

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SONDA DE PRUEBA ACTIVA PARA EQUIPO DE BAJA IMPEDANCIA DE ENTRADA

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ACTIVE TEST PROBE FOR LOW INPUT IMPEDANCE EQUIPMENT

Omar Alfonso Hernández Mata

TecNM / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, México
ing.omaralf@gmail.com

Jesús Ezequiel Molinar Solís

TecNM / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, México
jemolinars@itcg.edu.mx

José Refugio Villaseñor Salvatierra

TecNM / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, México
joseref@msn.com

Rafael Anguiano Frias

TecNM / Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán, México
rafael.anguiano.f@gmail.com

Recepción: 28/octubre/2019

Aceptación: 23/noviembre/2019

Resumen

Una sonda es un dispositivo esencial en los instrumentos de medición como osciloscopios, multímetros y otros instrumentos. En la actualidad existen diferentes tipos de sondas cumpliendo cada una de ellas tareas diferentes dependiendo de sus características para las cuales fueron fabricadas, por ejemplo: voltaje en alterna, frecuencia, corriente, capacitancia, inductancia, etc. Para este caso de estudio la unidad a medir es voltaje a frecuencia media, de forma tal que se garantice una medición limpia en el circuito con la no afectación del mismo, por tal razón se diseñó un prototipo de una sonda activa alcanzando un rango de ancho de banda que va desde 10 kHz a ~445 MHz, con baja capacitancia de entrada, baja distorsión armónica y con una atenuación de 1:2; usando componentes de bajo costo y factibles de conseguir. Este diseño tiene como objetivo probarse y utilizarse en un laboratorio experimental para fines de estudio y enseñanza.

Palabras claves: Ancho de banda, distorsión armónica, frecuencias medias, medición, sonda activa.

Abstract

A probe is an essential device in measuring instruments such as oscilloscopes, multimeters and other instruments. Currently, there are different types of probes, each of them fulfilling different tasks depending on their characteristics for which they were manufactured, for example: AC voltage, frequency, current, capacitance, inductance, etc. For this case study, the unit to be measured is voltage at medium frequencies, in such a way that a clean measurement is guaranteed in the circuit with no impact, for this reason a prototype of an active probe was designed reaching a wide range of band that goes from 10 kHz to ~ 445 MHz, with low input capacitance, low harmonic distortion and with an attenuation of 1:2; using inexpensive and feasible components. This design is intended to be tested and used in an experimental laboratory for study and teaching purposes.

Keywords: Active probe, average frequencies, bandwidth, harmonic distortion, measurement.

1. Introducción

Las sondas son un instrumento esencial en un osciloscopio a la hora de hacer una medición, porque hacen posible la conexión tanto física como eléctrica [Chang, 2011]. La sonda interactúa directamente con la señal que se desea capturar, por lo tanto, la eficacia de la medición estará restringida de acuerdo a la calidad y elección de la sonda.

Se requiere siempre considerar tanto las especificaciones del osciloscopio, de la sonda, del circuito bajo prueba y tipos de la señal a medir [Usunáriz, 3], porque una mala elección en la sonda para cierto tipo de señal, podría afectar al circuito bajo prueba, como al instrumento de medición.

Es necesario tener presente que, “la sonda debe de tener un impacto mínimo en el circuito al que se conecta y mantener una fidelidad de señal adecuada para las medidas que se desea obtener” [Usunáriz, 3].

La importancia de conocer diseños de sondas activas, permite trabajar de forma segura, ahorrando tiempo en su implementación (aplicación) y sus representaciones.

Los parámetros que se deben tener en cuenta al momento de su diseño son los siguientes:

