

OSCILADOR POR SÍNTESIS DIGITAL DIRECTA PARA EXPERIMENTOS DIDÁCTICOS DE ONDAS Y VIBRACIONES

*DIRECT DIGITAL SYNTHESIS OSCILLATOR FOR DIDACTIC
EXPERIMENTS ON WAVES AND VIBRATIONS*

Miguel Ángel Bañuelos Saucedo

UNAM, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, México
miguel.banuelos@icat.unam.mx

Humberto Ángel Albornoz Delgado

UNAM, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, México
humberto.albornoz@icat.unam.mx

Eduardo José Vega Murguía

UNAM, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, México
eduardo.vega@icat.unam.mx

Recepción: 5/octubre/2023

Aceptación: 24/abril/2024

Resumen

Algunos instrumentos comerciales, para realizar experimentos de fenómenos ondulatorios o vibratoriales superan los US\$900 dólares, por lo que su adquisición resulta difícil. En este artículo, se presenta el desarrollo de un oscilador para experimentos de ondas y vibraciones, como una herramienta para verificar modelos matemáticos y realizar experimentos para encontrar frecuencias de resonancia o nodos de vibración en: cuerdas, alambres, resortes, tiras metálicas o plásticas, y placas de Chladni. El instrumento se basa en un microcontrolador PIC18F27Q43 que incluye un convertidor digital-analógico. El prototipo puede operar a frecuencias de 0 a 100 Hz y 100 Hz a 1 kHz. Tiene una resolución de 0.025 Hz, lo cual se considera adecuado para los fines didácticos y similar a las especificaciones de instrumentos de bajo costo. El prototipo tiene una carcasa de aluminio y un control remoto alámbrico de PVC. El costo total se estima en US\$250 dólares.

Palabras Clave: Experimentos de acústica, Generadores de señales, Microcontroladores PIC, Ondas y vibraciones.

Abstract

Some commercial instruments used to perform undulatory or vibrational phenomena experiments cost over US\$900 dollars, making them difficult to acquire. In this paper, the development of an oscillator for experiments on waves and vibrations is presented, as a tool to verify mathematical models and perform experiments to find resonance frequencies or vibrational nodes in ropes, wires, springs, metallic or plastic strips, and Chladni plates. The instrument is based on a PIC18F27Q43 microcontroller, which includes a digital-to-analog converter. The prototype can operate with frequencies from 0 to 100 Hz and 100 Hz to 1 kHz. It has a resolution of 0.025 Hz, and this is considered appropriate for didactic purposes and comparable to the specifications of low-cost instruments. The prototype has an aluminum case and a PVC wired remote control. It is estimated to have a total cost of US\$250 dollars.

Keywords: *Experiments on acoustics, PIC microcontrollers, Signal generators, Waves and vibrations.*

1. Introducción

El estudio de los fenómenos de vibraciones mecánicas puede resultar complicado para muchos estudiantes [Di Carlo, 2022]. La experimentación constituye un elemento importante para que los estudiantes puedan identificar y resolver problemas de ingeniería, por ejemplo, los relacionados con la frecuencia natural de dispositivos mecánicos [Jasinski, 2022]. De esta manera, se puede considerar que el aprendizaje mediante la experimentación, particularmente en fenómenos físicos, es una herramienta importante para el aprendizaje. Desde el siglo XIX, “el laboratorio ha llegado a ser una característica distintiva de la educación en ciencia” [Hofstein, 2017].

Para la realización de experimentos de ondas y vibraciones, los equipos comerciales constan de tres módulos: generador de señales, amplificador de potencia y vibrador mecánico. En algunos casos, el generador de señales y el amplificador forman un solo equipo; por ejemplo, el generador PASCO PI-8127 (US\$689 dólares) [Pasco, 2001]. El vibrador mecánico puede costar US\$140

dólares (Arbor Scientific P7-1000), más sus accesorios. El modelo de distribución, por medio de vendedores exclusivos, puede incrementar el precio al usuario final. Los generadores de funciones para experimentos de ondas y vibraciones suelen operar en un rango de frecuencias por debajo de los 100 kHz. En la tabla 1, se muestra una comparación de las características de tres equipos del fabricante PASCO Scientific [Pasco, 2004, 2023]. Destaca que la frecuencia máxima es de 100 kHz y la resolución alcanza un valor de 1 mHz.

Tabla 1 Comparación de generadores de la marca PASCO.

