

DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CIRCUITO PCB PARA UN DISPOSITIVO PULSADOR/RECEPTOR CAPAZ DE EXCITAR TRANSDUCTORES ULTRASÓNICOS

A.C. VELA MUÑOZ¹, L.A. CONEJO RODRÍGUEZ¹, F.J. GARCÍA ZUÑIGA¹, L.G. ESTRADA GÁMEZ¹, J.O. MORALES RODRÍGUEZ¹, O.A. VÁZQUEZ HERNÁNDEZ¹, A.J. BALVANTIN-GARCIA¹, A. SALDAÑA-ROBLES².

¹ División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.

² División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato, México.

Resumen

La detección y caracterización de defectos son tareas vitales para el mantenimiento de estructuras y componentes de ingeniería. Por tal motivo, la implementación in situ de la evaluación no destructiva en elementos y componentes estructurales se hace cada vez más necesaria. Sin embargo, aunque existen equipos comerciales portátiles, su alto costo ha reducido su uso en el campo. Aunado a lo anterior, la ubicación remota de ciertas estructuras de ingeniería dificulta la implementación de equipo comercial que requiere, entre otras cosas, de una fuente de alimentación constante y confiable. En este proyecto se propone el desarrollo de un circuito de bajo costo, cuya implementación en campo sea factible, capaz de generar pulsos de excitación para transductores. El circuito será capaz de conectarse a transductores de distintas frecuencias para la generación de distintos tipos de ondas ultrasónicas. El presente proyecto, incluye la etapa del diseño, simulación del circuito, así como el análisis de los resultados para determinar la factibilidad de la fabricación de un prototipo.

Palabras clave: Evaluación no destructiva, pulsador-receptor, transductores ultrasónicos, circuito PCB.

1. Introducción

En los últimos años, el uso de señales ultrasónicas ha emergido como una técnica crucial en la detección de defectos en materiales empleados en la ingeniería [1-4]. Esta técnica es especialmente valiosa en la implementación de la evaluación no destructiva (END), que se hace cada vez más necesaria en ubicaciones remotas, donde el uso de equipo comercial es difícil debido a la necesidad de una fuente de alimentación constante y confiable [5]. Además, su alto costo limita su utilización en campo.

La inspección con ultrasonido es un método de END importante debido a su precisión, encontrando aplicaciones en diversos campos como la industria automotriz, la agricultura, entre otros [1, 6, 7]. Durante la inspección, una onda ultrasónica se excita, propaga y se captura en un medio a través del uso de transductores. La técnica de pulso-eco [8] es una de las más utilizadas en END, donde una onda de ultrasonido se envía a través del material de prueba y las ondas reflejadas o transmitidas se analizan para identificar defectos o características del material [9, 10]. Adicionalmente, los transductores ultrasónicos juegan un papel fundamental en sistemas de evaluación no destructiva, ya que generan y reciben las ondas ultrasónicas necesarias para la inspección [11].

En respuesta a estas limitaciones del suministro de energía, así como al alto costo de inversión, el presente proyecto propone el desarrollo y simulación de un circuito pulsador/receptor capaz de excitar transductores ultrasónicos de distintas frecuencias. El objetivo es diseñar un dispositivo de bajo costo y de fácil implementación en campo, que no dependa de una infraestructura compleja. El circuito debe ser capaz de generar distintos tipos de ondas ultrasónicas, adecuándose a las necesidades específicas de cada aplicación.

El circuito propuesto es una herramienta que permitirá la implementación de la inspección ultrasónica en ambientes remotos. Proporcionando además una plataforma para la generación de ondas ultrasónicas de distintas frecuencias para la inspección de distintos materiales. El circuito desarrollado permite también la configuración de parámetros de generación de ultrasonido como la forma de la onda, la frecuencia y amplitud de la señal. Finalmente, como trabajo futuro, se debe generar también un circuito de adquisición para las señales propagadas.

2. Fundamentos teóricos

2.1 Principio de Funcionamiento de los Transductores Ultrasónicos

Las ondas sonoras que recibe un transductor se producen gracias al efecto piezoeléctrico, fenómeno físico donde se hace presente una diferencia de potencial entre las caras de un cristal debido a que se somete a influencias mecánicas (presiones), correspondiendo a la parte del receptor. De forma inversa, si se aplica un campo eléctrico a las caras del cristal del transductor, este experimentará distorsiones mecánicas, obteniendo así la función de emisor de ultrasonido.

