias. Éstas se debieron principalmente a la presencia del TMD en la viga y a la distribución no simétrica de las masas incorporadas sobre la viga ensayada.

La masa de la viga era de aproximadamente 6 kg y sobre ella se añadió el altavoz con la tuerca (que sumaban unos 1.4 kg) y los seis acelerómetros (0.1 kg cada uno). Esto suponía un incremento cercano a los 2 kg, lo que representaba aproximadamente el 33% de la masa de la viga, por lo que la variación no era para nada despreciable. Esto, unido como ya se indicó a que esa distribución de la masa no fue simétrica respecto del centro de la viga justificaba las diferencias existentes entre los modos propios de la viga biapoyada teóricos y los obtenidos realmente en la prueba realizada.

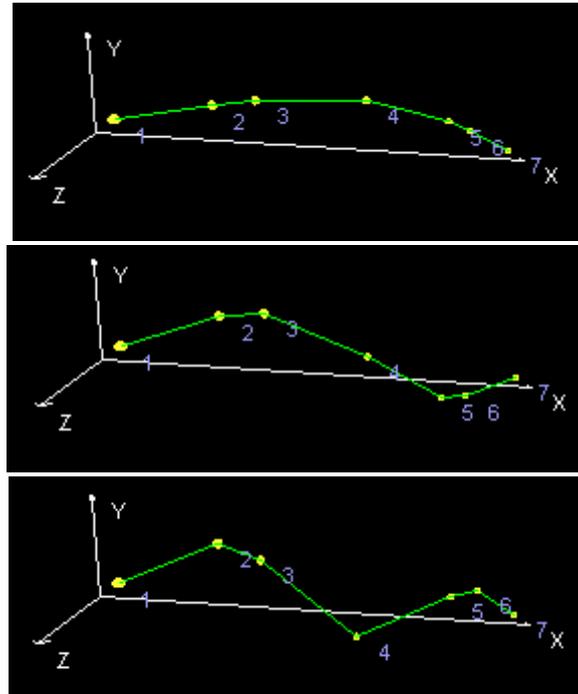


Figura 62. Modos propios de la viga biapoyada calculados.

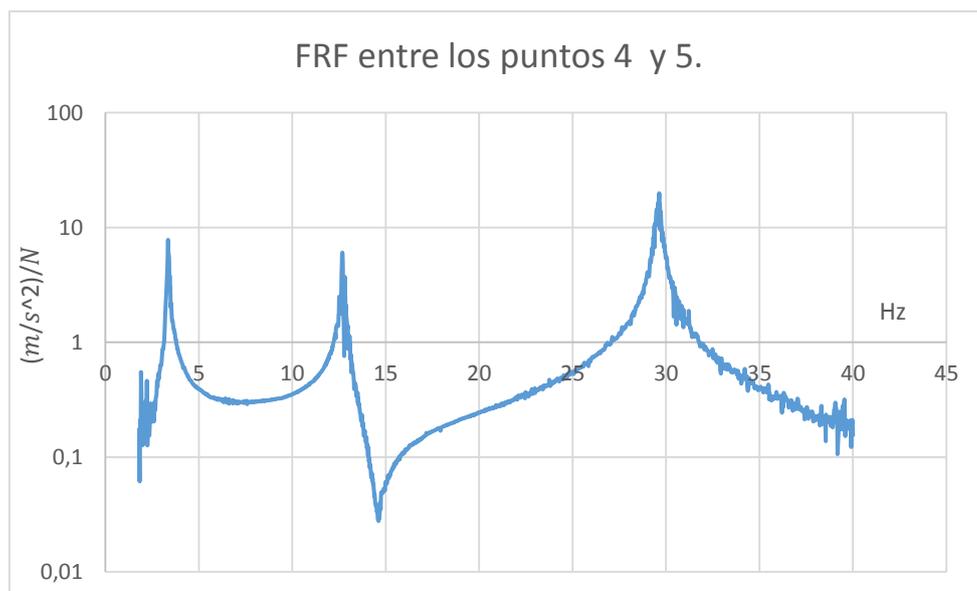


Figura 63. FRF de la estructura sin TMD.