Modelo	Frecuencia	Resolución/paso	Voltaje de salida
PI-8127	CD a 100 kHz	0.001 Hz/1 Hz	± 10 V @ 1 A
WA-9867	1 a 800 Hz	0.1 Hz	10 V @ 1 A (8Ω)
UI-5000	CD a 100 kHz	0.001 Hz	± 15 V @ 1 A

Fuente: elaboración propia.

Como alternativa a los generadores de funciones de fabricantes de equipo didáctico se puede recurrir a equipo electrónico de uso general (equipo de prueba y medición). Sin embargo, dichos equipos rara vez cuentan con un amplificador de potencia integrado. Entre los instrumentos que sí incluyen una salida de potencia está la serie MFG-2000 del fabricante taiwanés GW Instek. Por ejemplo, el MFG-2120MA cuenta con una salida de 1.6 A (12.5 Vp) en el intervalo de frecuencias de CD a 100 kHz. Este equipo tiene un costo aproximado de US\$575 dólares.

Otras opciones para la generación de señales senoidales de baja frecuencia incluyen modelos de bajo costo, como el FG-100, mostrado en la figura 1a, y el DDS v2.1, mostrado en la figura 1b. Ambos tienen el inconveniente de que no permiten variar la frecuencia mientras está activa la señal de salida.



a) FG-100.



b) DDS v2.1.

Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Generadores de funciones de bajo costo.

En la tabla 2, se presenta una comparación entre las características principales de estos módulos, incluyendo su precio. De manera similar a los generadores PASCO, la frecuencia máxima es de 100 kHz.

Tabla 2 Características principales de dos generadores de bajo costo.

Modelo	Frecuencia (senoidal)	Resolución/paso	Voltaje de salida	Precio (dólares) www.elecbee.com
FG-100	1 Hz a 100 kHz*	1 Hz	±10 V	\$30
DDS v2.1	1 Hz a 65 kHz	1 Hz	±5 V	\$19

Fuente: elaboración propia.

El módulo FG-100 tiene una especificación de frecuencia máxima de 500 kHz; sin embargo, en pruebas realizadas en laboratorio, se encontró que a frecuencias mayores a 100 kHz se produce una señal con distorsión, vista en un osciloscopio, por lo que se estableció como límite práctico o real. Este generador de funciones se basa en un microcontrolador ATmega328P, como el encontrado en las tarjetas Arduino UNO. Este microcontrolador de 8-bits no cuenta con un convertidor digital-analógico integrado, y la generación de señales se realiza mediante el uso de 8 salidas digitales conectadas a un arreglo resistivo de tipo escalera R-2R, y de esa manera implementa la conversión digital-analógica [Maloberti, 2007]. Como se puede observar en la figura 1a, el equipo cuenta con un interruptor para activar un filtro paso-bajas para disminuir el efecto de escalones de la conversión digital-analógica. El control de amplitud se realiza mediante un potenciómetro, tiene una perilla para ajustar el voltaje de offset y un botón para generar una señal sin offset. El generador de bajo costo denominado DDS v2.1 no cuenta con carcasa y el ajuste de frecuencia es más complicado, debido a que se utiliza el mismo menú circular que para seleccionar la forma de onda (ver figura 1b). Su funcionamiento se basa en un microcontrolador ATmega16A y utiliza el mismo sistema de escalera R-2R, a partir de 8 líneas digitales. También cuenta con perillas para control de amplitud y offset.

Otra opción por considerar para la generación de señales es la utilización de circuitos integrados especializados, como el AD9833 de Analog Devices, que es un circuito generador de formas de onda programable, que cuenta con un convertidor

digital-analógico interno de 10 bits. Se puede encontrar en módulos que facilitan su utilización (ver figura 2). El módulo tiene un costo aproximado de US\$6 dólares y es capaz de producir señales senoidales, triangulares o cuadradas de hasta 12.5 MHz con una resolución de 0.1 Hz. Si se opta por reducir la frecuencia máxima a 1 MHz, es posible obtener una resolución de 0.004 Hz [Analog-Devices, 2019]. El uso de este tipo de módulos no se consideró, pues primero se trató de probar la generación de una senoidal directamente con un microcontrolador, y de esa manera evitar la compra del módulo o del circuito integrado.



Fuente: elaboración propia.

Figura 2 Módulo con el circuito integrado AD9833.