2.2 Principios de Evaluación No Destructiva (END)

En los últimos años, los ensayos no destructivos han llegado a ser una herramienta importante para el monitoreo de la calidad en diferentes áreas de la industria [6]. El ultrasonido, es una técnica de END que emplea ondas sonoras de alta frecuencia que se transmiten a través del material. Los ecos reflejados por discontinuidades internas, como grietas o inclusiones, se registran y analizan. Este método es altamente eficaz para detectar fallas internas en materiales metálicos y no metálicos.

El procedimiento de evaluación con ultrasonido comienza con la generación de ondas ultrasónicas mediante un transductor, que convierte energía eléctrica en ondas sonoras. Estas ondas se introducen en el material a inspeccionar y viajan a través de él. Cuando encuentran una discontinuidad, parte de la energía de las ondas se refleja hacia el transductor, que ahora actúa como receptor y convierte las ondas reflejadas nuevamente en señales eléctricas. Estas señales se analizan para determinar la presencia, ubicación y tamaño de los defectos internos. La técnica puede ser utilizada en varios modos, como el de pulso-eco, donde el mismo transductor envía y recibe las ondas, o el de transmisión, donde un transductor envía las ondas y otro, ubicado en el lado opuesto del material, las recibe.

2.3 Generación y Recepción de Pulsos Ultrasónicos

En técnicas de ultrasonido para Evaluaciones No Destructivas, un transductor emite los impulsos oscilatorios que se propagarán en un medio sólido, y lo ecos producidos en el material se reflejan y transmiten hacia un segundo transductor, donde los estímulos son convertidos en señales eléctricas y posteriormente dan información sobre el medio inspeccionado [11]. Para realizar la evaluación de un material, se debe seleccionar el par de transductores de acuerdo con la sensibilidad de estos, su rango de trabajo y características de construcción.

3. Materiales y Métodos

3.1 Componentes del circuito

Para el diseño y simulación del circuito pulsador se utilizó un software de automatización de diseño electrónico comercial; dicho diseño incluye los siguientes componentes:

COMPONENTES

DESCRIPCIÓN

Arduino



Es utilizado como un microcontrolador, cuando tiene un programa descargado desde un ordenador que se controla y alimenta determinados dispositivos y toma decisiones de acuerdo con el programa.

Amplificador Operacional

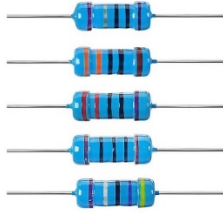


Se utiliza para amplificar señales, compararlas, y formar parte de osciladores. Además, actúa como integrador y diferenciador, sumador y restador, y convertidor de impedancia. En osciladores, genera señales periódicas. Para este proyecto, se utilizó un modelo de amplificador Lt1001-cn8

COMPONENTES

DESCRIPCIÓN

Resistores



Los resistores están hechos de materiales que resisten el flujo de electricidad cuando pasa a través de ellos. De esta manera, pueden controlar el flujo de corriente a través de un circuito. Para la elaboración del circuito se utilizaron resistencias de 1 k Ω , 1.8 k Ω , 10 k Ω , 18 k Ω , 33 k Ω , 39 k Ω , 270 k Ω y 470 k Ω .

Capacitores



Un capacitor cerámico es un dispositivo pasivo, capaz de almacenar energía sustentando un campo eléctrico. Está formado por dos armaduras metálicas paralelas (generalmente de aluminio) separadas por un material dieléctrico. Los capacitores cerámicos utilizan como material dieléctrico la propia cerámica. Para la construcción del circuito se utilizaron capacitores de 1nF.

Transductores



Los transductores permiten detectar, registrar y transformar diferentes tipos de magnitudes físicas en señales eléctricas. En la elaboración del circuito se utilizaron transductores de latón y cerámica, con una frecuencia resonante de 2.6 +/- 0.5 KHz, impedancia resonante $\leq 250\Omega$, capacitancia estática 35,000 +/- 30%PF.

