

Sonda de osciloscopio de 1 Gigahertz (GHz): diseño, construcción y validación

1 GHz Oscilloscope Probe: Design, Construction and Validation

Hernán Paz Penagos¹, Sergio Andrés Marín Patiño²

¹ *Electronic Engineering Program. University Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.*
<http://orcid.org/0000-0002-2692-1989>.

² *Electronic Engineering Program. University Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.*
<http://orcid.org/0009-0006-2466-3775>.

*Autor de correspondencia: herman.paz@escuelaing.edu.co.

RESUMEN. La necesidad de sondas de osciloscopio de alta precisión en contextos donde no se cuenta con recursos suficientes ha impulsado el desarrollo de esta investigación. En aplicaciones de alta frecuencia, la disponibilidad de una sonda adecuada es crucial para garantizar mediciones precisas. Sin embargo, muchas sondas comerciales presentan costos elevados o limitaciones en su respuesta de frecuencia, lo que justifica el diseño y construcción de una sonda. Este estudio se centró en diseñar y construir una sonda de osciloscopio capaz de operar en un rango de frecuencia de 1 Hz a 1 GHz, manteniendo la integridad de la señal y minimizando la atenuación. Se hizo una selección de materiales, como conectores BNC y cables coaxiales RG-58 y RG-6, además de un circuito de compensación ajustable en configuraciones x1 y x10. Las pruebas de rendimiento incluyeron barridos de frecuencia y comparaciones con sondas comerciales para validar la precisión de las mediciones en condiciones de baja y alta frecuencia. La sonda fabricada mostró un rendimiento comparable a las sondas comerciales. Los criterios de comparabilidad fueron atenuación añadida, capacidad eléctrica y desfase. Al finalizar se logró una atenuación mínima de señal (0,30 dB a 1000 MHz), una capacidad eléctrica que garantiza integridad de la señal medida, sin distorsión, y un desfase máximo de 12°. Los resultados resaltan la importancia de seleccionar componentes de alta precisión y de un diseño de circuito de compensación adecuado para minimizar la distorsión de la señal y conservar la integridad de la señal medida en aplicaciones electrónicas.

Palabras clave. Atenuación, Compensación, Frecuencia, Osciloscopio, Precisión, Sonda.

ABSTRACT. The need for high-precision oscilloscope probes in resource-poor settings has driven this research. In high-frequency applications, the availability of a suitable probe is crucial to ensure accurate measurements. However, many commercial probes are expensive or have limited frequency response, justifying probe design and engineering. This study focused on designing and building an oscilloscope probe capable of operating in a frequency range of 1 Hz to 1 GHz, while maintaining signal integrity and minimizing attenuation. Materials were selected, including BNC connectors and RG-58 and RG-6 coaxial cables, in addition to an adjustable compensation circuit in x1 and x10 configurations. Performance testing included frequency sweeps and comparisons with commercial probes to validate measurement accuracy under low- and high-frequency conditions. The manufactured probe showed comparable performance to commercial probes. Comparability criteria were added attenuation, electrical capacitance, and phase shift. Upon completion, the device achieved minimal signal attenuation (0.30 dB at 1000 MHz), an electrical capacity that guarantees the integrity of the measured signal without distortion, and a maximum phase shift of 12°. The results highlight the importance of selecting high-precision components and an appropriate compensation circuit design to minimize signal distortion and preserve the integrity of the measured signal in electronic applications.

Keywords. Attenuation, Compensation, Frequency, Oscilloscope, Precision, Probe.

Citación: H. Paz, S. Marín, “Sonda de osciloscopio de 1 Gigahertz (GHz): diseño, construcción y validación”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 21, no. 1, pp. (0), 2025.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** No_modificar. **Recibido con correcciones:** No_modificar. **Aceptado:** No_modificar.

DOI.

Copyright: 2025 H. Paz, S. Marín. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

El desarrollo de sondas para osciloscopios ha avanzado significativamente, abarcando desde sondas pasivas [1], [2], [3], hasta activas [4], pasando por sondas diferenciales [5], con mejoras en precisión, manejo de potencia [6], [7] y rango de frecuencia [8], [9]. Sin embargo, en aplicaciones de alta frecuencia, muchas sondas comerciales presentan limitaciones en su respuesta de frecuencia o costos elevados, lo que dificulta su acceso en entornos académicos e industriales con presupuestos restringidos. La correcta selección de los materiales y el diseño de circuitos de compensación adecuados resultan fundamentales para minimizar la atenuación y distorsión de la señal, permitiendo mediciones confiables en un amplio rango de frecuencias [10]. Otro aporte del trabajo consiste en demostrar que se puede diseñar y construir sondas pasivas con calidad similar a las sondas pasivas comerciales para dotar laboratorios de programas de ingeniería de las universidades en Colombia y el mundo, sin necesidad de hacer grandes inversiones y adicional se favorece el desarrollo de competencias y habilidades en los estudiantes.

Por ejemplo, un estudio reciente sobre el diseño de una nueva sonda de voltaje para redes de baja tensión [11] ha abordado la necesidad de mediciones precisas en el rango de 10 kHz a 500 kHz, un área crítica debido al aumento de emisiones de RF (Radiofrecuencia) por los convertidores de electrónica de potencia. La sonda TSR desarrollada en este estudio mostró una respuesta de frecuencia plana con un error absoluto medio de 0,34 dB, superando las limitaciones de las sondas comerciales existentes y destacando la importancia de desarrollar herramientas de medición adecuadas para las redes inteligentes.

Por otro lado, el procesamiento de señales para medir pulsos de alta energía usando sondas de campo diferencial [12] ha revelado desafíos significativos en la integración de señales, especialmente debido a los componentes de baja frecuencia que afectan la precisión. Este estudio propuso la segmentación de la señal y el uso de técnicas de integración numérica para reducir la deriva en las mediciones. La comparación de métodos y el uso de sondas D-dot para medir pulsos de voltaje muy rápidos también destacan la necesidad de adaptar las técnicas de procesamiento de señales a las características específicas de las señales medidas.