Finalmente, es posible también auxiliarse de un teléfono celular y un pequeño amplificador de audio para realizar experimentos de ondas y vibraciones. Por ejemplo, en [Thepnurat, 2020], los autores utilizan un teléfono celular para producir una forma de onda, y otro para medir la frecuencia de vibración de las ondas en un tanque, aunque la resolución es de 1 Hz. Sin embargo, debido a que la etapa de salida de audífonos de un teléfono celular no está estandarizada, es común encontrar que la señal de salida tiene un nivel de voltaje de offset, que puede variar de aparato en aparato, por lo que se requeriría de un osciloscopio y de un ajuste a cada equipo para poder utilizar una aplicación de teléfono celular. Este voltaje de offset dificultaría la generación de bajas frecuencias ($f < 20$ Hz) que son muy útiles en algunos experimentos.

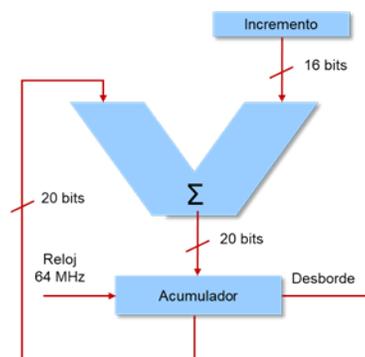
2. Métodos

Como resultado de conversaciones con expertos en el área de acústica y vibraciones, se determinó que el intervalo de frecuencias necesario era de 0.1 Hz a 1 kHz, preferiblemente con resolución de 0.1 Hz o menor. Adicionalmente, se

consideró un desplazamiento máximo del vibrador de 4 mm. Como actuador se propuso por utilizar una bocina woofer de 5 ¼ pulgadas, 100 W, 6 Ω.

El sistema electrónico consiste en tres módulos: fuente de alimentación, control y amplificador. A la salida del amplificador se conecta la bocina que funciona como actuador mecánico para el equipo. Cada módulo fue desarrollado en una tarjeta electrónica independiente, lo cual facilita el desarrollo y modificación del dispositivo. La fuente de alimentación es del tipo lineal con reguladores de voltaje integrados. Es capaz de proporcionar +12 V CD y -12 V CD con una corriente máxima de 1 A. Se basa en los circuitos integrados L7812 y L7912.

El control se basa en un microcontrolador de 8-bits PIC18F27Q43 del fabricante Microchip, el cual salió al mercado en el año 2021 [Microchip, 2020]. Este microcontrolador cuenta con un convertidor digital-analógico interno de 8 bits, que se utiliza para generar una señal senoidal de frecuencia variable. La señal producida es una secuencia de niveles discretos de voltaje y para suavizar la señal se empleó un filtro paso bajas pasivo con una frecuencia de corte de 15.9 kHz, la cual fue ajustada experimentalmente. La velocidad de actualización del convertidor digital-analógico de este microcontrolador permitió la generación de señales senoidales de hasta 1 kHz con baja distorsión. La generación de la señal senoidal se basa en una tabla de datos que se envía al convertidor digital-analógico a una tasa de repetición controlada por el oscilador controlado numéricamente (NCO, numerically controlled oscillator). El NCO es un periférico interno del microcontrolador, cuyo diagrama de bloques simplificado se muestra en la figura 3.

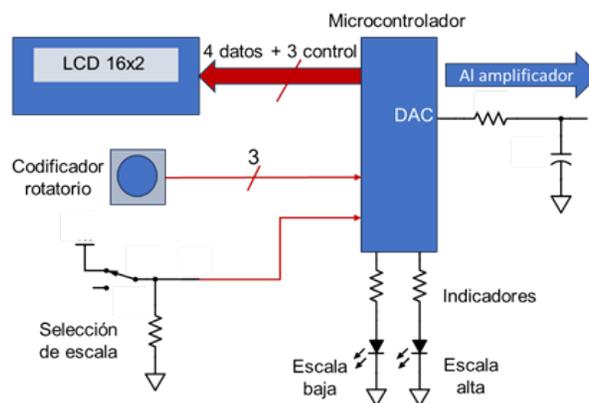


Fuente: elaboración propia.

Figura 3 Oscilador controlado numéricamente.

El módulo NCO tiene un sumador y un acumulador de 20 bits, independientes del CPU del microcontrolador. El incremento ocurre cada ciclo de reloj, en este caso a 64 MHz. Cada vez que el acumulador se desborda se envía un dato al convertidor digital-analógico. Al modificar el incremento, se ajusta la frecuencia de la señal senoidal que se produce.

El control cuenta con una pantalla LCD donde se muestra al usuario la información de la frecuencia generada, el paso de cambio de la frecuencia, y si el dispositivo se encuentra operando en el rango bajo o alto de frecuencias (Figura 4).



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Diagrama de bloques del control electrónico.