Transformador



Se utilizó un transformador de 120V a 24V con 2 amperios para reducir el voltaje de una fuente de alimentación de corriente alterna (AC) de 120V a 24V. Es útil en aplicaciones como iluminación de bajo voltaje, dispositivos electrónicos, sistemas de control y automatización, donde se requiere un voltaje menor para operar de manera segura y eficiente.

Potenciómetros



Se empleó un potenciómetro de 5K, el cual es un resistor variable que permite ajustar la resistencia entre 0 y 5000 ohmios (5K ohmios). Se utiliza en la calibración de circuitos para ajustar niveles de señal y calibrar equipos, y en sistemas de medición y control para ajustar parámetros de sensores. Su capacidad de variar la resistencia permite controlar diversos aspectos en circuitos electrónicos de manera precisa.

Diodos



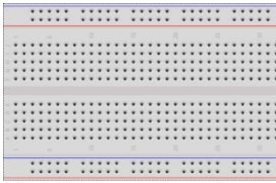
Se usaron diodos 1N4001, los cuales se utilizan comúnmente en rectificación de corriente en fuentes de alimentación para convertir corriente alterna (AC) en corriente continua (DC), protección de circuitos para prevenir daños por inversión de polaridad, supresión de picos de voltaje en circuitos que requieren protección contra sobrevoltajes transitorios, y como componentes en circuitos de baja potencia, como en cargadores de baterías y adaptadores de corriente.

COMPONENTES

Circuito Integrado



Protoboard



DESCRIPCIÓN

Un circuito integrado es un dispositivo electrónico que combina múltiples componentes como transistores, resistencias, diodos y capacitores en un solo chip de silicio. Sirve para la miniaturización de circuitos, permitiendo reducir el tamaño y el peso de los dispositivos electrónicos. También mejora el rendimiento, ofreciendo mayor velocidad y eficiencia energética en comparación con circuitos discretos.

Una protoboard es utilizada principalmente para la creación y prueba de circuitos electrónicos sin la necesidad de soldadura. Su estructura consiste en una placa de plástico con una matriz de orificios conectados internamente por tiras metálicas, lo que permite insertar y conectar componentes de manera rápida y sencilla.

3.2 Diseño del esquemático

Para la elaboración del esquemático del circuito y el diseño de la PCB, se empleó un software comercial, el cual permite simular, diseñar y verificar esquemas y placas de circuitos impresos. El circuito diseñado funciona como un generador de pulsos ultrasónicos, capaz de excitar transductores. El circuito se alimenta mediante un transformador que convierte 120V AC a 24V AC. La señal de 24V AC pasa por un puente de diodos y se regula a través de una fuente de voltaje variable, ajustable de 0 a 15V DC. Este voltaje es necesario para alimentar los amplificadores operacionales (opamps) utilizados en el circuito.

En el circuito, la placa Arduino® se encarga de generar la señal inicial de 5V a 2.5 kHz, que posteriormente es amplificada por los opamps. Posteriormente, el suministro de energía se distribuye para alimentar los opamps que amplifican y filtran la señal del Arduino®, generando una señal de salida de 2.5 kHz y 12 Vrms, misma que es lo suficientemente potente para excitar el transductor ultrasónico.

Durante el diseño, se integraron componentes como resistencias variables (potenciómetros) para ajustar el voltaje según las necesidades, y se aseguraron conexiones adecuadas entre el transformador y la fuente de voltaje. Además, se emplearon componentes piezoeléctricos para generar y recibir las ondas ultrasónicas necesarias para la inspección. Con estos conceptos en mente, se procedió a diseñar el esquemático del circuito, el cual se muestra en la *Figura 1*.

