

Prototipo de sonda inalámbrica para un analizador de espectro GW-INSTEK 3GHZ GSP- 730 del
laboratorio de ingeniería electrónica de la universidad CESMAG

Marlon Alejandro De La Rosa Salas

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería
Electrónica San Juan de Pasto
2024

Prototipo de sonda inalámbrica para un analizador de espectro GW-INSTEK 3GHZ GSP 730 del laboratorio de ingeniería electrónica de la universidad CESMAG

Marlon Alejandro De La Rosa Salas

Proyecto de Trabajo de Grado presentado al Comité curricular del programa de Ingeniería Electrónica

Asesor: Mario Fernando Henao

Universidad CESMAG
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería
Electrónica San Juan de
Pasto
2024

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité Curricular en cumplimiento de los
requisitos exigidos por la Universidad CESMAG
para optar al título de Ingeniero Electrónico

Mario Fernando Henao Rosero

Asesor

Miller Manuel Rúaes Luna

Jurado

Christian Fernando Vega Caicedo

Jurado

Página de nota de exclusión de responsabilidad intelectual

“El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusivamente responsabilidad de su autor y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG”

Dedicatoria

Dedico este proyecto de grado, en primer lugar, a Dios, fuente inagotable de sabiduría y fortaleza, quien me ha guiado y sostenido en cada paso de este arduo pero gratificante camino. Sin su bendición y constante compañía, este logro no habría sido posible.

A la Universidad CESMAG, mi alma máter, le expreso mi más profundo agradecimiento por brindarme un espacio de aprendizaje, crecimiento personal y profesional. Este proyecto es fruto de la formación integral que he recibido a lo largo de estos años, y representa el cierre de una etapa llena de retos y enseñanzas que me han preparado para el futuro.

Quiero extender un sincero agradecimiento a mi asesor, Mario Henao, por su dedicación, paciencia, y sabiduría. Sus consejos y orientaciones fueron fundamentales para superar los desafíos que se presentaron durante el desarrollo de este proyecto. Su apoyo incondicional y confianza en mis capacidades me impulsaron a dar lo mejor de mí en cada momento.

A mi familia, especialmente a mis padres, Marlon Hernando De La Rosa Murillo, a quien le debo todo lo que soy y lo que he logrado, gracias por su amor incondicional, por sus sacrificios silenciosos, y por ser siempre mi mayor fuente de inspiración y fuerza. A mi madre María Mercedes Salas Ordoñez, por ser mi pilar en los momentos difíciles, y a mi hermana Angela María De La Rosa Salas, por su constante apoyo y comprensión, les dedico este logro que es tan suyo como mío.

Finalmente, dedico este proyecto a todas las personas que, en algún momento, formaron parte de este proceso. A aquellos amigos, compañeros, profesores, y demás personas que me acompañaron en este viaje, les agradezco de todo corazón. Cada palabra de aliento, cada gesto de apoyo, y cada enseñanza compartida dejaron una huella en mi vida y contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad. Este logro es un reflejo del esfuerzo colectivo y del amor que he recibido a lo largo de mi vida. ¡Gracias a todos!

Marlon Alejandro De La Rosa Salas

Tabla de contenido

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción..... | 9 |
| 1 El Problema de Investigación | 12 |
| 1.1 Objeto o tema de investigación..... | 12 |
| 1.2 Línea de investigación | 12 |
| 1.3 Sub-línea de investigación | 12 |
| 1.4 Descripción o planteamiento del problema..... | 13 |
| 1.5 Formulación del problema (Pregunta de investigación)..... | 13 |
| 1.6 Objetivos | 14 |
| 1.6.1 Objetivo general. | 14 |
| 1.6.2 Objetivos específicos | 14 |
| 1.7 Justificación..... | 15 |
| 1.8 Viabilidad | 15 |
| 1.9 Delimitación | 16 |
| 2 Marco teórico | 17 |
| 2.1 Antecedentes | 17 |
| 2.1.1 Diseño e implementación de sonda de prueba activa para equipo de baja impedancia de entrada..... | 17 |
| 2.1.2 Medidas diferenciales con analizadores de espectro y sondas..... | 18 |
| 2.1.3 Sondas de Radiofrecuencia (RF) con Modulación para Análisis de Espectro..... | 19 |