- **Rango dinámico de tensión máxima**, ya que este dependerá de los componentes activos de la cual estará conformada, estos mismos componentes limitaran dicho rango y esto se debe a la distorsión o capacitancias parasitas que surgen al haber un aumento de la frecuencia y de la tensión de entrada, esto afectaría a la fidelidad de la señal bajo prueba;
- **Distorsión armónica**, también conocida como distorsión de amplitud, “el término de distorsión de amplitud se utiliza cuando se estudia la señal desde el dominio del tiempo, y el de distorsión armónica cuando se piensa en la señal en términos del dominio de la frecuencia” [Malvino, 1990]. La distorsión armónica se genera en la transición de la señal de entrada con respecto a la salida en el momento que las frecuencias comienzan a ser más altas, por los tiempos de respuesta natural del circuito en la frecuencia.
- **Ancho de banda**, se define como la frecuencia máxima de una señal senoidal o ganancia de voltaje máximo que un sistema puede alcanzar sin reducir la amplitud por debajo del 70.7% de su valor real, también conocido como (punto de -3 dB) [Boylestad, 2009]. El ancho de banda se mide entre los puntos de frecuencia inferior y superior, donde la amplitud de la señal cae a -3 dB por debajo de la frecuencia de paso-banda, y esto se debe a los capacitores de acoplamiento. “Arriba de la banda media, las capacitancias internas y parasitas hacen que disminuya la ganancia de voltaje” [Malvino, 1990]. En frecuencias más allá del punto -3 dB, las amplitudes de señal pasan a ser demasiado atenuadas y los resultados de las medidas dejan de ser fiables.

En este trabajo el diseño que se propone, busca cumplir que los parámetros antes mencionados estén dentro de los rangos permitidos, también asegurar un rango

dinámico de tensión de 1 volt y una capacitancia de entrada baja, que sea de bajo costo y fácil de implementar, ya que este diseño será utilizado en laboratorios experimentales para fines de estudio y enseñanza. Por tal motivo se orienta a conocer la construcción, componentes, tipos de prueba de medición, que optimicen su trabajo y generen resultados fidedignos.

Trabajos Relacionados

La investigación realizada toma en cuenta información contenida en documentos, foros y artículos basados en la construcción de sondas activas.

Se analizaron diversos documentos. Un artículo publicado en el año 2004, en el cual se propone un diseño de sonda activa de 1 GHz de ancho de banda, utilizando un Mosfet BF998 de doble puerta [Jewsbury, 2004], otro texto reportado en la IEEE en donde se expone el diseño de una sonda activa de baja capacitancia y bajo costo, haciendo uso de Mosfet BF966 de doble puerta [Zola, 2015], así como también otra propuesta de diseño de una sonda activa de bajo costo con una ancho de banda de 1 GHz usando el Mosfet BF998 de doble puerta [Hirschbuechler, 2016], siguiendo con la revisión de documentos relacionados con el tema a investigar, en Septiembre 2017 en un foro (Online), se revisa una cita en la cual presenta el diseño de una sonda activa de bajo costo con un ancho de banda de 500MHz, utilizando un Amp-Op OPA659 [7, SF].

2. Métodos

Una sonda activa debe de tener ciertas características que la diferencien de otras dependiendo de su aplicación, y esta debe cumplir con ciertos márgenes en sus parámetros para poderse emplear como es debido [Chang, 2011].

A continuación, se presentan las partes de la metodología utilizada para el proceso de la implementación de sonda activa.

Elección de los Dispositivos RF

En esta sección se investigan los posibles componentes activos que cumplan con características esenciales, necesarias para el objetivo expuesto, tomando como

base los documentos reportados anteriormente en la sección de trabajos relacionados. Haciendo uso de los siguientes componentes activos:

- BJT 2N5109
- Amp-Op OPA659
- BF998

El BJT 2N5109 en configuración seguidor emisor, el Amp-Op OPA659 en configuración seguidor de tensión y por último el Mosfet BF998 en configuración seguidor fuente.

Después de algunas pruebas preliminares a cada uno de los componentes con la finalidad de estudiar el comportamiento y alcance de cada uno de ellos, para con certeza poder identificar y elegir cuál sería el idóneo para la realización de dicha sonda activa.

A la vez se hace uso de una sonda activa comercial 1124A HP de 100 MHz de ancho de banda, para poder hacer comparaciones y obtener resultados fiables.

En la figura 1 muestra la medición del parámetro S21, haciendo uso de Analizador de redes Modelo: E5062A 300 kHz – 3 GHz para medir el coeficiente de transmisión directa o ancho de banda. Como se puede apreciar, el Amp-op OPA659 es el que muestra mayor estabilidad y mayor rango de ancho de banda, antes de caer a -3dB permitidos.