En la segunda prueba, se realizó el mismo barrido entre 1.93 y 10 Hz, pero ahora con el TMD libre. Esto se consiguió liberando el extremo en el que se situaba la masa oscilante, el derecho en la Figura 64, de la cinta que impedía que se moviera libremente. Al eliminar dicha cinta y liberar las tuercas situadas en el extremo del TMD se estaba variando la masa estructural. Para evitar este cambio en las condiciones del ensayo se añadieron las tuercas que se aprecian en la parte inferior de la Figura 64, que en su conjunto sumaban exactamente la misma masa que la liberada en el extremo del TMD.



Figura 64. TMD libre.

En las curvas FRF obtenidas, una de ellas mostrada en la Figura 65, se apreciaba el desdoble típico fruto a la inclusión de un TMD en una estructura. Por supuesto, el TMD no se encontraba perfectamente sintonizado, pero lo importante era que quedaba demostrada la bondad del sistema de excitación y cómo se había logrado obtener de forma nítida las FRF del sistema empleando el *shaker low cost* creado en este TFG.

Las frecuencias naturales del sistema en este caso fueron de 3.26, 3.69, 12.7 y 29.2 Hz. Por supuesto los modos propios de la estructura en este caso fueron prácticamente los mismos, teniendo el TMD muy poco efecto sobre ellos.

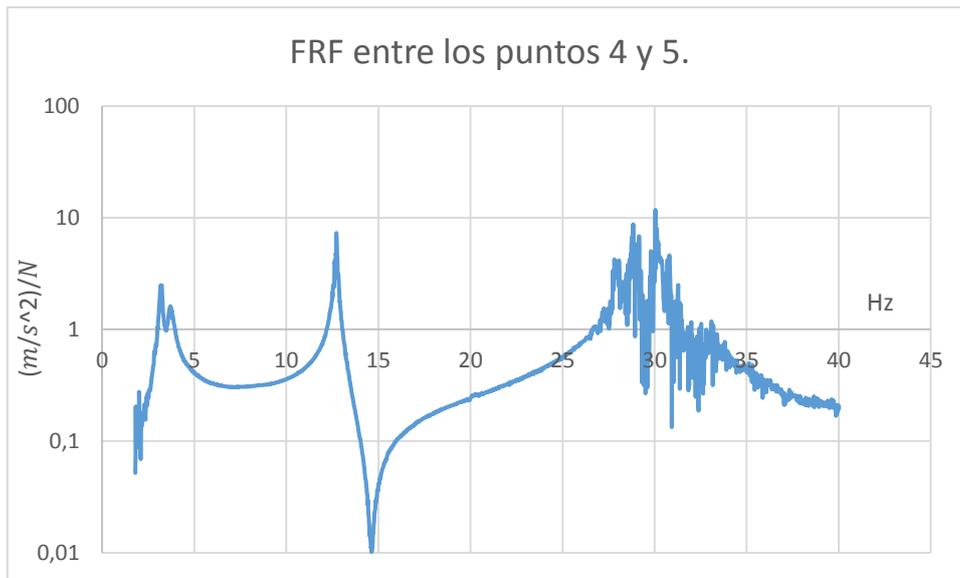


Figura 65. FRF de la estructura sin TMD.

7. Conclusiones y líneas futuras.

Conclusiones.

Como se ha podido ver a lo largo de todos los ensayos realizados, el altavoz presentó en todos ellos, independientemente de la forma que se eligiese para generar la onda senoidal, una frecuencia en su movimiento que se correspondía a aquella que se había elegido. Esto no viene sino a confirmar el buen funcionamiento de la aplicación que se seleccionó para trabajar con el teléfono móvil y el acierto en la creación del script de Matlab, los softwares de Arduino y las PCBs de éstos últimos.