| | | |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1.4 | Caracterización de un circuito | 19 |
| 2.1.5 | Design and Study of a Wide-Band Printed Circuit Board Near-Field Probe..... | 20 |
| 2.2 | Supuestos teóricos | 21 |
| 2.2.1 | Estudio y análisis de la tecnología de redes de frecuencia única y su aplicación en radio fusión en las bandas AM y FM para la optimización del espectro electromagnético..... | 21 |
| 2.2.2 | Muestreo y frecuencia Nyquist | 22 |
| 2.2.3 | Adaptación de impedancia para RF | 23 |
| 2.2.4 | Sondas en impedancias | 25 |
| 2.2.5 | Modulación FM..... | 26 |
| 2.3 | Definición de conceptos..... | 34 |
| 2.4 | Hipótesis..... | 36 |
| 2.4.1 | Hipótesis de investigación | 36 |
| 2.4.2 | Hipótesis nula | 36 |
| 2.4.3 | Hipótesis alternativa | 36 |
| 3 | Metodología | 37 |
| 3.1 | Enfoque | 37 |
| 3.2 | Paradigma..... | 37 |
| 3.3 | Método | 37 |
| 3.4 | Tipo de investigación..... | 38 |
| 3.5 | Diseño de investigación | 38 |

| | | |
|-------|------------------------------------------------------------|----|
| 3.6 | Universo | 39 |
| 3.7 | Muestra..... | 39 |
| 3.8 | Validez de la técnica..... | 40 |
| 3.9 | Confiabilidad técnica | 40 |
| 3.10 | Instrumentos de recolección de la información..... | 40 |
| 4 | Resultados | 41 |
| 4.1 | Diseño del Prototipo | 41 |
| 4.1.2 | Selección del esquema de modulación..... | 43 |
| 4.2 | Modelo Esquemático del prototipo de sonda inalámbrica..... | 43 |
| 4.3 | Modelo esquemático simulado Proteus) | 47 |
| 4.4 | Caracterización | 51 |
| 4.4.1 | Señal sinusoidal | 52 |
| 4.4.2 | Tren de pulsos cuadrados..... | 65 |
| 4.4.3 | Señal diente de sierra (triangular) como moduladora..... | 74 |
| 4.5 | Calculo Error MSE..... | 82 |
| 4.5.1 | Señal sinusoidal | 82 |
| 4.5.2 | Tren de pulsos cuadrados..... | 84 |
| | Análisis de resultados..... | 89 |
| | Conclusiones..... | 94 |
| | Recomendaciones | 95 |
| | Bibliografía | 96 |

Introducción

La modulación es la técnica utilizada para transmitir información a través de señales de manera eficiente y confiable en sistemas de comunicación. La modulación implica modificar una señal portadora, generalmente en términos de amplitud, frecuencia, fase, o una combinación de ellas, para que transporte la información deseada. Este proceso es fundamental en la transmisión de datos a largas distancias y en entornos con interferencias, ya que permite que la señal transportada se adapte a las características del canal de comunicación, mejorando la calidad y la integridad de la información recibida. En el contexto de un proyecto de grado, la modulación juega un papel crucial en el diseño y optimización de sistemas de telecomunicaciones, asegurando que los datos se transmitan con la menor distorsión y pérdida posible, lo cual es esencial para el funcionamiento efectivo de cualquier sistema de comunicación moderno. Haikin, (2001)