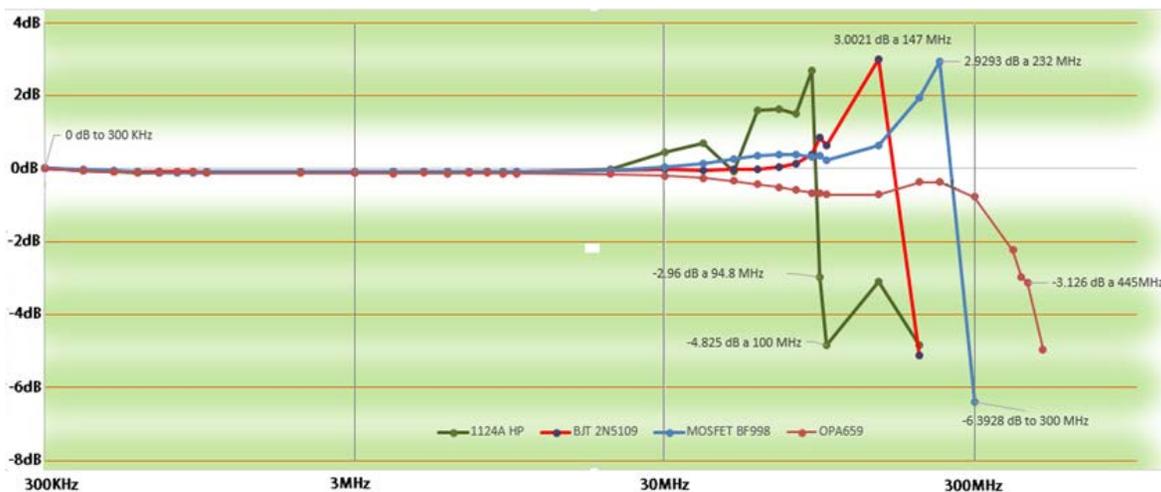


Figura 1 Medición de coeficiente de transmisión directa o ancho de banda.

Se opta por utilizar el OPA659 [Texas Instruments, 2015] de banda ancha máxima de 650 MHz, con ganancia unitaria estable, de entrada JFET, con excelente THD, con una salida alta de corriente de 70 mA y un Slew Rate de 2550 V/ μ s, encapsulado DRV de 5 pines, SMD (SOT-23).

Diseño

En la figura 2 se muestra el esquema utilizado bajo prueba, realizado en el Software LTSpice IV y simulado en el mismo.

Se parte de una configuración básica seguidor de tensión, en la que se conectan en paralelo 6 capacitores de diferente valor a la fuente de alimentación del Amp-op, con el objetivo de suprimir los ruidos que se pudiesen generar. El Op-Amp se alimenta con ± 5 Vcd, la señal a medir o reproducir es un 1 Vp a frecuencia variable, teniendo a la entrada un capacitor de acoplamiento (C_{IN}), también una resistencia de polarización (R_{IN}) que estará en paralelo con la resistencia de entrada del dispositivo, como consecuencia prevaleciendo el valor de la más pequeña y por último una resistencia de 50 Ω a la salida (R_1), simulando la carga.

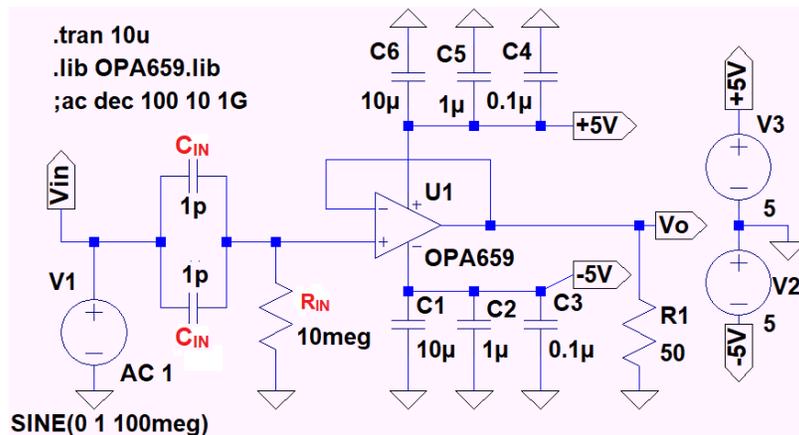


Figura 2 Esquema básico de Op-Amp modo seguidor de tensión.

Simulación

Se lleva a cabo la simulación del circuito de la figura 2, haciendo uso del Software LTSpice IV, realizando mediciones para observar y analizar el comportamiento de

la señal y así tener una previa idea de la respuesta a obtener de la sonda a implementar. Teniendo presente que la respuesta física real de un circuito electrónico se diferencia de un circuito simulado, debido a que, el simulador hace un análisis de un circuito ideal a diferencia de las anomalías existentes desde la fabricación de los componentes como de la PCB.