En la figura 5, se presenta una imagen de la pantalla LCD donde se muestra que la frecuencia generada es de 4 Hz, con pasos de incremento/decremento de 1 Hz, y que se trabaja en el rango de 100 Hz (frecuencia máxima).

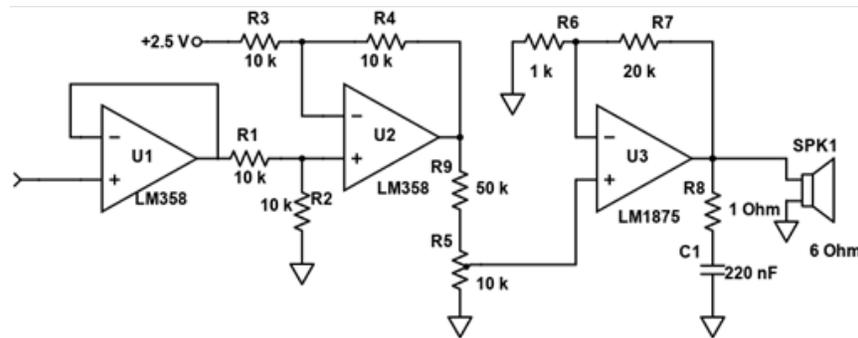


Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Detalle de la pantalla LCD y los controles.

El módulo de amplificación se encarga de convertir la señal senoidal producida por el control en una señal de mayor amplitud en voltaje y corriente. El microcontrolador

produce una señal que varía entre 0 y 5 V, la cual se convierte en una señal de ± 2.5 V, antes de enviarla al circuito de potencia (Figura 6). El control de amplitud se realiza mediante un potenciómetro que no tiene ninguna escala de graduación, debido a que la respuesta en frecuencia de la bocina no es plana [Watkins, 2022].



Fuente: elaboración propia.

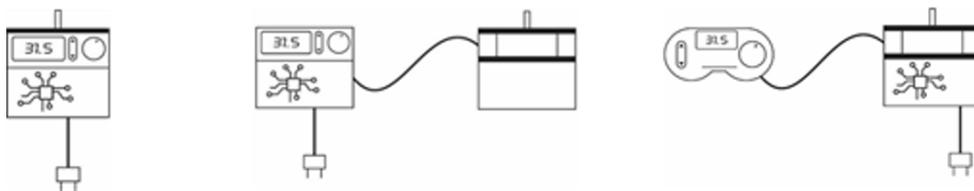
Figura 6 Diagrama esquemático de la etapa de potencia.

El amplificador se basa en el circuito integrado LM1875, que es un amplificador de audio clase AB de 20 W de potencia [Texas-Instruments, 2004]. En el diseño propuesto, el LM1875 se alimenta con ± 12 VCD; sin embargo, debe evitarse que la salida supere ± 10 V para evitar la saturación y, por lo tanto, la distorsión de la señal de salida. Este circuito integrado tiene un desempeño ligeramente mejor al TDA2030 utilizado en versiones previas del prototipo, el cual es fácil de conseguir en el mercado nacional, pero está marcado como obsoleto por el fabricante [ST, 2011]. Para hacer posible el procesamiento de señales de baja frecuencia, el circuito LM1875 tiene un acoplamiento directo en lugar de capacitivo (como sugiere su hoja de datos) con la etapa previa. En las hojas de datos se sugiere conectar un capacitor de 22 μ F en serie con la resistencia R6 de la figura 6; sin embargo, se ha removido para poder amplificar señales de baja frecuencia.

El concepto general del diseño de la carcasa exploró tres posibilidades diferentes de desarrollo que dependían de la viabilidad funcional, y el volumen de los componentes electrónicos. Contar con los componentes de forma física y conocer su volumetría y distribución, permitió un análisis más adecuado de las posibilidades de fabricación y su funcionalidad.

Se analizaron las ventajas y desventajas de tres posibles configuraciones, considerando diversos factores, buscando su factibilidad en cuanto a usabilidad, producción y costos de manufactura. Sin embargo, una de las directrices principales fue considerar que el costo debe ser económicamente viable. Se partió de tres posibles configuraciones (Figura 7):

- Estructura de un solo elemento (bocina, electrónica y controles en un solo componente).
- Estructura de dos elementos (bocina en un cuerpo y electrónica con controles en otro cuerpo).
- Estructura de dos elementos (bocina y electrónica en un cuerpo con controles en un cuerpo independiente más pequeño usando cable).



a) Un solo elemento. b) Elemento doble con control integrado c) Elemento doble con control separado.

Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Configuraciones posibles para la construcción del equipo.