Un analizador de espectro es un dispositivo de prueba ampliamente utilizado para medir y describir la intensidad de una señal en un determinado rango de frecuencias. Los componentes espectrales detectados por un analizador de espectro incluyen señales de interés, armónicos, distorsión y ruido ambiental. Las aplicaciones comunes incluyen análisis de señales de radiofrecuencia (RF), diseño y prueba de circuitos electrónicos, ingeniería de audio y activación y mantenimiento de redes de fibra óptica. La tecnología digital avanzada permite que los analizadores de espectro en tiempo real capturen eventos transitorios o difíciles de detectar. Métodos de prueba programables, registro de espectro y una pantalla táctil intuitiva son las características distintivas de la última generación de analizadores de espectro portátiles. Viavi, (2022).

Actualmente, el Laboratorio de Ingeniería Electrónica de la Universidad CESMAG cuenta con un analizador de espectro modelo GW-INSTEK 3GHZ GSP-730 que está disponible para que profesores y estudiantes lleven a cabo actividades formativas e investigativas, pero que carece de sondas que permitan detectar y

visualizar el espectro de frecuencia de las señales que pasan por un circuito de prueba. Únicamente es posible captar la potencia que se irradia mediante una antena.

Por esta razón, el objetivo del presente trabajo de grado fue desarrollar y analizar la precisión de un prototipo de sensor inalámbrico que permita transferir los componentes de frecuencia de un circuito de prueba al analizador de espectro *GW-INSTEK 3GHZ GSP-730*. Esto posibilita su uso en diversos temas académicos y de investigación, tales como el análisis de distorsión de frecuencia, análisis de Fourier, comprobación del Teorema de Nyquist, entre otros. En el desarrollo del prototipo del sensor inalámbrico se consideraron varios elementos, siendo el principal la transmisión de RF usando modulación AM, la cual permite apreciar en forma directa los componentes de frecuencia de una señal de prueba. Para evaluar la precisión del sensor, se propuso comparar las componentes de frecuencia de 3 señales conocidas, tomadas como referencia, con la señal obtenida en el analizador.

En la sección 1 del documento se presenta el problema de investigación que se planteó para este proyecto, el cual corresponde a la falta de una sonda que permita el estudio espectral de una señal de prueba suministrada al analizador de espectro. Además, se plantea los objetivos tanto general como específicos que permiten atender esta problemática.

En la sección 2 se desarrolla un marco teórico que se usó durante las fases de diseño e implementación del prototipo de sonda inalámbrica para el analizador de espectro *GW-INSTEK3GHZ GSP-730*. En esta sección se investiga y se anexa antecedentes existentes relacionadas con sondas de prueba, estudios de medidas con analizadores de espectro y supuestos teóricos que giran alrededor del estudio de componentes de frecuencia en modulaciones conocidas (AM, FM). Igualmente se definen las hipótesis del estudio. Estas hipótesis están orientadas a evaluar el error cuadrático medio (ECM) en la obtención de datos del analizador, comparándolos con los resultados obtenidos a partir del desarrollo matemático de una señal modulada usando AM.

En la sección 3 se presenta detalladamente la metodología definida para el

estudio, que abarca el enfoque, paradigma, método y tipo de investigación. Este último fue definido como una investigación descriptiva, orientada a estimar el impacto de la transmisión inalámbrica de la señal estudiada. Además, se describen aspectos clave como el universo y la muestra, así como las técnicas de recolección de información, entre las cuales destaca la observación directa. Los datos fueron extraídos directamente del analizador de espectro y del osciloscopio, y luego comparados con un modelo ideal de modulación AM en Matlab.

En la sección 4 se presentan los resultados del proyecto, incluyendo un resumen de las alternativas contempladas para implementar la sonda, entre las que se encuentra la modulación FM implementada mediante tarjetas de desarrollo, junto con una descripción de los resultados obtenidos. Asimismo, se expone el modelo que mejor se ajustó a las necesidades del proyecto, seguido de su construcción y caracterización. Igualmente se realizó un análisis del error cuadrático medio (ECM) para verificar las hipótesis planteadas y cómo se comporta la sonda en las señales tomadas como referencia.