En cuanto a las sondas activas de alta frecuencia, [13] destaca la evolución en el diseño para manejar frecuencias superiores a 2 GHz, logrando una respuesta de frecuencia plana y minimizando los efectos de carga. El uso del método Chip-on-Board (COB) para montar circuitos integrados y la implementación de cables coaxiales de alto rendimiento con aislamiento de PTFE son innovaciones importantes que mejoran la precisión y la flexibilidad de las sondas.

En [14] se evaluaron y compararon diferentes diseños de sondas de voltaje, tanto activas como pasivas, para medir pérdidas de potencia en componentes electrónicos. Los resultados indicaron que las sondas activas ofrecen una mejor respuesta transitoria, mientras que las sondas pasivas sobresalen en respuesta de frecuencia, subrayando la necesidad de seleccionar el diseño adecuado según la aplicación específica.

Finalmente, en [15] se enfoca en el diseño de circuitos de amplificación de señales usando MOSFETs de doble puerta, destacando la importancia de minimizar la capacitancia de entrada y el retardo de la señal en la línea para aplicaciones de alta frecuencia. Este enfoque no solo mejora la calidad de las mediciones, sino que también ofrece una solución accesible y efectiva para la enseñanza e investigación en electrónica.

En este contexto, el presente trabajo propone el diseño y construcción de una sonda de osciloscopio de 1 GHz que mantenga la integridad de la señal y ofrezca un desempeño comparable al de las sondas comerciales a un costo accesible. En la tabla 1 se comparan los enfoques revisados en el estado del arte con el propuesto en este artículo.

Tabla 2. Tabla comparativa de enfoques.

Enfoque de estudios del estado del arte	Diferencias con el enfoque propuesto en el artículo	Similitudes con el enfoque propuesto en el artículo
La sonda de voltaje TSR desarrollada en [11]	Sondas de voltaje para mediciones de pequeña señal que tienen magnitudes de voltajes diferentes a la baja tensión	Evidencia respuesta de frecuencia plana para el rango de 10 KHz a 500 KHz
Las sondas D-dot para medir pulsos de voltaje muy rápidos en [13]	Se diferencian en cuanto se refieren a dos tipos de sondas diferentes: activas versus pasivas	La respuesta de frecuencia es plan entre 0 y 1 GHz
En [14] se comparan sondas de voltaje activas y	Se evidencian menos pérdidas de potencia en el enfoque	Se utiliza la misma de estrategia de

pasivas en términos de pérdidas de potencia	propuesto en el artículo para sondas pasivas	minimizar la capacidad eléctrica de la sonda para sondas pasivas
En [15] se enfoca el estudio al diseño de sondas activas utilizando circuitos de amplificación de señales con MOSFETs de doble puerta	Se logra minimizar la capacitancia de entrada y el retardo de la señal en la línea con los aportes de los elementos activos; mientras que en las sondas pasivas se logra con la selección de los componentes y el diseño	Tienen el mismo propósito de minimizar la capacidad eléctrica para garantizar la integralidad de la señal medida, sin distorsión.

Se realizaron pruebas de rendimiento para evaluar la atenuación de la señal y el desfase en función de la longitud del cable y la configuración de compensación utilizada. A partir de estos resultados, se discuten las implicaciones del diseño en la medición de señales de alta frecuencia y se plantean posibles mejoras para futuras versiones de la sonda.

2. Marco de Referencia

Una sonda de osciloscopio es un dispositivo utilizado para conectar una fuente de señal, a menudo un punto de prueba en un circuito, a un osciloscopio, estableciendo una conexión eléctrica directa. Dependiendo de la fuente de señal y del tipo de medición requerida, la sonda puede variar desde un cable simple (por ejemplo, una sonda pasiva) hasta una sonda diferencial activa, que incorpora un amplificador para minimizar la capacitancia de entrada y reducir el impacto de la sonda en la señal medida [16].

Para construir una sonda, es necesario analizar componentes como conectores, cables y elementos que permiten la creación de un circuito de compensación. Cada uno de estos elementos es crucial, ya que cualquier error en su selección o uso puede llevar a fallos durante las pruebas.

En cuanto al cable, se recomienda el uso de RG58 coaxial debido a su superior relación costo-beneficio en comparación con otros como RG-174, RG-213 o RG-316, disponibles con impedancias características de 50 y 75 ohmios. El RG58 es compatible con la mayoría de los osciloscopios y es menos costoso, con un rango de operación de hasta 1 GHz (sus características técnicas se pueden encontrar en la hoja de datos) [17].

Otro componente importante para la construcción de una sonda es el conector, para el cual se utilizó una tabla

comparativa para seleccionar el más adecuado (ver Tabla 2).

Tabla 2. Tabla de comparación entre tipos de conectores para cable coaxial. [18],[19].

Tipo de conector	Pérdidas introducidas	Complejidad de ensamblaje
BNC	0.2 dB a 3GHz	Baja
PL-259/SO-239	0.1 – 0.2 dB	Baja
TIPO N	0.15 dB a 10 GHz	Media
SMA	0.06 dB a 6 GHz	Media
FME	0.1 – 0.3 dB	Media
FME	0.2 – 0.4 dB	Baja
MMCX	0.2 – 0.5 dB	Alta
MC-Card	0.2 – 0.5 dB	Alta
SSMB	0.2 – 0.5 dB	Alta
7-16	0.1 dB	Media

Se recomienda el conector BNC por su baja pérdida de señal (0.2 dB hasta 3 GHz), facilidad de ensamblaje y bajo costo. Aunque otros conectores tienen pérdidas menores a frecuencias más altas, el BNC es más que suficiente para aplicaciones de hasta 1 GHz y es fácilmente accesible en el mercado, lo que lo convierte en la opción más práctica y rentable.