Los conceptos con dos elementos presentan el inconveniente de un costo elevado, ya que al tener dos cuerpos independientes se duplica el costo de material de manufactura y mano de obra; sin embargo, permiten una mejor visualización de la información en la pantalla y manipulación de los controles (Figura 8).



a) Concepto con un solo elemento. b) Concepto con dos elementos.

Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Propuestas conceptuales para la carcasa.

Después de realizar todas las consideraciones pertinentes y tomando en cuenta que, como un equipo didáctico, requiere ser manipulado por varios usuarios durante el período de actividades, se priorizó el factor ergonómico para definir el concepto final del diseño. La opción elegida fue la estructura de dos elementos: bocina y electrónica en un cuerpo, con un control remoto alámbrico en un cuerpo independiente más pequeño y fácil de manipular. Se consideró atractiva la posibilidad de que los estudiantes de una brigada pudieran intercambiar el control entre ellos, sin modificar el resto de la instalación experimental. Los controles remotos han ganado una importancia creciente como interfaz entre el usuario y el producto [Bürdek, 2005].

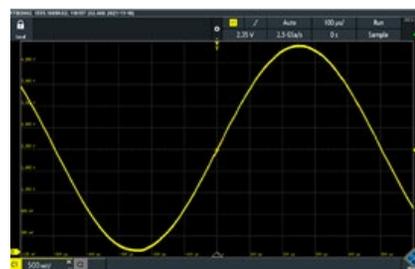
Se construyeron algunos prototipos con cartón, para evaluar algunas de las características principales del concepto de diseño. Posteriormente se utilizaron herramientas de maquinado para hacer una mejor evaluación de la operación del instrumento. El uso de imágenes 3D permite mostrar una versión del acabado final y las características de la interfaz [Ferraris, 2023].

3. Resultados

El sistema desarrollado utiliza componentes comerciales y algunos componentes manufacturados o maquinados específicamente en el taller mecánico del instituto. El prototipo genera señales senoidales comparables o mejores que los dispositivos comerciales de bajo costo. En la figura 9 se muestra la comparación de la señal senoidal de salida de 1 kHz producida por un módulo comercial DDS 2.1 (figura 9a) y la producida por el sistema desarrollado (figura 9b).



a) DDS 2.1 generando señal de 1 kHz.

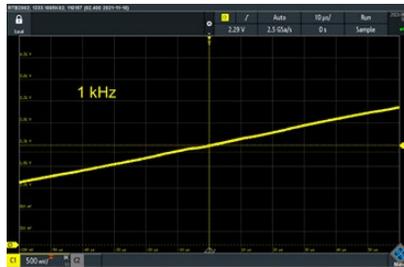


b) PIC18F27Q43 generando señal de 1 kHz.

Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Comparación de la señal de salida.

En la figura 10, se presenta un detalle de la señal senoidal de 1 kHz generada por el circuito desarrollado. Se puede observar la baja distorsión.



Fuente: elaboración propia.

Figura 10 Detalle de la señal de salida del PIC18F27Q43.

El prototipo del cuerpo principal se encuentra terminado, armado, funcionando y en etapa de pruebas (Figura 11). Adicionalmente, se encuentran en diseño y fabricación algunos de los accesorios requeridos para las diferentes actividades experimentales. En la parte superior se observa el seguro para inmovilizar el perno del vibrador al transportar el equipo y al realizar la conexión de los accesorios para los experimentos. Este tiene la finalidad de evitar que se presione el vástago que está pegado al cono de la bocina y la dañe.



a) Vista frontal.



b) Vista posterior.

Fuente: elaboración propia.

Figura 11 Prototipo del cuerpo principal armado y funcional.

El cuerpo principal del generador de vibraciones está formado por una placa de aluminio que sirve de base de toda la estructura, tiene dos paredes laterales de plástico, y una carcasa de lámina que cubre toda la estructura. La base de aluminio permite fijar todos los componentes electrónicos (tarjetas de circuitos y transformador de voltaje), así como cuatro postes de aluminio (Figura 12) que

sostienen la bocina de 5 ½ pulgadas, mediante la cual se producen las vibraciones. La misma base permite fijar las dos piezas laterales donde se encuentran los barrenos para la ventilación. El proceso de fabricación requiere de corte, fresado y barrenado, sin necesidad de dar acabado y respetando el aspecto natural del aluminio.



Fuente: elaboración propia.

Figura 12 Prueba de la bocina sobre los postes soporte colocados en la base.