Se concluye que el prototipo opera de manera adecuada dentro de frecuencias específicas en las que no presenta sobre modulación. Para un tren de pulsos cuadrados se determinó un ancho de banda de trabajo de 30KHz, mientras que para una señal triangular dicho parámetro corresponde a 60KHz. Adicionalmente, se determinó que el sistema puede soportar amplitudes de hasta 200 mV sin comprometer su estabilidad ni la calidad de la señal. Sin embargo, cuando se exceden estos límites de frecuencia y amplitud, el prototipo experimenta sobre modulación, lo que provoca la aparición de armónicos no deseados y un notable sobrecalentamiento de algunos de sus componentes.

1 El Problema de Investigación

1.1 Objeto o tema de investigación

Prototipo de sonda inalámbrica para un analizador de espectro GW-INSTEK 3GHZ GSP-730 del laboratorio de ingeniería electrónica de la Universidad CESMAG.

1.2 Línea de investigación

El área de Comunicaciones Electrónicas de la Universidad CESMAG centra su trabajo investigativo en el estudio de las tecnologías, métodos, técnicas, algoritmos y desarrollos utilizados en los procesos de transmisión, recepción y procesamiento de la información de manera local y remota mediante el uso de circuitos electrónicos. Los trabajos desarrollados en esta área incluyen el diseño, modelado, simulación, análisis de sistemas análogos y digitales paratelecomunicaciones, telemetría y redes de datos.

1.3 Sub-línea de investigación

Las telecomunicaciones comprenden el estudio de las tecnologías que permiten la comunicación de información a partir de señales generadas, retransmitidas e interpretadas por dispositivos electrónicos, bajo diversos medios de trasmisión.

1.4 Descripción o planteamiento del problema

El laboratorio de electrónica de la universidad CESMAG cuenta con un analizador de espectro GW-INSTEK 3GHZ GSP-730, cuya función es el estudio de los componentes espectrales de una señal, pero carece de un dispositivo de medición que permita conectar circuitos de prueba directamente, creando un problema en el aprendizaje práctico del comportamiento y características espectrales de una señal definida, por cuanto en el momento sólo permite el análisis de señales inalámbricas.

La importancia de construir una sonda inalámbrica radica en que posibilita la conexión de varios circuitos de prueba, evitando el traslado de los equipos y facilitando los turnos para hacer uso del analizador de espectro. La adquisición de este tipo de sondas por parte de la universidad CESMAG es compleja, ya que el valor comercial es elevado (alrededor de 1000 USD por unidad) y su disponibilidad muy escasa, al encontrarse descontinuadas. Por tanto, en muchos casos, los estudiantes solo podían hacer un estudio teórico o simulado de señales en el dominio de la frecuencia, sin realizar prácticas de laboratorio. En el desarrollo de la sonda es importante tener en cuenta los requisitos de las prácticas de laboratorio que se llevan a cabo en el programa de Ingeniería Electrónica de la universidad CESMAG para determinar un rango adecuado de amplitudes y frecuencias de trabajo que permitan atender esta necesidad

1.5 Formulación del problema (Pregunta de investigación)

¿Cuál es la fidelidad de una sonda inalámbrica para la transmisión de los componentes de frecuencia de un circuito de prueba aplicado al analizador de espectro GW-INSTEK 3GHZGSP-730, del laboratorio de electrónica de la UNICESMAG?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general.

Analizar la fidelidad de un prototipo de sonda inalámbrica para la transmisión de los componentes de frecuencia de un circuito de prueba a un analizador de espectro *GW-INSTEK3GHZ GSP-730*.

1.6.2 Objetivos específicos

- Diseñar un prototipo de sonda inalámbrica para transmitir la señal medida al analizador de espectro.
- Implementar el prototipo de sonda inalámbrica diseñado.
 - Evaluar el desempeño de la sonda inalámbrica con respecto a señales cuyo espectro de frecuencia es tomado como patrón.