2.1 Longitud del Cable y Compensación

Para el ensamblaje de la sonda, es necesario determinar la longitud del cable, ya que esta característica puede influir en la transmisión de la frecuencia deseada. Una longitud inadecuada puede generar una atenuación notable o un desfase en la señal, ambos aspectos que deben evitarse. Las longitudes comunes para una sonda de osciloscopio varían entre 1 metro, 1.5 metros y 2 metros. Sin embargo, para un rango de frecuencia de hasta 1 GHz, la longitud recomendada es de 1 metro (39 pulgadas). En general, es preferible utilizar la sonda más corta posible que cumpla con los requisitos de medición [20].

La longitud del cable se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{500 \times 10^6} = 0.6 \text{ m} \quad (1)$$

$$L = 2\lambda = 1.20 \text{ m} \quad (2)$$

En la ecuación se asume el valor medio del rango de f de las señales que se va a medir con la sonda de voltaje

y la longitud del cable deber ser un múltiplo par de $\frac{\lambda}{2}$, si se espera que el voltaje en la fuente y en la carga van a ser máximos. Por lo tanto, la longitud recomendada para el cable RG-58 es de 1.2 metros. Sin embargo, dado que el objetivo del estudio es asegurar que la sonda opere de manera efectiva hasta 1 GHz, es importante recalcular la longitud del cable para esta frecuencia máxima.

Para una frecuencia de 1 GHz, la longitud de onda es:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{1 \times 10^9} = 0.3 \text{ m} \quad (3)$$

Así, la longitud del cable sería:

$$L = 2\lambda = 0.6 \text{ m} \quad (4)$$

Este cálculo muestra que, a frecuencias más altas, como 1 GHz, se requiere una longitud de cable más corta (0.6 m) para evitar pérdidas significativas de señal y desfase. Esto resalta la importancia de ajustar la longitud del cable según la frecuencia máxima de operación—en este caso, 1 GHz—para minimizar la atenuación y asegurar mediciones precisas.

2.2 Compensación y cálculos

La compensación en una sonda de osciloscopio se refiere al ajuste necesario para minimizar las distorsiones en la forma de onda medida y asegurar mediciones precisas en todo el rango de frecuencia de interés. Esto implicó replicar mediciones hasta ajustar la capacitancia de la sonda para compensar la capacitancia del cable y la impedancia de entrada del osciloscopio. La incertidumbre en las mediciones se presentaba al cambiar los osciloscopios por las ligeras variaciones de sus capacitancias internas respectivas; sin embargo, se superó al utilizar un solo osciloscopio de marca Tektronix. Un circuito de compensación mal ajustado puede introducir pérdidas significativas, especialmente a altas frecuencias donde la reactancia capacitiva es relevante.

2.3. Consideraciones de Diseño de la Sonda

Al diseñar una sonda de osciloscopio, se deben considerar las siguientes consideraciones:

- **Selección de Materiales:** Elegir cables coaxiales y conectores adecuados que minimicen la

pérdida de inserción y mantengan la integridad de la señal medida.

- **Circuitos de Compensación y Atenuación:** Asegurarse de que los circuitos de compensación y atenuación estén diseñados adecuadamente para evitar pérdidas en la señal medida.

- **Impedancia:** Considerar la impedancia característica requerida y el tipo de apantallamiento para minimizar la interferencia.

- **Pruebas de Rendimiento:** Realizar pruebas de conexión y rendimiento para verificar la respuesta de la sonda a diferentes señales y frecuencias, ajustando la compensación según sea necesario.

2.4. Tipos de Sondas y Cables

El funcionamiento de las sondas de osciloscopio se basa en principios teóricos que incluyen la atenuación de señal y la integridad de la señal. La sonda está destinada a cumplir con los estándares de calidad y rendimiento necesarios para su integración en sistemas de medición electrónica de alta precisión.

Existen varios tipos de sondas, incluyendo:

- **Sondas Pasivas:** No amplifican la señal antes de aplicarla al osciloscopio.

- **Sondas Activas:** Proporcionan amplificación y son necesarias en circuitos con baja capacidad de carga de salida. Requieren una fuente de alimentación para operar.

- **Sondas de Corriente:** Se utilizan para medir corriente, tienen una pinza que se coloca alrededor del cable.

- **Sondas Diferenciales:** Incorporan amplificadores para minimizar el impacto de la sonda en la señal medida.

Cada tipo tiene ventajas y limitaciones, y la elección depende de los requisitos de la aplicación y las condiciones de medición.

Los tipos de cables que se pueden utilizar en una sonda de osciloscopio incluyen:

- **Cable Coaxial Estándar:** Tiene una pérdida de inserción relativamente baja, especialmente a frecuencias más bajas.

- **Cable Coaxial de Baja Pérdida:** Diseñado específicamente para minimizar la pérdida de inserción y mejorar la calidad de la señal a lo largo del cable.

Se destacan los cables coaxiales de alta calidad, que son esenciales para asegurar mediciones confiables y precisas. Además, se enfatiza la importancia de seleccionar cables de baja pérdida y alta calidad para minimizar la pérdida de inserción y asegurar la integridad

de la señal medida. El uso de cables coaxiales con buen apantallamiento ayuda a reducir la captación de señales externas y la interferencia electromagnética.

2.5. Circuito de Compensación

Este es un procedimiento que ajusta la capacitancia eléctrica de la sonda para contrarrestar los efectos de la capacitancia de entrada del osciloscopio. Es necesario compensar correctamente las sondas para garantizar la máxima precisión y linealidad en las mediciones. Una sonda mal compensada puede generar dos tipos de errores: primero, amplitudes incorrectas, ya que una sonda subcompensada o sobrecompensada mostrará variaciones considerables en la amplitud, incluso a bajas frecuencias. Segundo, distorsión en las formas de onda, afectando los tiempos de subida y bajada de señales pulsadas. Estos errores se amplifican a medida que aumenta la frecuencia [9]. La distorsión en las formas de onda afecta los tiempos de subida y bajada de señales pulsadas. Estos errores se amplifican a medida que aumenta la frecuencia.