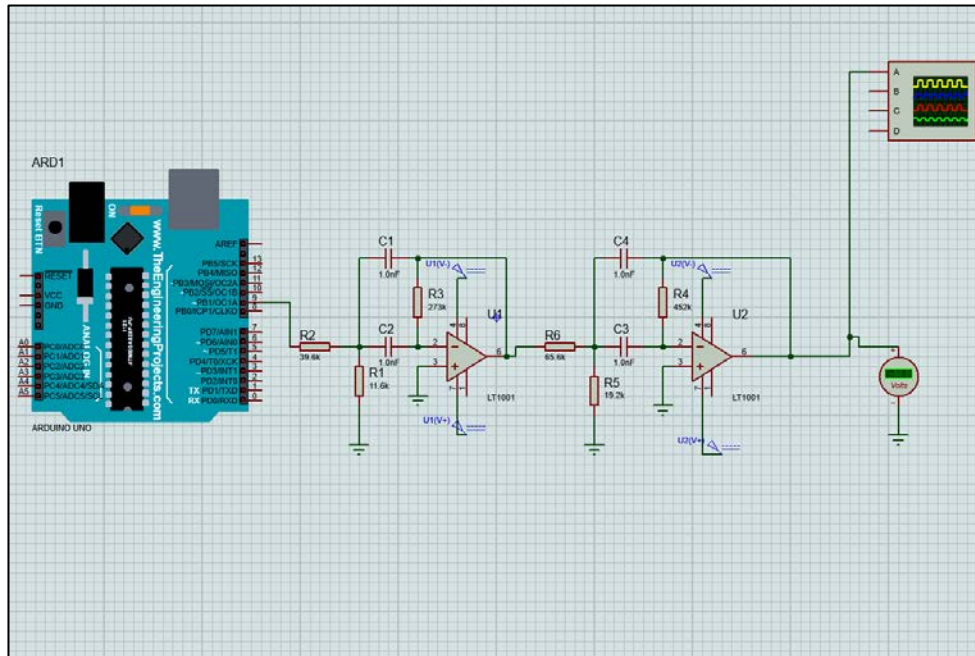


Figura 1. Diagrama esquemático del circuito.

Como se puede observar en el diagrama esquemático, los componentes utilizados fueron los siguientes:

Tabla 1. Lista de componentes.

NOMBRE	DESIGNANTE	FOOTPRINT	CANTIDAD
LT1001	U1, U2	Lt1001-cn8	2
ARDUINO 1	ARD1	Arduino UNO	1
CAPACITORES	C1, C2, C3, C4	CAP CERM 1.0 nF	4
RESISTOR 1 KΩ	R2	1K ¼ W Resistor	1
RESISTOR 1.2 KΩ	R5	RES 1.2K OHM ¼ W	1
RESISTOR 1.8 KΩ	R1	RES 1.8K OHM ¼ W	1
RESISTOR 3.3 KΩ	R3	RES 3.3K OHM ¼ W	1
RESISTOR 10 KΩ	R1	RES 10K OHM ¼ W	1
RESISTOR 18 KΩ	R5	RES 18K OHM ¼ W	1
RESISTOR 33 KΩ	R6	33.0K ¼ W Resistor	2
RESISTOR 39 KΩ	R2	39.0K ¼ W Resistor	1
RESISTOR 270 KΩ	R3	270.0K ¼ W Resistor	1
RESISTOR 470 KΩ	R4	470.0K ¼ W Resistor	1

3.3 Descripción del diseño y programación del circuito en Proteus.

La primera parte del circuito consiste en la alimentación mediante un transformador de 120 V a 24 V y 2 A. Este transformador se utiliza para reducir el voltaje de 120 volts a 24 volts de corriente alterna, ya que para alimentar un circuito de esta clase se necesita un voltaje regulado y no mucha corriente. El transformador se conecta a un circuito regulador de voltaje variable o fuente de voltaje variable, que es capaz de regular de 0 a 15 volts de corriente directa. Este tipo de energía es adecuada para alimentar el circuito propuesto en este proyecto.

La segunda parte del circuito es la fuente de voltaje. Esta fuente regula un voltaje en corriente directa necesario para encender los amplificadores operacionales (opamps) y ser capaces de amplificar y filtrar señales posteriormente. El circuito se conecta directamente al transformador en la parte del secundario que proporciona 24 Volts AC. Los dos potenciómetros o resistencias variables sirven para ajustar el voltaje según sea necesario. Este circuito puede proporcionar voltaje positivo y negativo, ya que los opamps requieren ambos para funcionar. Por lo tanto, el circuito se divide en dos partes: la negativa y la positiva. Las salidas de voltaje de -15 a 15 volts se encuentran en la parte superior del circuito, y estas salidas, junto con el GND final en la parte inferior derecha, se conectan directamente a la siguiente parte del circuito, los opamps.