1.7 Justificación

El laboratorio de ingeniería electrónica de la universidad CESMAG carece de un equipo completo que permita analizar los componentes de frecuencia de una señal proveniente de un circuito, diferentes a las que se puede radiar. Para solucionar esta situación, el proyecto propuesto plantea el diseño y la construcción de una sonda inalámbrica, que tome muestras de la señal que fluye en un punto de un circuito, y la emita mediante un canal de radio al analizador GW-INSTEK 3GHZ GSP-730. De esta forma, además de solventar dicha carencia, se aborda problemas adicionales como son: el traslado del analizador de espectro a las estaciones de trabajo de los circuitos bajo prueba hasta el lugar donde se haya instalado el analizador, la toma de turnos para el uso de este equipo, o la adquisición de sondas de prueba comerciales de alto costo y difícil consecución. (Newark An Avnet Company, 2022), las cuales, en el momento se encuentran fuera de producción (aliexpress, 2022). Esto dificulta la utilización de equipo en el laboratorio de la institución.

Debido a que la construcción de la sonda implica el diseño de un sistema de comunicaciones inalámbrico, el cual podría introducir efectos nocivos a la señal transmitida tales como interferencias y ruido, se desconoce la afectación que éste pueda tener en las componentes de frecuencia de la señal bajo prueba. Este es precisamente el interés de la investigación, estimar la afectación causada por la transmisión inalámbrica de las componentes de frecuencia a través de la sonda implementada, de modo que se pueda validar su uso en el laboratorio. Como no se cuenta con un equipo patrón con el cual se pueda establecer una comparación directa de las mediciones, se ha planteado el uso de señales cuyo espectro es conocido y fácilmente calculable mediante, Análisis de Fourier para establecer la fidelidad de la sonda.

1.8 Viabilidad

En el laboratorio se cuenta con los equipos necesarios para el desarrollo del proyecto y se cuenta con acceso para manipular estas herramientas. También hay una gran cantidad de referencias bibliográficas que permitieron el diseño e implantación del prototipo de sonda inalámbrica. Hay que resaltar la disponibilidad

de tiempo para asesorías, pruebas y demás actividades que implicó la creación del proyecto.

1.9 Delimitación

El proyecto contempla el desarrollo de un prototipo de sonda inalámbrica compatible con el Analizador de espectro GW-INSTEK 3GHz GSP-730 del Laboratorio de Electrónica de la Universidad CESMAG, así como su verificación para las condiciones que requieren las prácticas definidas en las guías suministradas por el programa de Ingeniería Electrónica. El propósito de la sonda es permitir que los estudiantes observen los componentes de frecuencia de las señales que generan en las prácticas de laboratorio. Para facilitar el desarrollo y mantenimiento del prototipo, este se construyó con componentes disponibles en el mercado local. El desarrollo del prototipo inició en 2022 y concluyó en 2024.

Del análisis de las guías del laboratorio se obtuvo la información presentada en la Tabla 1, que detalla los requerimientos considerados para el diseño de la sonda. Por su parte, las [Tablas 4, 5 y 6](#) describen las características del prototipo desarrollado.

Se utilizó una señal moduladora sinusoidal para estimar el ancho de banda de trabajo de prototipo, debido a que su espectro contiene un solo componente. De esta forma, haciendo un barrido en un rango de frecuencias y observando la amplitud de la señal modulada, es posible determinar el ancho de banda que no sufre distorsión por causa del prototipo. En cuanto a la señal sinusoidal, los resultados del prototipo muestran que, aunque la amplitud de los componentes de frecuencia disminuye al alejarse de la portadora, existen dos rangos estables: de 50 a 90 KHz y de 110 a 300 KHz. Estas zonas de estabilidad son fundamentales para determinar el ancho de banda efectivo y evaluar el rendimiento del sistema en el procesamiento de señales.