3. Metodología

El objetivo de este estudio es diseñar y construir una sonda de voltaje pasiva de bajo costo y comparable en su rendimiento con sondas de voltaje comerciales pasivas para un rango de frecuencias de 1 Hz a 1 GHz. La meta es lograr una implementación que minimice la atenuación y la distorsión de la forma de onda, proporcionando lecturas comparables a las de una sonda comercial. Para ello, se analizarán y seleccionarán cuidadosamente los componentes de la sonda, incluidos conectores, cables y elementos de compensación, prestando especial atención a las características técnicas y la relación costo-beneficio.

3.1 Resumen del proceso de fabricación

- **Selección de materiales y componentes:** Se realizó una selección cuidadosa de los materiales y componentes necesarios para la sonda, asegurando que cumplieran con las especificaciones requeridas para un rendimiento óptimo.

- **Cálculos de propiedades:** Se llevaron a cabo cálculos para determinar las propiedades físicas y eléctricas óptimas de los cables. Esto incluyó la elección de la longitud del cable coaxial, calculada mediante la fórmula $\lambda = c/f$, donde λ es la longitud de onda, c es la velocidad de la luz y f es la frecuencia. Además, se determinó la impedancia de la sonda con base en las características del cable y el circuito de compensación, y

se verificó mediante mediciones directas con un analizador de impedancia.

- **Construcción física:** La construcción física de la sonda siguió los diseños establecidos, lo que incluyó la integración de un conector BNC, especialmente diseñado para enlazar el cable coaxial con el osciloscopio.

- **Pruebas de rendimiento:** Se realizaron pruebas para evaluar el rendimiento de la sonda, incluidas pruebas de barrido de frecuencias con el osciloscopio Tektronix de 4 canales, resolución 12 bits, ancho de banda 20 MHz, tasa de muestreo de 10Mm/seg y precisión de CC de 2%. Estas pruebas fueron esenciales para identificar cualquier obstáculo que pudiera afectar la calidad de la señal, como capacitancias parásitas y corrientes de fuga. Durante este proceso, se registraron cuidadosamente los datos de cada prueba, incluidas las frecuencias utilizadas y los resultados obtenidos, para validar la sonda. También se llevaron a cabo pruebas de sensibilidad para analizar cómo la variación en los valores de los componentes afecta el desempeño de la sonda, permitiendo evaluar la tolerancia de diseño y su impacto en la precisión de las mediciones. Se hicieron múltiples pruebas con distintas formas de señal, amplitudes y frecuencias en las sondas de voltaje construidas, y se compararon los resultados con 10 sondas comerciales distintas: 10076C Keysight, R&S® RT-ZP10, SP500o, SP500C, CP500o, CP400x, entre otras, pero no se sacaron estadísticos porque la muestra no era representativa.

- **Comparación de rendimiento:** Finalmente, el rendimiento de la sonda se comparó con un cable de referencia comercial. Esta comparación evaluó aspectos críticos como la precisión de las mediciones y la reducción de interferencias, lo cual permitió validar la efectividad de la sonda diseñada. Además, se realizó una evaluación de estabilidad a lo largo del tiempo, midiendo la respuesta de la sonda en diferentes intervalos durante un periodo de varios días para analizar posibles degradaciones en el desempeño debidas a factores ambientales o envejecimiento de los componentes.

Para el desarrollo del presente estudio sobre sondas de osciloscopio, se decidió construir la sonda lo más similar posible a una sonda comercial. Por esta razón, es necesario implementar un circuito de compensación. El circuito de compensación fue diseñado para proporcionar opciones de atenuación tanto en x1 como en x10. En el ajuste x1, la sonda entrega la señal sin atenuación, preservando su amplitud y fase originales. En contraste, el ajuste x10 introduce un factor de atenuación de 10,

reduciendo la amplitud de la señal para aplicaciones de mayor voltaje. Esta compensación ajustable asegura lecturas de señal precisas en diferentes escenarios de prueba, minimizando la distorsión causada por la capacitancia de la sonda. El circuito de la figura 1 muestra con los valores correspondientes para lograr los factores de atenuación mencionados. [21], [22] y [23]

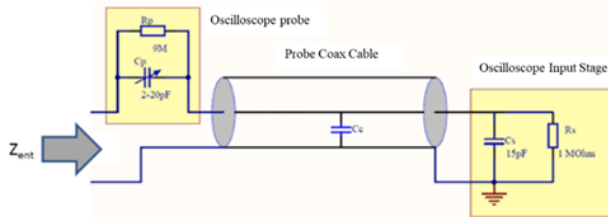


Fig. 1: Circuito de compensación, considerando la impedancia del osciloscopio y la impedancia de la sonda.

Conociendo los valores de los componentes calculados (los correspondientes a la Fig. 1), el circuito de compensación debe implementarse en una placa de baquelita universal. Se recomienda el uso de resistencias de precisión para este propósito, además de un selector que permita el cambio de atenuación entre $\times 1$ y $\times 10$. Es importante notar que el factor de atenuación puede ser mayor a 10, y para este propósito, los valores de los componentes variarían. Luego de construir la sonda con un conector BNC para enlazar el cable coaxial con el osciloscopio, se realizaron una serie de pruebas de rendimiento. Estas pruebas incluyeron barridos de frecuencia de 1 kHz a 1 GHz, con el objetivo de identificar la presencia de capacitancias parásitas, corrientes de fuga y otros factores que afectan la calidad de la señal. Se realizaron mediciones adicionales para verificar la estabilidad de la impedancia de la sonda en diferentes condiciones ambientales y de temperatura, lo que permitió evaluar su confiabilidad a lo largo del tiempo.

Los datos se recolectaron en varias frecuencias para observar la atenuación de la señal y el desfase, con especial atención a la frecuencia de resonancia, que reveló un pico seguido de atenuación al aumentar la frecuencia.

El procedimiento mencionado anteriormente con el cable coaxial RG-58 también se realizó con el cable RG-6 [24], pero con una longitud de 1,57 m y usando el mismo circuito de compensación mencionado en la Fig. 2.