La siguiente parte del circuito es la amplificación y generación de la señal que activará el transductor. Un Arduino genera un pulso de 5 volts a una frecuencia de 2.5 kHz, pero esta señal no es lo suficientemente potente para mover el transductor. Aquí entra en juego el circuito realizado con los opamps y su conjunto de configuraciones de resistencias y capacitores. La señal proveniente del Arduino entra al circuito en la entrada, pasa a través del circuito y se convierte en una señal de 2.5 kHz y 12 volts VRMS, una señal que ya puede activar el transductor, generando una señal semisinusoidal. Finalmente, en la parte de adquisición de la señal ultrasónica, se utilizó un osciloscopio como digitalizador de las señales ultrasónicas generadas.

4. Procedimiento y descripción de las pruebas experimentales.

Inicialmente, se utilizó un equipo comercial para excitar señales ultrasónicas sobre una placa metálica para generar una base de comparación. Para esto, se colocó un transductor emisor y un receptor en una placa metálica, utilizando glicerina como acoplante para mejorar la transmisión de las ondas ultrasónicas. La glicerina ayuda a asegurar un buen acoplamiento entre las superficies mecánicas del transductor y la placa metálica. La salida del aparato comercial se conectó a un osciloscopio, ajustando el trigger del osciloscopio según las especificaciones del aparato. Se observó la señal recibida por el transductor de entrada en el osciloscopio, estableciendo cómo debería ser la señal correcta para la evaluación de nuestro prototipo.

Posteriormente, para asegurar que el correcto funcionamiento del circuito, se realizaron verificaciones antes de conectar los componentes piezoeléctricos. Primero, se comprobó con un osciloscopio que el circuito estuviera entregando una señal senoidal adecuada. Se ajustaron los parámetros del circuito para asegurar que la señal generada cumpliera con los requerimientos específicos del transductor. Luego, se verificó que el Arduino estuviera modificando la señal a los parámetros deseados, incluyendo ajustes en la frecuencia y amplitud de la señal generada.

Adicionalmente, se realizó el montaje de los componentes piezoeléctricos en una placa de circuitos. El transductor piezoeléctrico emisor se conectó al circuito y se montó en la placa metálica con glicerina como acoplante. Otro transductor piezoeléctrico se colocó en otra parte de la placa para recibir la señal. Este segundo transductor receptor se conectó a un osciloscopio para verificar la señal recibida.

Al final de estas pruebas, se comprobó que el circuito desarrollado es capaz de generar una señal de excitación adecuada (ver *Figura 2*) y que el transductor de entrada recibe correctamente la señal a través del material de prueba, validando así el funcionamiento del prototipo. Con base en la señal generada, se observa que la longitud de onda varía en comparación con la señal generada con el equipo comercial debido a la diferente frecuencia excitada; sin embargo, sí se genera la forma senoidal de la señal, confirmando la efectividad del circuito desarrollado.

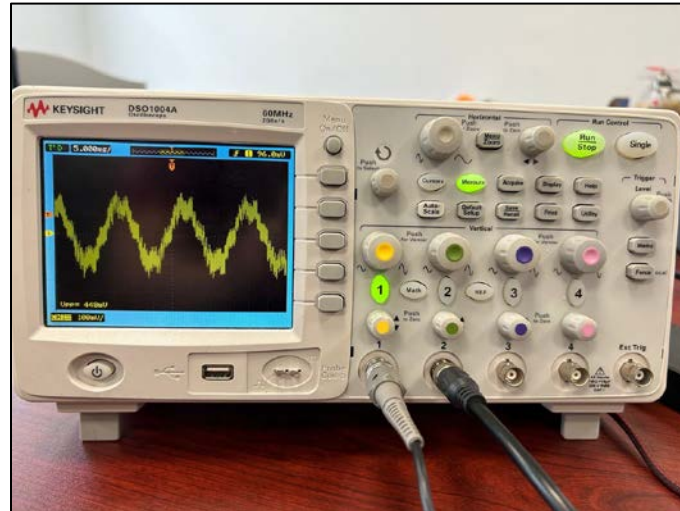


Figura 2. Señal generada por el circuito desarrollado.