Por otro lado, se utilizó las señales de pulsos cuadrados y triangulares para validar el comportamiento del diseño, debido a que su espectro contiene más componentes. En el caso de la señal de tren de pulsos cuadrados, debido a la presencia de más componentes de frecuencia, el rango se limita entre 5 y 150 KHz. Para la señal diente de sierra (triangular), el rango se reduce aún más, ubicándose entre 3 y 100 KHz, con una amplitud moduladora de 150 mV a 200 mV.

2 Marco teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Diseño e implementación de sonda de prueba activa para equipo de baja impedancia de entrada

Las sondas son fundamentales en los instrumentos electrónicos ya que con ellas se puede hacer posible la medición de una conexión física y eléctrica, de una señal generada por un circuito, dependiendo de la calidad y del tipo de sonda dependerá la eficiencia y el comportamiento de la señal transmitida.

Según Usunariz (2011) “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”. Desde este argumento parte la idea del prototipo de sonda inalámbrica, la cual tiene como variable fundamental la fidelidad de una señal, que es generada por un circuito llevada al prototipo de sonda y transmitida al analizador de espectro.

Pero el estudio debe partir de un diseño, en este caso se analiza el montaje de una sonda activa que es presentada por Alfonso et al. (2019), donde hay un prototipo de sonda que parte de una configuración básica de voltaje, donde se conectan en paralelo 6 condensadores de diferentes valores a la fuente de alimentación del Amp-Op, con el objetivo de suprimir el ruido que se pueda generar. El Amp-Op está alimentado a ± 5 V CC, la señal medida o regenerada es de frecuencia variable de 1 Vp, tiene un condensador de acoplamiento (CIN) en la entrada, también la resistencia de polarización (RIN) será paralela a la resistencia de entrada del dispositivo, el así domina el valor más pequeño y finalmente una resistencia de 50Ω en la salida del (R1), simulando la carga.

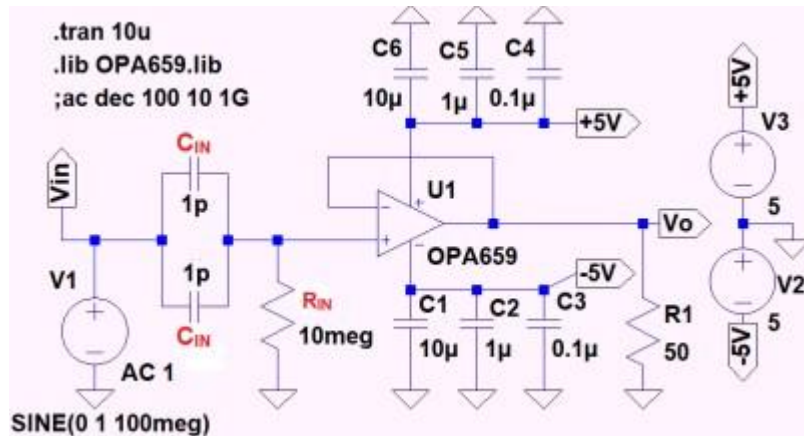


Figura 1 Prototipo de sonda activa

Fuente: (Alfonso et al., 2019)

En la figura 1 se analiza un montaje y se observa los componentes activos como, amplificadores operacionales, entre otros elementos que ayudan a acondicionar la señal de entrada para ser transmitida. Se relación con el estudio de sonda inalámbrica para transmitir la señal a un receptor que en este caso es un analizador de espectro y poder medir la fidelidad de la onda.

2.1.2 Medidas diferenciales con analizadores de espectro y sondas.

Según (Schwarz, 2013), Las dos mediciones más comunes para la distorsión son TOI (Intermodulación de Tercer Orden) y Distorsión Armónica de Segundo Orden. Probar la distorsión es una de las mediciones más exigentes. Requiere un analizador de espectro con un alto rango dinámico. Normalmente, se necesita equipo adicional como un filtro para suprimir armónicos no deseados de otros equipos de prueba, como el generador de señales.