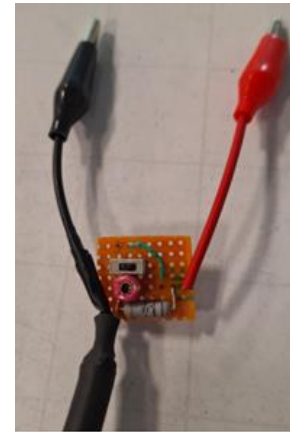


Fig. 2: Circuito de compensación implementado.

4. Resultados y discusión

Para presentar los resultados obtenidos en este estudio, se incluye un registro fotográfico de cada una de las pruebas realizadas con las sondas construidas utilizando los materiales recomendados. Comenzamos con el registro de la sonda fabricada con cable RG-58 y una longitud de 1,2 m, mostrada en la Fig. 3.



Fig. 3: Ensamblaje de la sonda de osciloscopio con selector para atenuación $\times 1$ y $\times 10$.

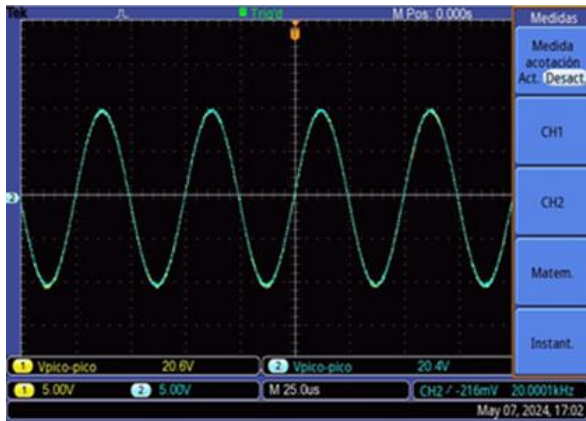


Fig. 4: Comparación con la sonda comercial a 20 kHz y atenuación x1.

La sonda fabricada mostró un rendimiento satisfactorio en comparación con las sondas comerciales. Como se muestra en la Figura 4, la señal a 20 kHz, sin atenuación, coincide estrechamente con la capturada por la sonda comercial, lo que confirma la precisión de la sonda a bajas frecuencias.

Además, como se muestra en la Figura 5, incluso con un factor de atenuación de x10, la sonda mantuvo la integridad de la señal, mostrando desviaciones mínimas. Estos hallazgos están en línea con las consideraciones de diseño descritas en la metodología, particularmente en cuanto a la capacidad de la sonda para manejar diferentes configuraciones de atenuación manteniendo la fidelidad de la señal.

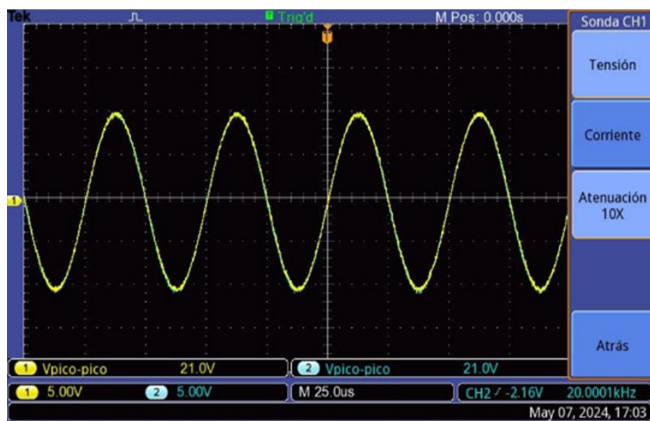


Fig. 5: Comparación con la sonda comercial a 20 kHz y atenuación x10.

Para una comparación más detallada, se realizó un análisis de la respuesta en frecuencia y la distorsión de la señal en la sonda fabricada y en varias sondas comerciales de referencia: 10076C Keysight, R&S® RT-

ZP10, SP500o, SP500C, CP500o, CP400x, entre otras. En el rango de 1 MHz a 1 GHz, se midió la atenuación y el desfase introducidos por las sondas. Los resultados mostraron que la sonda fabricada presentó una atenuación de 0,30 dB a 1000 MHz, mientras que la atenuación promedio de las sondas comerciales osciló alrededor de 0,30 dB en frecuencias menores de 1 GHz. En términos de distorsión de la señal, la sonda fabricada mostró un desfase de 12°, valor similar al de las sondas comerciales, lo que indica que el diseño propuesto ofrece un desempeño competitivo dentro del rango de operación evaluado.

La Figura 6 muestra el efecto de la sobrecompensación de la sonda, lo cual causa picos en los bordes de la señal debido al ajuste excesivo. La Figura 7 muestra el efecto opuesto a la Figura 6, ilustrando la subcompensación de la sonda, lo cual también afecta la precisión de la señal. El efecto de atenuación de la sonda pasiva (reducción de amplitud en un factor de diez) fue exacta a la identificada en las ondas comerciales. La atenuación incorporada incrementó la impedancia de salida de la carga y mejoró el ancho de banda similar a las sondas comerciales. La compensación de la capacitancia de entrada inherente a algunas cargas, como es el caso del osciloscopio, debido a la capacidad eléctrica diseñada para la sonda pasiva, permitió una integridad de la señal medida similar la obtenida en las sondas comerciales. Es necesario compensar correctamente las sondas para garantizar la mejor precisión posible o linealidad en los resultados de la medición [25]; mientras más alta sea la señal de frecuencia, es de suma importancia compensar una sonda.