En la figura 3 se muestra el circuito con un capacitor en serie a la entrada que tendrá la función de acoplar la señal de AC y una resistencia de descarga (R_{IN}) en paralelo con la fuente de alimentación de alterna, que será el camino por donde el condensador pueda hacer las descargas, favoreciendo el proceso de cambio de voltaje de la señal.

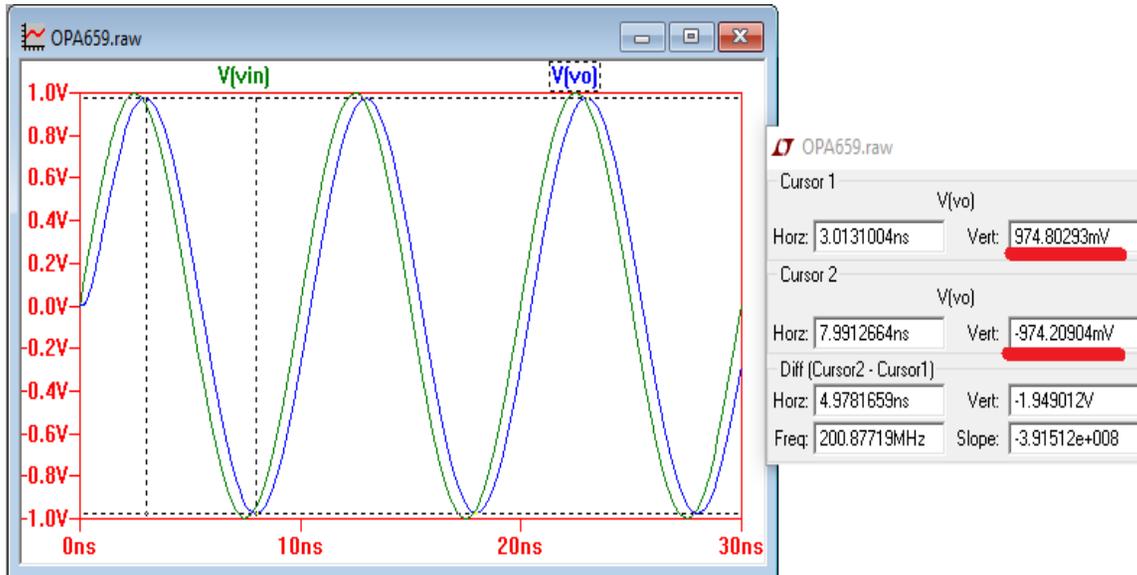


Figura 3 Respuesta en el dominio del tiempo.

Al no contar con esta resistencia de descarga y debido a la alta impedancia del Amp-Op, el capacitor (C_{IN}), no tendría un camino por donde descargarse y por ende el condensador se mantendría siempre cargado, el voltaje de salida nunca cambiaría con respecto a las variaciones de la señal de entrada. Por tal razón, se requiere que dicho capacitor sea de valor muy bajo en el rango de pico faradios, para que el voltaje de carga de la señal que atraviesa tal capacitor no quede almacenado por mucho tiempo y se comporte como un circuito cerrado.

A la salida en (V_o) se tiene una resistencia (R_1) con un valor de 50Ω , simulando la carga, ya que esta sonda activa será implementada para equipos de baja impedancia.

Durante el procedimiento de simulación se hacen las mediciones de los siguientes parámetros: Respuesta en el dominio del tiempo, ancho de banda, distorsión armónica y slew rate.

Simulación en el Dominio del Tiempo

La figura 3 determina de qué manera se comporta la señal en el tiempo, se hace notorio como la salida sigue a la entrada, perdiendo amplitud y presentando desfaseamiento en la señal de salida con respecto a la entrada, debido al aumento de la frecuencia. Teniendo en la entrada $1 V_p$ a una frecuencia de 100 MHz.