Para el control remoto se diseñó una envolvente que aloja el circuito impreso con el microcontrolador, la pantalla LCD, las perillas, los botones de control y dos indicadores led. La pantalla de cristal líquido es de dos renglones de 16 caracteres. En el renglón superior se muestra en orden los textos: frecuencia, paso (de incremento/decremento) y rango, cuyos valores se muestran en el renglón inferior debajo de cada texto al que corresponden. Estas magnitudes corresponden a la frecuencia de la señal (en Hertz) con que se activa la bocina del generador.

El botón de rango permite seleccionar dos opciones de generación de ondas, una que va de 0.025 a 100 Hz y otra que va de 100 a 1000 Hz. Al seleccionar uno de estos rangos, se enciende el led indicador rojo correspondiente señalando en cual se está trabajando, lo cual también aparece en la pantalla.

La perilla de frecuencia es también un botón de presión, y al presionarlo se cambia el paso de incremento/decremento de la frecuencia. La variación de la frecuencia se obtiene al girar la perilla, que es un codificador rotativo con 12 pasos por revolución [Bourns, 2015]. Cuando se trabaja en el rango de 0.025 a 100 Hz, los pasos seleccionados para el cambio de frecuencia pueden ser de 0.025, 0.1, 1 y 10 Hz.

Cuando se trabaja en el rango de 100 a 1000 Hz, los pasos seleccionados para el cambio de frecuencia pueden ser de: 0.25, 1, 10 y 100 Hz.

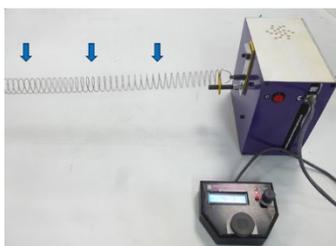
La perilla de control de amplitud consiste en un potenciómetro conectado directamente al amplificador que se encuentra en el cuerpo principal, y cuya señal permite dar la amplitud deseada a la señal senoidal que va a la bocina. La amplitud máxima es de ± 10 V, condición en la cual se mide una corriente de 1.24 A, por lo que la potencia máxima que se entrega es de 12.4 W. La potencia es suministrada a la bocina es variable y dependerá de la amplitud seleccionada con el potenciómetro. Las pruebas realizadas determinaron que el desplazamiento obtenido fue de 4 mm (frecuencias menores a 10 Hz), mismo que se calificó como adecuado y suficiente para las actividades planteadas.

La carcasa para el control está realizada en placa de PVC, la cual está cortada y ensamblada de forma que protege todos los componentes: tarjeta de circuitos impresos y pantalla (Figura 13). El prototipo terminado se muestra en la figura 14.



Fuente: elaboración propia.

Figura 13 Control remoto con acabados y gráficos aplicados.



Fuente: elaboración propia.

Figura 14 Experimento de una onda estacionaria en un resorte.

Se presenta un experimento de generación de una onda estacionaria en un resorte. Para realizar este experimento, el equipo de vibración se coloca en posición horizontal y se le acopla un resorte, el cual se fija en un extremo a un soporte fijo y

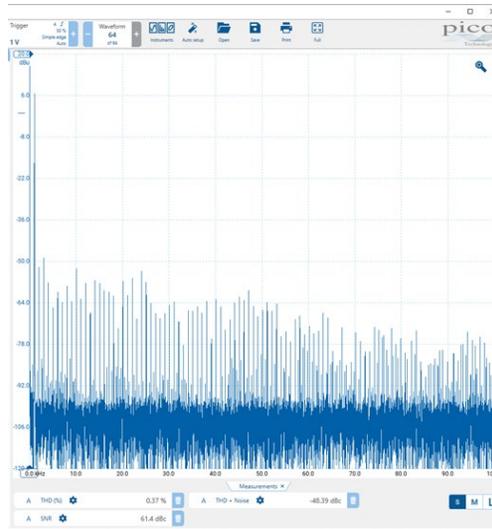
en el otro al equipo de vibración. La frecuencia se va variando hasta encontrar el modo de vibración deseado. Un procedimiento común es comenzar con pasos de 1 Hz o 10 Hz, para después afinar la frecuencia con pasos de 0.1 Hz o 0.025 Hz. En la imagen, es posible apreciar tres nodos indicados por las flechas azules.

4. Discusión

El equipo desarrollado incluye un control remoto alámbrico para el ajuste de los parámetros de la oscilación. Un control independiente del dispositivo oscilador permite que el control pueda ser transferido a los diversos integrantes del equipo de trabajo, pueda compartirse la información y facilitar la observación de las condiciones de operación del oscilador. Esto permite un mayor trabajo colaborativo, equidad de jerarquías en el desarrollo de la práctica, y además mantener el control del experimento alejado del área de donde se produce el fenómeno de estudio. Por otro lado, el dispositivo puede trabajar en posición horizontal y vertical, facilitando el empleo de diversos dispositivos donde se producen las ondas estacionarias.