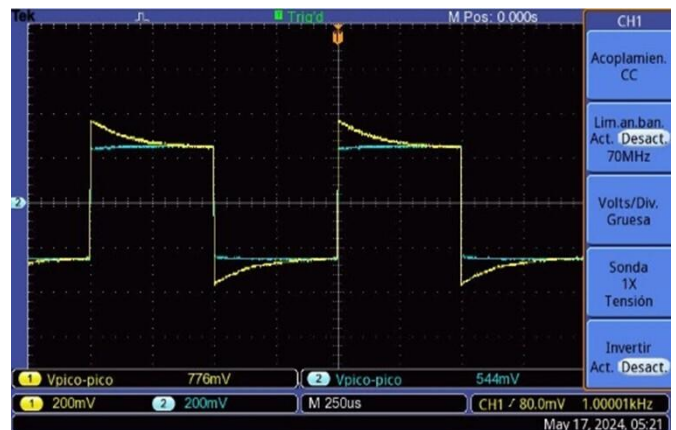


Fig. 6: Resultado de la sobrecompensación de la sonda con el circuito de compensación (condensador variable).

Para evaluar la influencia de la longitud del cable en la impedancia y la atenuación de la señal, se realizaron mediciones comparativas utilizando cables de diferentes longitudes. Se observó que, a medida que la longitud del cable aumentaba, la señal transmitida a una misma frecuencia sufría más atenuación y el desfase de la señal. También se comparó (para la misma frecuencia y longitud del cable) las atenuaciones cuando se utilizaban distintos tipos de cables: En particular, se encontró que para RG-6 se incrementó la atenuación en 0,10 dB si se comparaba con la atenuación en el cable RG-58. Estos resultados demuestran la importancia de diseñar la longitud adecuada, y seleccionar el tipo de cable para minimizar pérdidas y asegurar mediciones precisas en el rango de frecuencia de interés. Las atenuaciones de la señal de prueba en las sondas de voltaje pasivas diseñadas evidenciaron valores similares a las atenuaciones en las sondas comerciales cuando se usaban cables RG-6 y RG-58, lo que arrojó un valor de error de 0.002%

A 25 MHz, la amplitud de la señal se redujo aproximadamente a 19,7 Vpp, en comparación con 20 Vpp a frecuencias más bajas, un fenómeno asociado con la resonancia. Las pruebas también mostraron que las inductancias y capacitancias parásitas introducen pérdidas y distorsiones, especialmente a altas frecuencias, resaltando la importancia de los circuitos de compensación para limitar el ancho de banda y atenuar los componentes de alta frecuencia.

La comparación con las sondas comerciales mostró que, aunque la sonda fabricada tiene un rendimiento comparable, presenta sobrecompensación a frecuencias altas, un problema similar al de las sondas comerciales. Esto subraya la necesidad de evaluar el comportamiento de la sonda en diferentes frecuencia para asegurar mediciones precisas.

El análisis de la línea de transmisión y la simulación previa a la construcción confirmaron que el diseño propuesto cumplía con las expectativas, facilitando su implementación y evaluación en condiciones reales. Para la simulación del circuito compensado (Fig. 7), se utilizó el software LTSpice, con el cual se modelaron los efectos de la capacitancia de compensación, la impedancia de entrada del osciloscopio y las pérdidas en el cable coaxial. Los resultados obtenidos en la simulación (Fig. 8) fueron comparados con los valores experimentales, mostrando una correlación del 95% en la respuesta de atenuación y fase dentro del rango de 1 MHz a 1 GHz, validando así la precisión del modelo teórico utilizado en el diseño [26].

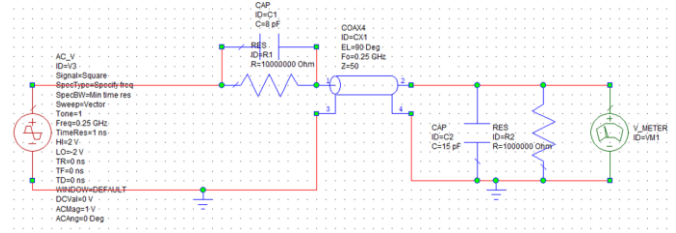


Fig. 7: Simulación de un circuito compensado conectado al cable coaxial.

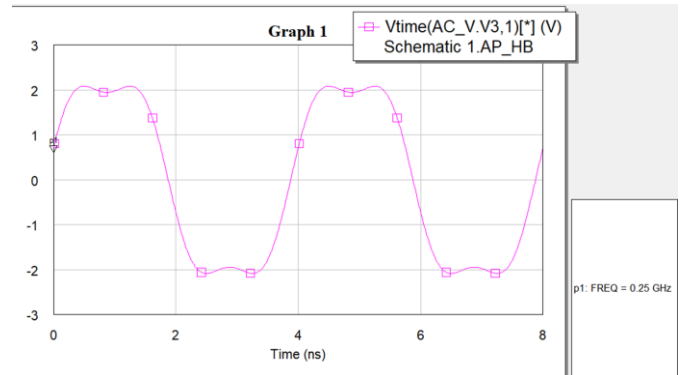


Fig. 8: Resultado de la simulación.

Algunas limitaciones identificadas en el estudio consistieron en las variaciones de las mediciones cuando se hacia los barridos de frecuencia en diferentes osciloscopios de diferentes marcas: R&S, Keysight, Testec y Hantek, debido al efecto de carga por la diferencia en la resistencia y capacitancia de entrada y ancho de banda. Cuando se tienen diferentes osciloscopios, las sondas de osciloscopio pueden afectar las señales de varias maneras, porque la resistencia de entrada, la capacitancia y el ancho de banda de una sonda determinarán los cambios que impone a la señal que está transmitiendo al osciloscopio [27]. La impedancia del circuito y la impedancia de entrada del osciloscopio juntas producen un filtro paso bajo. Para frecuencias muy bajas, el condensador actúa como un circuito abierto y tiene poco o ningún efecto en la medida. Para frecuencias altas, la impedancia del condensador se vuelve significativa y carga el voltaje visto por el osciloscopio. La carga también afecta la respuesta del osciloscopio a un cambio de paso en la tensión. La carga debida a la impedancia de entrada del osciloscopio (y la capacitancia de la sonda) se puede dividir en dos partes: Carga resistiva y carga capacitiva. La carga resistiva se debe completamente a la resistencia de entrada del osciloscopio, mientras que la carga capacitiva se debe a la capacitancia de la sonda combinada con la capacitancia de entrada del osciloscopio [28]. El ancho de banda y el

tiempo de incremento de un sistema están inversamente relacionados. Dado que el ancho de banda del instrumento está disminuyendo efectivamente, los tiempos de subida y bajada de las entradas de pulso se incrementarán.