Simulación de Respuesta en Frecuencia

Al haber un condensador de acople y una resistencia externa para la descarga del mismo, se controla una frecuencia de corte en bajas frecuencias y esta dependerá de (C_{IN} y R_{IN}), por lo tanto, la ganancia en la banda media seguirá siendo la unidad. Una vez calculada la frecuencia de corte, se simula el circuito apreciándose en la figura 4 el ancho de banda, que demuestra el rango de operación del circuito de forma confiable, obteniendo una ganancia máxima de voltaje que se podría alcanzar. Se observa que la ganancia máxima va desde 8 kHz a 470 MHz, verificándose que a frecuencias mayores la ganancia decrece y cae a -3 dB o esta se atenúa al 70.7% de su amplitud original, [Malvino, 1990] ya no siendo confiable la lectura por debajo de este valor señalado.

Simulación de FFT

En la figura 5 se aprecian los armónicos resultantes, múltiplos de la frecuencia fundamental, este se mantiene dentro del rango permitido no rebasando los límites de pérdida de potencia, medidos en dB, manteniendo su linealidad. La figura 6 se muestra prueba del slew rate (SR), obteniendo el rango máximo de cambio de tensión de salida con respecto a la de entrada, observando el comportamiento de la

velocidad de carga y descarga del condensador respecto al cambio de la frecuencia, que esta velocidad de cambio dependerá del valor en la capacitancia que haya a la entrada del dispositivo, ya que entre más pequeño sea su valor más rápido será el cambio, comportándose este como si fuese un circuito cerrado. Para esta prueba se simulo a 1 MHz, con una capacitancia de entrada de ~2 pF y 1 Vp de entrada.

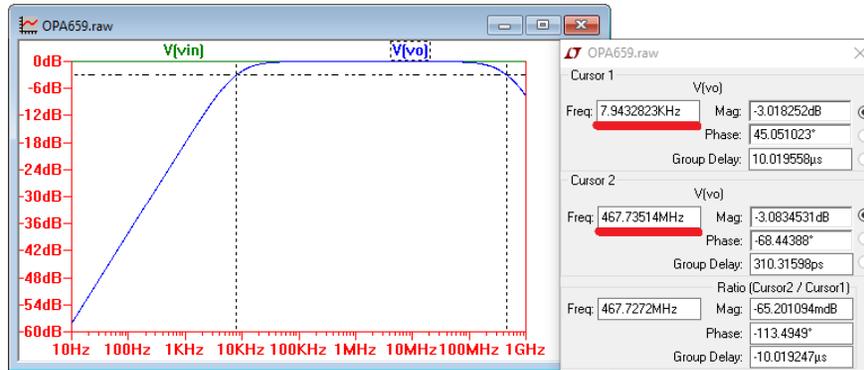


Figura 4 Ancho de banda.

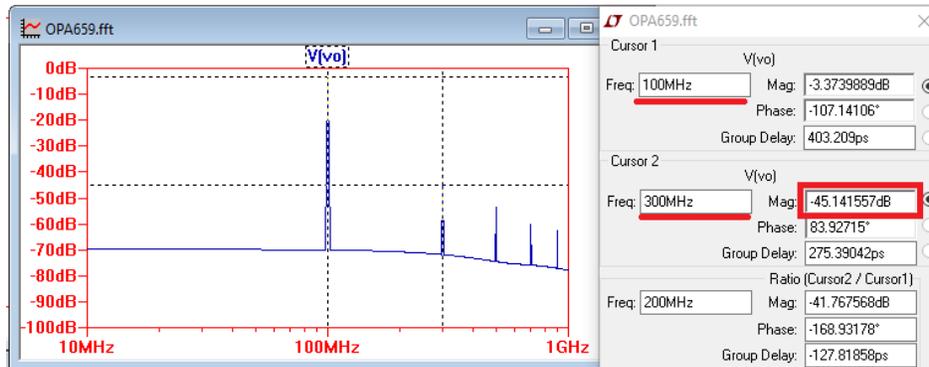


Figura 5 Distorsión armónica.