Es posible realizar diversos experimentos de oscilación de ondas estacionarias de acuerdo con el medio donde se produzcan, ya sean en elementos unidireccionales como un hilo elástico, un resorte, una barra agitada al centro con extremos libres o un aro, o elementos bidimensionales como son las burbujas de jabón o las láminas de Chladni. La posibilidad de hacer todos estos experimentos muestra la versatilidad de empleo del generador de oscilaciones en diversos niveles educativos de acuerdo con sus programas de estudio. Por ejemplo, ver la relación de los diversos modos de oscilación con la frecuencia en una cuerda es adecuado en el nivel de bachillerato y accesible en la secundaria. Por otro lado, el estudio de los fenómenos de oscilación, en barras, resortes y aros, son propios del nivel superior. En estos casos, es muy útil el poder generar oscilaciones cuyas frecuencias pueden ser producidas con mayor resolución, el hecho de tener pasos de variación de frecuencia de 0.1 y 0.025 Hz, y obtener frecuencia con valores decimales de Hz, permite obtener mayor precisión en la medida o determinación de las frecuencias de resonancia. Para probar el sistema se utilizó un osciloscopio PicoScope 4262, el cual es un osciloscopio tipo USB de 16 bits de resolución, ancho de banda de 5

MHz, y cuenta con software para determinar el porcentaje de distorsión armónica total (THD%, por sus siglas en inglés) y también la relación señal-ruido. En la figura 15 se puede ver un ejemplo de la ventana de operación del software para el caso de una señal de 1 kHz generada por el prototipo desarrollado. Se comparó con los generadores de señal de bajo costo de la tabla 2. En la figura 16a se muestra una comparación del THD% al producir una señal senoidal de 1 kHz, con el filtro de salida encendido y sin incluir la etapa de amplificación.



Fuente: elaboración propia.

Figura 15 Software de análisis de distorsión armónica total y ruido.



a) Porcentaje de distorsión armónica total.

b) Relación señal-ruido.

Fuente: elaboración propia

Figura 16 Comparación de la distorsión y el ruido.

El equipo FG-100 es el que presenta menor distorsión, en un análisis limitado a 50 kHz; sin embargo, la señal se mostraba ruidosa en un osciloscopio. Se procedió a realizar una prueba de la relación señal-ruido (SNR, por sus siglas en inglés) y los

resultados se muestran en la figura 16b. La medición a 1 kHz es una frecuencia estándar en las especificaciones de equipos generadores de funciones. Con las pruebas realizadas se concluye que el prototipo desarrollado produce una señal con menor nivel de ruido y con distorsión comparable a opciones de bajo costo.

Otro aspecto a evaluar es la interfaz de usuario para ajustar la frecuencia. En el caso del prototipo desarrollado, la frecuencia se puede ajustar fácilmente mediante la perilla en pasos fijos, con una resolución máxima de 0.025 Hz, de la cual carecen los generadores de señales de bajo costo. En estos últimos, además, no es posible hacer un ajuste continuo de la frecuencia, pues se tiene que desconectar la salida antes de hacer cualquier ajuste a la misma. Esta operación no es conveniente cuando se busca analizar fenómenos como la frecuencia de resonancia o una onda estacionaria [Bauer, 2011], donde un ajuste continuo de la frecuencia, sin desactivar la señal, es lo deseable. La resolución obtenida de 0.025 Hz, es una combinación de las características del microcontrolador utilizado y el programa realizado, no es tan fina como la resolución de los generadores de funciones PASCO de la tabla 1, pero no se consideró necesario alcanzar esos valores.

5. Conclusiones

Se ha diseñado y fabricado un prototipo de oscilador para experimentos de ondas y vibraciones. El sistema puede producir vibraciones mecánicas de hasta 4 mm (a 10 Hz). Cuenta con un control electrónico con despliegue en pantalla LCD alfanumérica que muestra la frecuencia, el paso de incremento y el intervalo de escala. Tiene dos intervalos de escala: bajas frecuencias (0.025 a 100 Hz) y altas frecuencias (100 a 1000 Hz). En el intervalo bajo tiene una resolución de 0.025 Hz, con incrementos en pasos de 0.025, 0.1, 1 y 10 Hz. Mientras que en el intervalo alto tiene una resolución de 0.25 Hz, con incrementos en pasos de 0.25, 1, 10 y 100 Hz. La amplitud se ajusta mediante un potenciómetro. El prototipo tiene el objetivo de sustituir la compra de equipos de importación que suelen ser muy costosos. Las pruebas realizadas indican que se obtiene una distorsión armónica total de 0.37% (a 1 kHz), lo cual es mayor al 0.2% que indican en su hoja de datos varios generadores de funciones digitales existentes en el mercado. Sin embargo, es