Algunas sugerencias para mejorar la sonda de voltaje en futuras versiones son: utilizar capacitores más sensibles a los cambios y con mayores rangos de compensación de capacitancia de manera que se pueda ajustar con precisión y cancele la capacitancia de entrada del osciloscopio [29]; además, es necesario seleccionar cables con mayores calibres para ampliar el rango de voltajes de entrada mayores a pequeñas señales, que son las que frecuentemente se utilizan en electrónica [30].

5. Conclusiones

La construcción de una sonda de osciloscopio es fundamental, especialmente en escenarios donde no se dispone de sondas comerciales de alta calidad. Este estudio enfatiza que la selección correcta de materiales y la implementación de un circuito de compensación adecuado son cruciales para obtener resultados precisos, como se demostró en las pruebas con el cable RG-6 (ver Figura 7).

La capacidad de fabricar sondas de osciloscopio puede ser una solución rentable, ofreciendo herramientas valiosas que pueden igualar o incluso superar la calidad de las alternativas comerciales cuando se construyen con atención al detalle y precisión. Los hallazgos clave del estudio destacan la necesidad de utilizar componentes de alta precisión para mantener la integridad de la señal y minimizar el ruido, asegurando así la exactitud de las mediciones.

El proceso de diseño abarcó un enfoque integral, desde la selección de materiales hasta pruebas rigurosas, que confirmaron el cumplimiento de los estándares de calidad. Las pruebas continuas revelaron oportunidades de mejora, subrayando la importancia de la investigación y el desarrollo constantes en el campo de la instrumentación electrónica.

Si bien la sonda fue diseñada para operar hasta 1 GHz, los resultados experimentales presentaron un máximo de 980 MHz debido a las limitaciones del equipo de medición disponible. No obstante, la tendencia observada en la respuesta en frecuencia sugiere que el diseño seguiría siendo funcional hasta 1 GHz con un comportamiento predecible. Estudios futuros podrían

ampliar estas pruebas con instrumentos de mayor ancho de banda para validar completamente el desempeño en el límite superior de frecuencia.

Además, este trabajo contribuye al avance de la instrumentación electrónica al proporcionar un diseño de sonda adaptable a diversas aplicaciones. Más allá de la validación experimental, la sonda construida puede utilizarse en el análisis de señales de alta frecuencia en sistemas de telecomunicaciones, pruebas en circuitos de radiofrecuencia y caracterización de dispositivos electrónicos en laboratorios de investigación y desarrollo. Su diseño modular y su bajo costo la hacen una alternativa viable para entornos educativos y de prueba donde el acceso a sondas comerciales de alto desempeño es limitado.

En general, el desarrollo y las pruebas de la sonda diseñada demostraron un rendimiento comparable al de las sondas comerciales, con una capacidad significativa para reducir la interferencia y mantener la precisión en las mediciones. La investigación metodológica no solo facilitó la identificación de áreas de mejora, sino que también estableció una base sólida para futuros avances en la tecnología de medición eléctrica.

REFERENCIAS

- [1] J. Chang y K. Johnson, "Cómo elegir las mejores sondas de osciloscopio pasivas y activas para sus tareas", *REE*, pp. 52–54, jun. 2011, Consultado: el 11 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://euloxio.myds.me/dok/manual/lab/como_elegir_sondas_52.pdf
- [2] *SONDAS*, Tektronix. La sonda. Sonda, 2010, vol. 2, pág. 2.
- [3] Moench, S., Hillenbrand, P., Hengel, P. y Kallfass, I. (octubre de 2017). Medición pulsada de HEMT de GaN de 600 V con conmutación de subnanosegundos a 1000 V/ns utilizando una sonda de voltaje de baja impedancia de 1,5 GHz y un osciloscopio de 50 ohmios. Quinto taller del IEEE de 2017 sobre dispositivos y aplicaciones de potencia de banda ancha (WiPDA) (págs. 132-137). IEEE.
- [4] Rosenov, E., Kovachev, D., Marinov, A. y Nikolov, N. (mayo de 2016). Comparación entre sondas de tensión pasivas y activas en mediciones de pérdida de potencia para componentes electrónicos de potencia. XIX Simposio Internacional sobre Aparatos y Tecnologías Eléctricas (SIELA) de 2016 (págs. 1-4). IEEE.