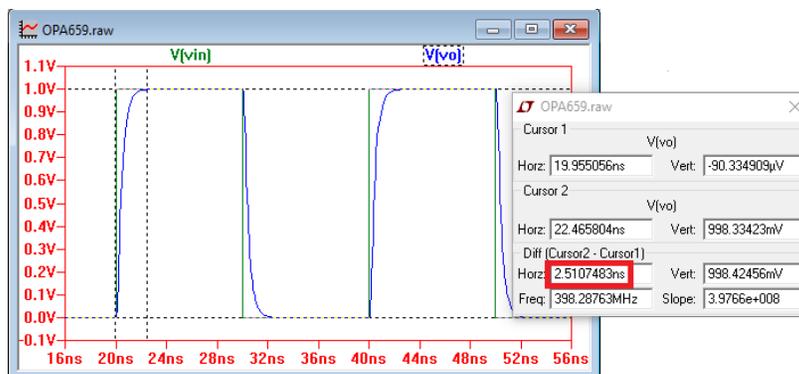
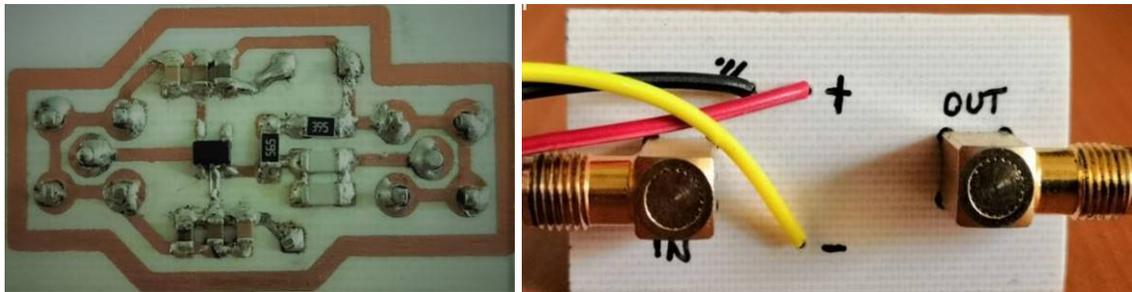


Figura 6 Simulación del slew rate (SR).

3. Resultados

Armado, Conexión y Medición en Laboratorio

El esquema final figura 3 fue el implementado en forma física, usando componentes SMD siendo los convenientes para uso en frecuencias medias a altas, porque atenúan las reactancias parasitas resultantes al hacer mediciones en este rango de frecuencias, gracias a su menor tamaño [Johnson, 1993], [Zola, 2015]. En la figura 7 se muestra el diseño del circuito impreso.



a) Vista inferior

b) Vista superior

Figura 7 Circuito impreso con componentes montados.

El circuito se arma con los componentes electrónicos mencionados en la simulación, que son los siguientes:

- Baquelita de cobre y fibra de vidrio (3.5 x 2 cm)
- Resistencias SMD; 5.5 y 3.9 M Ω
- Capacitores SMD 2 (10 uf), 2 (1 uf), 2 (0.1uf), 2 (1 pf)
- Amp-Op OPA659 como dispositivo principal en modo (seguidor de tensión)
- Conectores de lanzamiento de alta frecuencia SMA (hembra)

Teniendo como característica un valor de diseño y en cuanto a mediciones una diferencia mínima en los resultados.

Se hace el uso de cable RG-174 como parte de la sonda y medio de transmisión de la señal, teniendo en sus terminales conectores SMA y BNC, que hacen la conexión física en las pruebas realizadas entre Generador de señales – sonda activa – Osciloscopio u/o analizador de redes.

Aparatos de Apoyo para la Realización de Pruebas a Sonda Implementada

Los siguientes aparatos fueron necesarios para la obtención de muestras de señales y visualización de comportamiento de las mismas, al igual de alimentación para el funcionamiento de la sonda activa.

- Osciloscopio Agilent Technologies DSO7034A 350 MHz
- Analizador de redes Modelo: E5062A 300 kHz – 3GHz
- Generador de señales de 240 MHz de ancho de banda Tektronix AFG 3251.
- Fuente de voltaje Agilent Modelo E3630A (Triple Output DC Power Supply)

Mediciones y Datos Obtenidos en Laboratorio

La figura 8 muestra la medición del parámetro S21, haciendo uso de Analizador de red Modelo: E5062A 300 kHz – 3GHz para medir el coeficiente de transmisión directa o ganancia con la tensión directa, apreciando el ancho de banda que alcanza, alrededor de los 445 MHz después de caer a -3 dB.