A pesar de las zonas inestables que se encontraron cuando se generaba la onda con Matlab a determinados valores de la variable A con los que se ensayó (Tabla 14), tanto en el altavoz como en el *shaker* se observaron movimientos y fuerzas muy equivalentes, independientemente de la forma en que se generase la onda. Eso facilitaba el no tener que descartar ninguno de los tres métodos con los que se creaba el movimiento del bafle.

Es curioso observar que el altavoz no acusó de la misma manera la masa auxiliar de la tuerca para unas y otras frecuencias. Trabajando con la aplicación del móvil, para frecuencias entre los 2 y los 5 Hz, dicha masa siempre redujo el recorrido del movimiento del altavoz entre un 13.2% (para 2 Hz y una amplitud del 60%) y un 44.5% (a 4 Hz y el 46.6%), promediando una variación del -28.5%. Esto puede deberse a que el altavoz no está diseñado originalmente para trabajar a frecuencias tan bajas y la fuerza que el electroimán interno que ejerce sobre las partes móviles no es siempre suficiente como para vencer esa masa.

Carrera (mm) trabajando sin y con masa auxiliar sobre el altavoz.

<i>Volumen\F</i>	2 Hz (sin masa)	2 Hz	3 Hz (sin masa)	3 Hz	4 Hz (sin masa)	4 Hz
46,66%	0,09	0,09	0,12	0,09	0,19	0,11
60%	0,11	0,09	0,23	0,16	0,36	0,23
80%	0,20	0,139	0,45	0,311	0,72	0,466
93,33%	-	-	-	-	-	-
100%	0,59	0,409	1,34	1,018	2,14	1,445
<i>Volumen\F</i>	5 Hz (sin masa)	5 Hz	6 Hz (sin masa)	6 Hz	7 Hz (sin masa)	7 Hz
46,66%	0,26	0,17	0,32	0,22	0,40	0,25
60%	0,51	0,31	0,68	0,43	0,82	0,59
80%	1,04	0,716	1,34	0,972	1,67	1,245
93,33%	-	-	-	-	-	0,933
100%	2,97	2,38	3,70	4,762	4,37	4,528
<i>Volumen\F</i>	8 Hz (sin masa)	8 Hz	9 Hz (sin masa)	9 Hz	10 Hz (sin masa)	10 Hz
46,66%	0,47	0,34	0,54	0,52	0,27	0,78
60%	0,99	0,78	1,10	1,08	0,53	1,65
80%	1,97	1,922	2,24	2,337	1,12	3,821
93,33%	-	4,28	-	5,529	-	8,178
100%	4,86	6,199	5,43	-	3,07	-

Tabla 25. Carrera (mm) trabajando con y sin masa auxiliar. Altavoz trabajando con la aplicación del teléfono móvil.

Entre los 6 y los 8 Hz, ambos inclusive, ya se observaron algunas variaciones positivas. Es decir, con la masa el altavoz a ciertos porcentajes de volumen del teléfono registraba un desplazamiento mayor que los que se habían obtenido a ese mismo porcentaje sin la tuerca. En esas frecuencias las variaciones estuvieron entre un -37% (a 6 Hz y el 46.66% de volumen) y un +28.6% (para 6 Hz y el 100% de volumen), con un promedio del -14.9%.

Para 9 Hz se pudo ver como las diferencias entre el movimiento en el altavoz sin masa y el que se registró con la tuerca son prácticamente inapreciables, mientras que para la frecuencia mayor a la que se ensayó ya el cambio de tendencia es clarísimo. En todas y cada una de los ensayos realizados para 10 Hz se apreció un mayor recorrido en el movimiento del altavoz cuando tenía la masa sobre él que sin ella. El incremento medio observado, para amplitudes de entre el 46.66% y el 80% del volumen que podía dar el móvil, de +214%.

Resultados similares a estos se observaron cuando se ensayó el altavoz con el *script* de Matlab, obteniéndose en las frecuencias menores desplazamiento en el baffle cuando se añadía sobre él la masa de la tuerca y prácticamente dándose el doble de amplitud entre el punto superior e inferior para la frecuencia de 10 Hz.