- [5] Pittala, MVP, Karri, DP, Prabha, S., Dsa, D., Pradhan, L. y Kshirsagar, A. (diciembre de 2023). Sonda diferencial aislada de alto voltaje y ultrabajo coste para la enseñanza y la formación. En la Conferencia Internacional IEEE de 2023 sobre Electrónica de Potencia, Redes Inteligentes y Energías Renovables (PESGRE) (pp. 1-6). IEEE.
- [6] Johnson, K. y Maliniak, D. (2018). Sondas de osciloscopio para electrónica de potencia: Asegúrese de elegir la sonda adecuada para obtener mediciones precisas. *Revista IEEE Power Electronics*, 5 (1), 37-44.
- [7] Grubmüller, M., Schweighofer, B. y Wegleiter, H. (junio de 2018). Una sonda digital aislada de alta tensión para mediciones en electrónica de potencia. En el 27.º Simposio Internacional sobre Electrónica Industrial (ISIE) del IEEE de 2018 (pp. 791-796). IEEE.
- [8] Chang, JY (2008). Ocho consejos para una mejor evaluación del alcance. *EE: Evaluation Engineering*, 47 (1).
- [9] Chauvin, J., Chatroux, D., Garnier, L., Azais, P. y Vincent, R. (mayo de 2023). Sondas de tensión y corriente de alta frecuencia para medición a distancia con un osciloscopio. En PCIM Europe 2023, Exposición y Conferencia Internacional de Electrónica de Potencia, Movimiento Inteligente, Energías Renovables y Gestión Energética (págs. 1-6). VDE.
- [10] Rohde & Schwarz (2024). Rohde Schwarz probes for oscilloscopes. https://www.rohde-schwarz.com/lat/productos/prueba-y-medicion/sondas-de-oscilloscopios_229530.html#:~:text=Una%20sonda%20de%20osciloscopio%20es,que%20establece%20la%20conexi%C3%B3n%20el%C3%A9ctrica.
- [11] I. Fernández, M. Alberro, J. Montalbán, A. Arrinda, I. Angulo, y D. de la Vega, "A new voltage probe with improved performance at the 10 kHz–500 kHz frequency range for field measurements in LV networks," *Measurement*, vol. 145, pp. 519-524, 2019. DOI: doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.106.
- [12] A. Jósko, B. Dziadak, J. Starzyński, y J. Sroka, "Derivative Probes Signal Integration Techniques for High Energy Pulses Measurements," *Energies*, vol. 15, no. 6, p. 2244, 2022. DOI: [10.3390/en15062244](https://doi.org/10.3390/en15062244).
- [13] K. Haga and K. Chujo, "High-frequency Active Probe for Oscilloscope with Optimum Design," *SICE-ICCSE International Joint Conference*, 2006, pp. 1-6, DOI: [10.1109/SICE.2006.315307](https://doi.org/10.1109/SICE.2006.315307).
- [14] E. Rosenov, D. Kovachev, A. Marinov, y N. Nikolov, "Comparison Between Passive and Active Voltage Probes in Power Loss Measurements for Power Electronic Components," 2016 IEEE International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), Varna, Bulgaria, 2016, pp. 1-6, DOI: [10.1109/SIELA.2016.7543039](https://doi.org/10.1109/SIELA.2016.7543039).
- [15] "Designing a low capacitance and low-cost active probe," *Proceedings of the Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications*, 2008. [Online]. Available: DOI: [10.1109/RPIC.2015.7497056](https://doi.org/10.1109/RPIC.2015.7497056).
- [16] Fang, W., Qiu, H., Luo, C., Wang, L., Shao, W., Shao, E., ... y En, Y. (2018). Detección de voltaje de RF sin contacto de una traza impresa mediante una sonda acoplada capacitivamente. *IEEE Sensors Journal*, 18 (21), 8873-8882.
- [17] FARNELL (2024). Datasheet RG-58. <https://www.farnell.com/datasheets/2095749.pdf>
- [18] WiMo (2024). The best coaxial cables and connectors for hams and industry. <https://www.wimo.com/es/cables-y-conectores/>
- [19] Data Alliance (n.d.). Insertion loss in connectors and adapters. <https://es.data-alliance.net/connectors-adapters-insertion-loss/>.
- [20] Su, W., Li, H., Liu, X., Ji, C. y Wang, Z. (mayo de 2024). Método de modelado de fuentes de EMI considerando el modelo preciso de la sonda de voltaje basado en pruebas de EMI conducidas CISPR25. En la 10.ª Conferencia Internacional de Electrónica de Potencia y Control de Movimiento del IEEE de 2024 (IPEMC2024-ECCE Asia) (págs. 4971-4974). IEEE.
- [21] Ovidiu-Catalin, B., Munteanu, RA, Leon, B., Iudean, D., Alexandru, R. y Paul, P. (junio de 2021). Modelado y simulación de una PCB de compensación para sondas de osciloscopio. 16.ª Conferencia Internacional sobre Ingeniería de Sistemas Eléctricos Modernos (EMES) de 2021 (pp. 1-4). IEEE.
- [22] Rohde & Schwarz (2024). What probe compensation consists of. https://www.rohde-schwarz.com/es/productos/test-y-medida/essentials-test-equipment/digital-oscilloscopes/en-que-consiste-la-compensacion-de-sonda_254520.html#gallery-8
- [23] Reflections of an Engineer (2013). How to design a passive oscilloscope probe (part II). <https://maladiets.blogspot.com/2013/10/como-disenar-una-sonda-pasiva-de-osciloscopio.html>
- [24] ALLDATASHEETS.ES (2024). Datasheet RG6A-U. <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/492940/PASTERNA/CK/RG6A-U.html>
- [25] Li, H., Gao, Z., Chen, R. y Wang, F. (2022). Prueba de doble pulso mejorada para una caracterización dinámica precisa de dispositivos de SiC de media tensión. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38 (2), 1779-1790.

[26] M. Kaczmarek, T. Szatilo, "Reference voltage divider designed to operate with oscilloscope to enable determination of ratio error and phase displacement frequency characteristics of MV voltage transformers" *Measurement* (02632241). May2015, Vol. 68, p22-31. 10p. doi: 10.1016/j.measurement.2015.02.045

[27] K. Johnson and J.-Y. Chang, 'Choose the best passive and active oscilloscope probes for your tasks', *Electronic Design*, vol. 59, no. 12, 2011. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-81455138193&partnerID=40&md5=cc9e6b40843bc7f9a59b05ae501d2afe>

[28] H. Heo, et al., "Design and test of a fast capacitive high voltage probe," 2009 IEEE Pulsed Power Conference, Washington, DC, USA, 2009, pp. 1345-1347, doi: 10.1109/PPC.2009.5386404. keywords: {Testing;Probes;Pulse generation;Capacitance;Voltage measurement;Capacitors;Electrodes;Power generation;Oscilloscopes;Power system simulation}.

[29] J. Ludeña-Choez, et al., Capacitance sensitivity study of interdigital capacitive sensor based on graphene for monitoring Nitrates concentrations, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 202, 2022, 107361, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107361>.

[30] A. Delgard, et al. Interacciones de Coulomb e inercia cuántica efectiva de los portadores de carga en un conductor macroscópico. *Física Rev. B.* 104, L121301 (2021). <https://doi.org/10.1103/physrevb.104.1121301>