comparable a generadores de señal de bajo costo, y superior en cuanto a la relación señal-a-ruido. El costo del control electrónico, sin incluir su carcasa, es similar al de los generadores de señales de bajo costo, y se estima en alrededor de US\$20 dólares. En la estimación del costo total del prototipo influyen procesos realizados manualmente, tales como: corte, doblado y perforado de lámina de aluminio. Se espera que el prototipo pueda ser rediseñado para optimizar costos de manufactura, antes de poder ser comparado con los equipos didácticos comerciales. Sin embargo, de manera conservadora, es posible que el prototipo desarrollado no supere los US\$250 dólares, lo que lo haría competitivo.

El amplificador basado en el circuito LM1875 tiene un costo aproximado de US\$6 dólares, y podría ser reemplazado por algún módulo con un amplificador clase D por un precio similar, con la ventaja de que no se requiere añadir un disipador de calor y contaría con todos los componentes montados en el circuito impreso. Sin embargo, tendría que evaluarse su respuesta a bajas frecuencias (menores a 20 Hz), que son necesarias en el oscilador.

Como trabajo futuro se contempla la realización de un manual de prácticas y el diseño y fabricación de los accesorios que sean requeridos.

Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de los estudiantes Diana Yali Dávila Téllez y Gabriel Andrei Rubén Cruz Miranda, así como del jefe de taller de construcción de prototipos Marco Antonio Nieves Luna.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Analog-Devices, (2019). AD9833 Programmable Waveform Generator. Analog Devices, Inc.
- [2] Bauer, Wolfgang, and Gary Westfall, (2011). Física Para Ingeniería y Ciencias. McGraw-Hill Educación.
- [3] Bourns, (2015). PEC12R 12 Mm Incremental Encoder. Bourns, Inc.
- [4] Bürdek, Bernhard. Design. History, Theory and Practice of Product Design. Birkhäuser, 2005.

- [5] Carlo, Simone Di, Lorenzo Benedetti, and Egidio Di Gialleonardo. Teaching by Active Learning: A Laboratory Experience on Fundamentals of Vibrations. *International Journal of Mechanical Engineering Education* 50 (4): 869–82, 2022.
- [6] Ferraris, Silvia, and Lucia Rampino, (2023). Prototypes for Industrial Design Research. In *The Role of Prototypes in Design Research. Overview and Case Studies*, edited by Silvia Ferraris, 105–25. Springer.
- [7] Hofstein, Avi. The Role of Laboratory in Science Teaching and Learning. In *Science Education. An International Course Companion*, edited by Keith S. Taber and Ben Akpan, 585. Sense Publishers, 2017.
- [8] Jasinski, Christopher M, and Robert D Celmer. Effective Educational Practices, Assessment, and Applications in Acoustics and Vibration at the University of Hartforda). *The Journal of the Acoustical Society of America* 152 (1): 633–39, 2022.
- [9] Maloberti, Franco, (2007). *Data Converters*. Springer.
- [10] Microchip, (2020). PIC18F27Q43 High-Performance Microcontroller. Microchip Technology, Inc.
- [11] Pasco, (2001). *Function Generator PI-8127 Instruction Manual*. PASCO Scientific.
- [12] Pasco, (2004). *Sine Wave Generator WA-9867 Instruction Manual*. PASCO Scientific.
- [13] Pasco, (2023). 850 Universal Interface UI-5000. <https://www.pasco.com/products/interfaces-and-dataloggers/ui-5000>.
- [14] ST. 2011. TDA2030A 18 W Hi-Fi Amplifier. STMicroelectronics NV.
- [15] Texas-Instruments, (2004). LM1875 20W Audio Power Amplifier. Texas Instruments Inc.
- [16] Thepnurat, Meechai, Phuwadon Nikonphan, Supanida Mungkhalad, Parinya Saphet, Kanitta Supawan, and Anusorn Tong-on, (2020). Using a Smartphone Application to Measure the Properties of Water Waves in the DIY Ripple Tank Experiment Set. *Physics Education* 55 (3): 35011.
- [17] Watkins, W. H., (2022). *Loudspeaker Physics and Forced Vibration*. Springer.