También se pudo comprobar como en función de la forma con la que se generase la onda senoidal que el altavoz iba a reproducir, éste iba a tener un mayor o menor recorrido en su movimiento. Esto estaba relacionado con la tensión de salida que se tenía de la señal de audio que, como se vio en la Tabla 1, para el caso del teléfono móvil y el ordenador presentaban un valor máximo de tensión similar (en torno a 0.7 V), mientras que para el Arduino tenía unos valor máximo aproximado de 2.72 V. Observando la Tabla 26 se puede ver que, salvo alguna excepción, los valores máximos para todas las frecuencias se alcanzaron con el equipo Arduino y que los máximo obtenidos con la aplicación del móvil y el *script* de Matlab eran similares en la mayoría de las frecuencias.

Amplitudes máximas en los tres casos para las frecuencias ensayadas.

	2 Hz	3 Hz	4 Hz	5 Hz	6 Hz	7 Hz	8 Hz	9 Hz	10 Hz
<i>Aplicación</i>	0,41	1,02	1,45	2,38	4,76	4,53	6,20	5,53	8,18
<i>Matlab</i>	0,52	1,56	3,70	5,76	7,40	8,29	6,86	6,19	9,27
<i>Arduino</i>	1,13	1,37	1,74	3,43	6,18	6,70	9,37	12,86	11,76

Tabla 26. Carreras máximas (mm) en el altavoz para todos los modos de funcionamiento.



Líneas futuras.

Para la mejora de los equipos Arduino que se crearon para este TFG se pensó en varias soluciones:

- Buscar la eliminación del ruido eléctrico que se podía observar en el funcionamiento del altavoz cuando se generaba la onda senoidal con el Arduino DUE.
- La posibilidad de instalar junto con los potenciómetros botones para poder seleccionar de ambos modos tanto la frecuencia como la amplitud del movimiento. De esa forma se posibilitaría introducir valores exactos.
- Crear las *PCBs* como tales, evitando así el posible fallo de las placas ante pérdidas en el material soldado o ante el corte de los cables con los que cuentan las placas que crearon.
- Programación de otros tipos de onda (triangular, cuadrada o de sierra por ejemplo) y la configuración del método para seleccionar cual de dichas ondas se desea reproducir.
- Programación de un barrido en frecuencia (*chirp*) para tener la exactitud al realizar este que no se tiene cuando se hace de forma manual con los potenciómetros. En dicha configuración se tendría en cuenta la disminución que habría que realizar en el porcentaje de la amplitud de la onda a las frecuencias superiores para que no se generasen las inestabilidades que en esos momentos se producen.

En lo referente al *script* de Matlab también podrían darse algunos avances:

- Programar, como en Arduino, otros tipos de onda.
- Programar barridos automáticos también teniendo en cuenta aquellos valores de la variable *A* relacionada con la amplitud a los cuales se tienen inestabilidades o aquellos que marcan los límites tanto superiores como inferiores.
- Creación de pantallas emergentes en las cuales se pueda seleccionar la frecuencia y la amplitud sin necesidad de tener que escribir estas en el *script*.

La aplicación del teléfono no es un código abierto, así que sobre ella no se podrían realizar modificaciones. En caso de que se quieran tener otras prestaciones lo mejor será buscar otras aplicaciones o llegar a programar una aplicación propia, aunque para lo que se desea la aplicación elegida, *Function Generator*, cumplía sobradamente.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



8. Anexos.

A continuación se van a mostrar el script de Matlab y los softwares de las dos placas de Arduino.