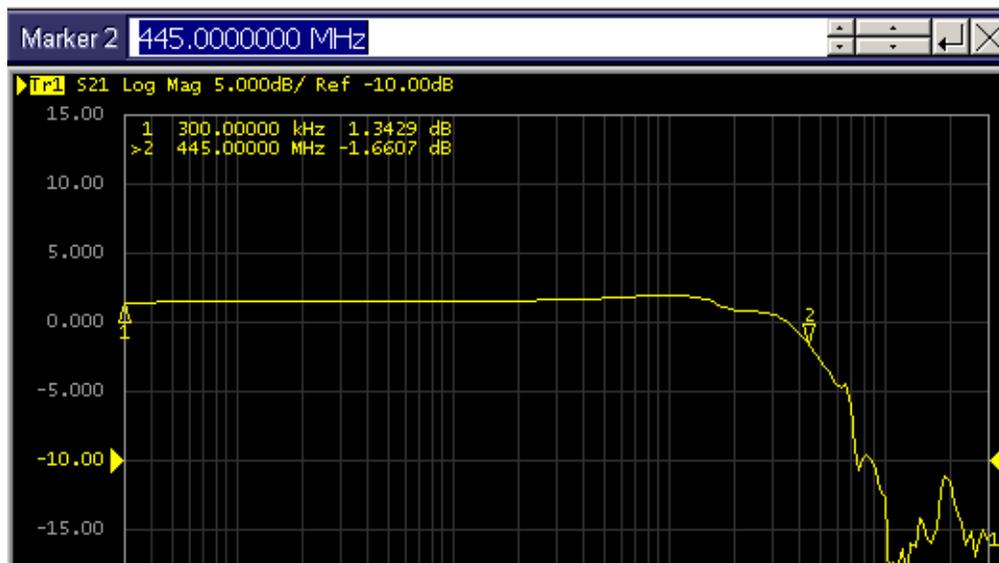


Figura 8 Medición de coeficiente de transmisión directa o ancho de banda de OPA659.

La figura 9 se aprecia la respuesta en el dominio de tiempo, es notorio el seguimiento de la señal de salida con respecto a la entrada, con una atenuación de 1:2, a 2 MHz y 1 Vp de entrada.



Figura 9 Respuesta en dominio del tiempo.

En la figura 10 se aprecia la linealidad de la sonda implementada y el bajo ruido generado por la misma, trabajando a 220 MHz con 1 Vp de entrada.

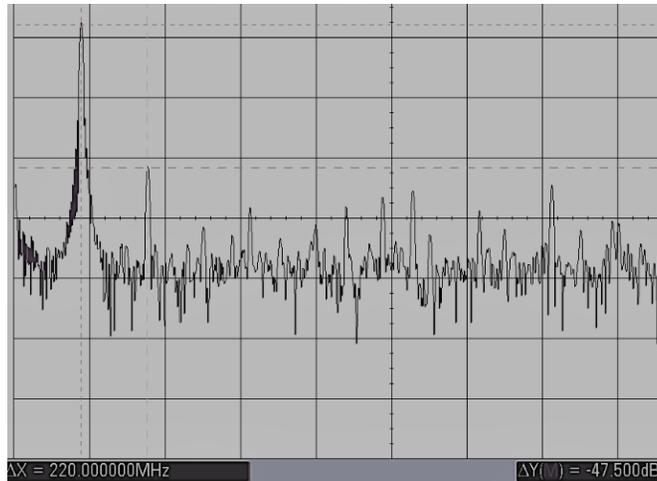


Figura 10 Distorsión armónica.

La medición de linealidad se llevó a cabo haciendo uso de ecuación 1.

$$THD = \frac{\sum P1 + P2 + P3 \dots}{P0} \quad (1)$$

Donde:

THD : Distorsión armónica total.

P0 : Potencia de la frecuencia fundamental.

- P_1 : Potencia del primer múltiplo derivado de la frecuencia fundamental.
- P_2 : Potencia del segundo múltiplo derivado de la frecuencia fundamental.
- P_3 : Potencia del tercer múltiplo derivado de la frecuencia fundamental.

Una vez obtenido el resultado total de potencia armónica (THD), se hace uso de ecuación 2.

$$20 \log \left(\frac{V_{out}}{V_{in}} \right) = dB \quad (2)$$

Donde:

- V_{out} : Voltaje de salida.
- V_{in} : Voltaje de entrada.
- dB : Decibel.

Y así poder calcular la potencia, respetando no rebasar el 1% permitido, que serían -40 dB, ya que toda potencia total por debajo de este valor, los dispositivos van perdiendo su linealidad. En la figura 11 se aprecia la sonda implementada puesta a prueba, observando la señal muestreada en el Osciloscopio.