5. Análisis y discusión de resultados

En la *Figura 3* y *Figura 4* se presentan la señal senoidal de excitación y la onda ultrasónica propagada en el material obtenidas durante las pruebas experimentales. En la *Figura 3* se muestra la señal de excitación amplificada por el circuito diseñado. Esta señal es fundamental para activar el transductor ultrasónico. La señal es una onda sinusoidal, lo cual es adecuado para la excitación de transductores ultrasónicos. La periodicidad y simetría de la señal son indicativos de una buena calidad en la generación y amplificación de la señal. La amplitud máxima de la señal oscila entre aproximadamente ± 0.25 V, lo que es suficiente para excitar el transductor, como se esperaba en el diseño del circuito. La frecuencia de la señal es de 2.5 kHz. Además, la señal es bastante estable en el tiempo, lo cual es crucial para asegurar una excitación constante y repetible del transductor. La estabilidad también sugiere que el circuito de amplificación está funcionando correctamente sin introducir distorsiones significativas.

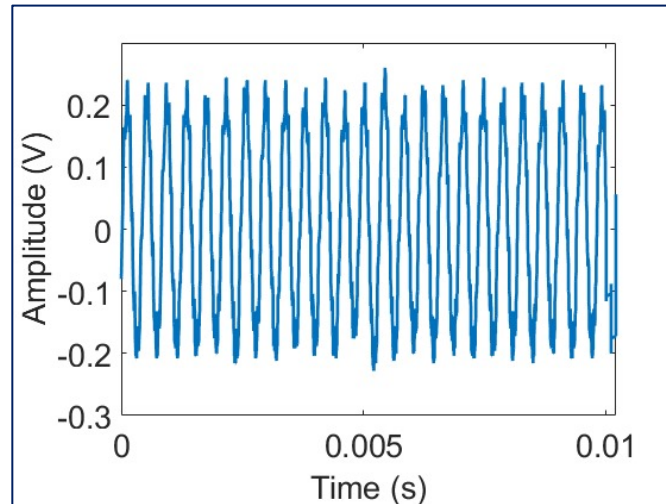


Figura 3. Señal de excitación generada por el circuito.

Por otro lado, en la *Figura 4* se muestra la señal de ultrasonido propagada por el medio y capturada por el transductor receptor. La señal recibida presenta un pico inicial de mayor amplitud, seguido de oscilaciones amortiguadas que disminuyen con el tiempo. Este comportamiento es típico en la recepción de señales ultrasónicas y sugiere una buena transmisión de la señal a través del medio de prueba. La amplitud máxima observada es de aproximadamente ± 0.3 V, lo cual es adecuado para evaluar la efectividad del sistema en la transmisión y recepción de señales ultrasónicas. A partir de los dos microsegundos, la señal se estabiliza alrededor de cero, con pequeñas variaciones atribuibles a ruido en el sistema. La estabilidad de la señal es importante para asegurar mediciones precisas y replicables. Al comparar estos resultados con los obtenidos mediante un aparato comercial, se observa que la forma de la señal es similar, aunque puede haber diferencias en la amplitud y el tiempo de amortiguamiento debido a variaciones en las características de los transductores y el material acoplante utilizado.

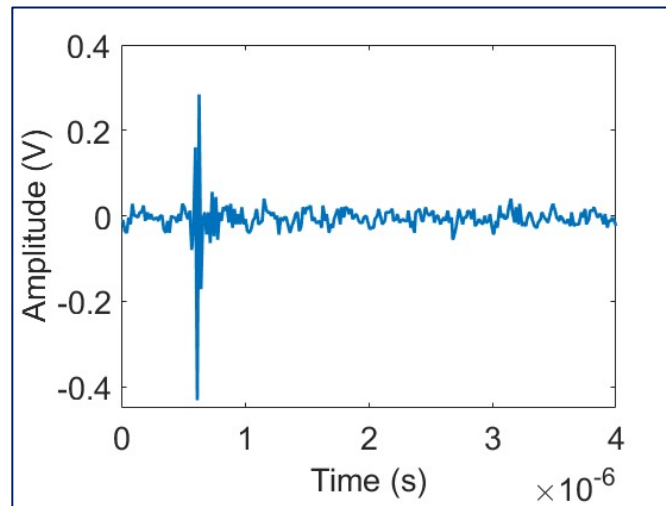


Figura 4. Señal ultrasónica propagada en el medio.