8.1 Anexo A. *Script* de Matlab.

```
% Función seno.  
clear  
  
% Variables  
Tf = 10;           % Tiempo de ejecución total de la función(s)  
fs = 10000;      % "N° de puntos generados por unidad de  
tiempo (s)"  
f = 10;          % Frecuencia (Hz)  
T = 0:1/fs:Tf;  % Vector de tiempos (s)  
A = 10;         % Amplitud  
  
% Función seno  
%y = A*sin(2*pi*f*T);  
y=A*ones(1,length(T));  
%+0.3*sin(2*pi*1.5*f*T);  
sound(y,fs);
```



8.2 Anexo B. Software Arduino DUE.

Para la creación de los programas de Arduino, se empleó documentación de trabajos previos que encontraban disponibles en la red, gracias a que Arduino se basa en un código abierto y existen multitud de trabajos a los que se puede acceder gratuitamente.

```
#include "Waveforms.h"

#define oneHzSample 1000000/maxSamplesNum

volatile int wave0 = 0;

int i = 0;
int sample;
int Amplitud;

void setup() {
    analogWriteResolution(12); // Ajuste de la resolución de
    salida analógica a 12 bits (4096 valores)
    analogReadResolution(12); // Ajuste de la resolución de
    entrada analógica a 12 bits
}

void loop() {
    // Lee el potenciómetro y correlaciona el valor entre la
    muestra máxima y la mínima disponibles
    // 1.93 Hz es la frecuencia mínima de la onda
    // 10 Hz es la frecuencia máxima de la onda.
    sample = map(analogRead(A0), 0, 4095*1., oneHzSample*0.07,
    oneHzSample*0.5);

    // Salida Jack altavoz
    Amplitud = analogRead(A1);
    analogWrite(DAC1, (Amplitud/4095.0)*
    waveformsTable[wave0][i]); // Escribe la forma de la onda
    seleccionada en el DAC1

    i++;
    if(i == maxSamplesNum) // Reestablece el contador para
    repetir la onda.
        i = 0;
    delayMicroseconds(sample); // Mantiene el valor de
    muestra para el tiempo de muestreo
}
```



8.3 Anexo C. Software Arduino UNO.

```
#include <Wire.h>
#include <LCD.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#define I2C_ADDR 0x3F //Variable con la dirección de
nuestro display, la 0x3F. Ese 0x significa que es
hexadecimal, no decimal.

int PinPot = A0;
int PinPot2 = A1;
int Frecuencia;
int Frec;
int Amplitud;
int Ampli;
float Amplitud2;
float Frecuencia2;
//Dirección del dir del display y números que indican los
pines que debe usar la librería del display. Copiarlo tal
cual.
LiquidCrystal_I2C lcd (I2C_ADDR,2, 1, 0, 4, 5, 6, 7);

void setup() {
  // Código de configuración, se ejecuta una vez:

  lcd.begin (20,4); //Inicializa el display con 16
caracteres y 2 líneas
  lcd.setBacklightPin(3,POSITIVE);
  lcd.setBacklight(HIGH);

  analogReference(EXTERNAL);
  //Frec = analogRead(PinPot);
  //Frecuencia = map(Frec,0,1023,1001,195);
  lcd.home();
  lcd.print("Frecuencia:"); //Lo que escribe en la
primera línea
  lcd.setCursor (0,1);
  //lcd.print(Frecuencia/100.0,2); //Entrada del valor de
la frecuencia (potenciómetro derecho)
  //lcd.setCursor (0,2); //Para ir a la segunda línea
  lcd.print("Amplitud:"); //Lo que escribe en la segunda
línea
  //lcd.setCursor (0,3);
  // lcd.print(""); //Entrada del valor de la amplitud
(potenciómetro izquierdo)
```



```
}  
  
void loop() {  
  // Código principal que se ejecuta repetidamente:  
  
  Frec = analogRead(PinPot);  
  
  Frecuencia2 = 0.001307*exp(0.8226*(10.01-  
8.06*Frec/1023.0)) + 1.516*exp(0.1209*(10.01-  
8.06*Frec/1023.0));  
  Ampli = analogRead(PinPot2);  
  Amplitud2 = (Ampli/1023.0)*100.0;  
  lcd.setCursor (12,0);  
  lcd.print(Frecuencia2,2);  
  lcd.print("  ");  
  lcd.setCursor (10,1);  
  lcd.print (Amplitud2,2);  
  lcd.print("  ");  
  
}
```

9. Estimación de costes.

En este punto se recoge una estimación de los costes del conjunto empleado para sustituir al *shaker* como excitador electrodinámico y de los equipos Arduino que se programaron para poder obtener un conjunto totalmente autónomo.