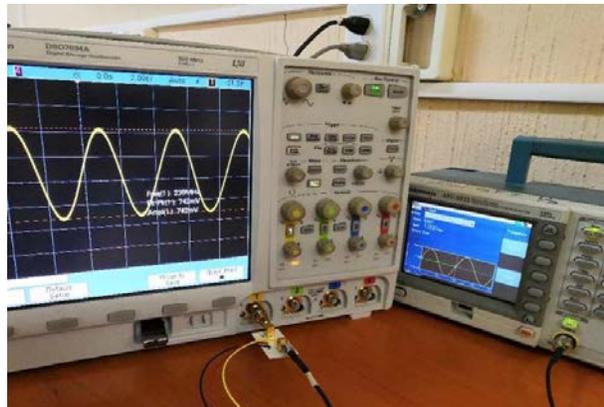


Figura 11 Conexión y vista de sonda implementada bajo prueba.

4. Discusión

En pruebas realizadas a un circuito con transistor BJT 2N5109 en configuración seguidor emisor [Schilling, 1994], los resultados preliminares a diferencia del OPA659 no fueron los óptimos para el uso del mismo, ya que este presenta un

ancho de banda por la mitad del obtenido con el amplificador operacional, mostrando menos linealidad, ya que generó mucho ruido e inestabilidad en la amplitud de su señal. Otras pruebas fueron realizadas con un circuito utilizando un Mosfet BF998 de doble puerta [Jewsbury, 2004], este a diferencia del transistor BJT 2N5109 mostró un rango de ancho de banda más alto, igualándose por poco al amplificador operacional, pero se aleja demasiado de la linealidad deseada, descartándolo para el propósito requerido.

5. Conclusiones

Finalmente, se concluye que el diseño de sonda activa experimentado cumple con las expectativas propuestas en el objetivo planteado, está dentro de los rangos esperados, para equipos de baja impedancia de entrada, estandarizados en 50 Ω . Se pudo concluir que después de varias pruebas realizadas y ajustes hechos durante el proceso de experimentación se obtienen resultados fidedignos en la sonda implementada con las características siguientes:

- Alimentación: ± 5 Vcd
- Resistencia de entrada: > 9 M Ω
- Capacidad de entrada: ~ 2 pF
- Rango dinámico: ≤ 1 V
- Ancho de banda: ~ 445 MHz
- Distorsión armónica: $\leq 1\%$

Estos valores obtenidos fueron confirmados por medio de las mediciones y pruebas realizadas en el laboratorio, los productos reales obtenidos físicamente fueron cercanos a los previstos en los análisis preliminares.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Chang J., K. Johnson, Cómo elegir las mejores sondas de osciloscopio pasivas y activas para sus tareas, División de Pruebas Digitales Agilent Technologies, junio 2011.

- [2] Donald L. Schilling, Charles Belove, Circuitos Electrónicos Discretos e integrados, 3ª edición, México 1994
- [3] Hirschbuechler Thomas, Design of a low-cost 1 GHz Active Probe, Submitted at the Institute of Electrodynamics, Microwave and Circuit Engineering, Vienna University of Technology. April 2, 2016.
- [4] Jewsbury David, Poor man's 1 GHz active probe: Diy saves a pretty penny, *Elektronika*, no. 4, pp. 36–38, 2004.
- [5] Johnson, Howard W., and Martin Graham, High-Speed Digital Design, a Handbook of Black Magic, Prentice Hall, 1993.
- [6] Malvino Albert Paul, Ph, D, Principios de Electrónica, 3ª edición, México 1990
- [7] Poor man's 500MHz active fet probe with opa659, Revised September 2017. (Online): <http://www.mikrocontroller.net/topic/188227>.
- [8] Robert L. Boylestad, Louis Nashelsky, Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, 10ª edición, Pearson, México 2009.
- [9] Texas Instruments, OPA659 Wideband, Unity-Gain Stable, JFET-Input Operational Amplifier, Datasheet, Revised November 2017.
- [10] Usunáriz I., Una aproximación al mundo de las sondas, Nota Técnica, Tektronix Española S.A.
- [11] Zola Julio Guillermo, Juan Miguel Kelly; Designing a low capacitance and low cost active probe, IEEE Workshop on Information Processing and Control, 2015.