6. Conclusiones

El proyecto de diseño y simulación del circuito PCB para un dispositivo pulsador/receptor capaz de excitar transductores ultrasónicos se desarrolló y validó exitosamente mediante una serie de pruebas experimentales. El circuito fue diseñado para reducir un voltaje de 120V a 24V AC mediante un transformador. Los opamps fueron fundamentales para amplificar y filtrar la señal generada por un Arduino, que emite un pulso de 5V a una frecuencia de 2.5 kHz. La señal amplificada alcanzó una amplitud de 12 VRMS, suficiente para activar los transductores ultrasónicos.

Las pruebas realizadas con los transductores piezoeléctricos y el análisis de las señales en el osciloscopio confirmaron que el circuito desarrollado genera una señal ultrasónica similar a la producida por equipos comerciales. La efectividad del diseño se validó al observar que las formas de las señales eran comparables, aunque con ligeras variaciones en la amplitud debido a las diferencias en las características de los transductores y los materiales de acoplamiento utilizados.

En conclusión, el circuito PCB diseñado, simulado y construido cumplió con los requerimientos específicos para la generación y recepción de señales ultrasónicas, demostrando ser una solución viable y eficiente para la excitación de transductores ultrasónicos. Esto se refleja en la similitud de las señales obtenidas con las de equipos comerciales, validando la funcionalidad y la precisión del prototipo desarrollado.

7. Bibliografía

- [1]. Gupta, M., Khan, M. A., Butola, R., & Singari, R. M. (2022). Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 8(2), 2286-2307.
- [2]. Ledesma Rodríguez, V. M., & Balvantín García, A. de J. (2017). Generación de una interfaz de adquisición y procesamiento de señales ultrasónicas con LabVIEW. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 1424–1428.
- [3]. Pérez Nieto, L. A., & Balvantín García, A. de J. (2017). Puesta en marcha de un sistema de generación y recepción de ondas ultrasónicas para la medición de espesores de lámina. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 1303–1307.
- [4]. Balvantín, A., & Baltazar, A. (2011, October). Ultrasonic tomography using lamb wave propagation parameters. In *Proceedings of the 5th Pan American Conference for NDT, Cancun, Mexico* (pp. 2-6).
- [5]. Vyaghra, R. V., Sharma, S. J., & Rajagopalan, S. (2016). Design of microcontroller based multi-frequency ultrasonic pulser receiver. *Journal of Engineering Research and Applications*, 6.
- [6]. López, R. O., Trujillo, C. H., & Parra, H. (2011). Aplicación y selección de ensayos no destructivos para la evaluación de uniones soldadas. *Scientia et Technica*, 2(48), 196-201.
- [7]. Kumar, S., & Mahto, D. G. (2013). Recent trends in industrial and other engineering applications of non destructive testing: a review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(9).
- [8]. Yoshida, T., Wada, S., & Furuichi, N. (2023). A calibration methodology of ultrasonic transducers: Evaluation of spatial propagation characteristics of pulse-echo. *Measurement*, 214, 112783.
- [9]. Zhang, G., Li, X., Zhang, S., & Kundu, T. (2021). Investigation of frequency-dependent attenuation coefficients for multiple solids using a reliable pulse-echo ultrasonic measurement technique. *Measurement*, 177, 109270.
- [10]. Avila Salas, O. I., Plaza, J., & Pérez, A. (2011). Análisis De La Absorción, Reflexión Y Transmisión Del Ultrasonido En Materiales Homogéneos, Como Herramienta Para La Enseñanza De Los Fenómenos Ondulatorios. *Revista Colombiana de Física*, 43(2), 341.
- [11]. Schmerr, L. W., Lopez-Sanchez, A., & Huang, R. (2006). Complete ultrasonic transducer characterization and its use for models and measurements. *Ultrasonics*, 44, e753-e757.