COSTE MATERIALES			
Artículo	Unidades	Precio €	TOTAL
Altavoz	1	20	20
Fuente de alimentación 12 V	1	14	14
Etapa de potencia	1	25	25
Arduino DUE	1	44	44
Arduino UNO	1	16	16
Potenciometros	2	1	2
PCBs	2	0,5	1
LCD 2004A	1	5,4	5,4
Interfaz	1	1,78	1,78
LED	1	0,1	0,1
Resistencia 220 Ω	1	0,02	0,02
Cables	16	0,03	0,48
Conectores macho-hembra	1	2,5	2,5
Transformador 9 V	1	5	5
Cables alimentación	1	2	2
TOTAL			139,28

Tabla 27. Estimación de costes.

En este presupuesto no se tuvo en cuenta otros costos como los asociados al tiempo de estudio, desarrollo y realización de los circuitos y los diferentes softwares.

Respecto al coste del *shaker*, se encontró una unidad del LDS modelo V101 M4 como el empleado en este TFG a la venta en internet por 1030€. Teniendo en cuenta que el altavoz se compró por 20€ (no se compara con el coste total, pues salvo el altavoz el resto de elementos también se utilizaban cuando se hacía funcionar el *shaker*), queda totalmente demostrado el ahorro al emplear el bafle como *shaker low cost*, objetivo principal de este TFG.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**



10. Referencias

- [1] «¿Cómo funciona?,» [En línea]. Available: <http://comofunciona.org/como-funciona-un-altavoz/#prettyPhoto>. [Último acceso: Julio 2017].
- [2] «Arduino y solo Arduino,» [En línea]. Available: <https://soloarduino.blogspot.com.es/2015/09/>. [Último acceso: Julio 2017].
- [3] «Arduino y solo Arduino,» [En línea]. Available: <https://soloarduino.blogspot.com.es/2015/09/conversion-analogica-digital-adc.html>. [Último acceso: Julio 2017].
- [4] «Instructables,» [En línea]. Available: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Waveform-Generator/>. [Último acceso: Julio 2017].
- [5] S. F. y. M. Shiloh, Arduino libro de proyectos, Torino, Italia, 2012.
- [6] «Arduino y solo Arduino,» [En línea]. Available: https://soloarduino.blogspot.com.es/2015/09/conversion-analogica-digital-adc_19.html. [Último acceso: Julio 2017].
- [7] «Arduino y solo Arduino,» [En línea]. Available: https://soloarduino.blogspot.com.es/2015/09/conversion-analogica-digital-adc_34.html. [Último acceso: Julio 2017].
- [8] «BKSV,» [En línea]. Available: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Product-Data/bp2418.ashx>. [Último acceso: Julio 2017].
- [9] «PCP Audio,» [En línea]. Available: http://www.pcpaudio.com/pcpfiles/doc_altavoces/analisis_altavoces/driver.html. [Último acceso: Julio 2017].
- [10] «ARDUINO Forum,» [En línea]. Available: <https://translate.google.es/translate?hl=es&sl=fr&u=https://forum.arduino.cc/index.php%3Ftopic%3D425765.0&prev=search>. [Último acceso: Julio 2017].
- [11] «ARDUINO,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/DueSimpleWaveformGenerator>. [Último acceso: Julio 2017].
- [12] «ARDUINO Forum,» [En línea]. Available: <https://translate.google.es/translate?hl=es&sl=fr&u=https://forum.arduino.cc/index.php%3Ftopic%3D425765.0&prev=search>. [Último acceso: Julio 2017].