La placa de prueba de sonda se utiliza para realizar las mediciones de distorsión en una sonda activa de un solo extremo, modelo RT-ZS30 (sonda de 3 GHz, 10:1), y en la sonda activa diferencial modelo RT-ZD30. La placa de prueba de sonda incluye una línea de RF simple; las puntas de la sonda pueden conectarse a la línea de 50 ohmios y a la tierra.

La prueba de distorsión en la sonda diferencial se realizó con la sonda en modo de un solo extremo, conectando la punta de sonda no utilizada a una carga de 50 ohmios. Ambas sondas se conectaron a la entrada de banda base del analizador de espectro R&S FSW, con la ruta de señal interna conectando la sonda a la entrada de RF. Según mora, (2015), La distorsión es una deformación que sufre una señal al atravesar un sistema. En la figura 2 se indica un ejemplo de la distorsión en una señal.

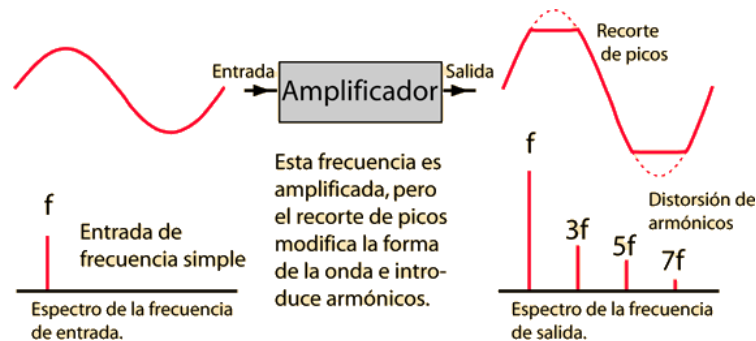


Figura 2 Comportamiento de onda cuando hay distorsión de frecuencia

Fuente: (Schwarz, 2013)

2.1.3 Sondas de Radiofrecuencia (RF) con Modulación para Análisis de Espectro.

Según (Bowick, 1982), Estas sondas permiten analizar el espectro de señales moduladas, como las modulaciones AM, FM o PM (modulación de fase), directamente en el dominio de frecuencia usando analizadores de espectro. Un ejemplo es la sonda de campo cercano, utilizada para detectar señales electromagnéticas generadas por los circuitos de transmisión en diferentes dispositivos electrónicos. Estas sondas permiten verificar la integridad de la señal y su comportamiento espectral, lo cual es crucial en aplicaciones de diagnóstico y aseguramiento de la calidad.

2.1.4 Caracterización de un circuito

Según (Smith, 1999) La caracterización de un circuito consiste en analizar sus propiedades y su comportamiento ante diferentes condiciones de operación. Esta caracterización generalmente se realiza midiendo parámetros como frecuencia, amplitud, impedancia, ganancia y respuesta en frecuencia, y puede incluir el uso de

herramientas como osciloscopios, analizadores de espectro, y simulaciones en software de diseño de circuitos. En el contexto de una sonda inalámbrica, se evalúa el comportamiento del circuito de transmisión en relación con su estabilidad en frecuencia y su sensibilidad al captar y transmitir la señal deseada. La caracterización de frecuencia y amplitud permite entender la precisión y el rango operativo del circuito.

2.1.5 Design and Study of a Wide-Band Printed Circuit Board Near-Field Probe

Según Martino, (2021) Las interferencias electromagnéticas (EMI– Electromagnetic Interferences) se pueden definir como señales que perturban de forma no intencionada el funcionamiento normal de un sistema eléctrico o electrónico. Estas perturbaciones pueden afectar a las magnitudes eléctricas o magnéticas de sus circuitos [1,2,3]. Por tanto, el problema de las interferencias es un asunto al que se enfrentan continuamente los ingenieros de diseño [4], ya que las EMI pueden causar distintos tipos de problemas en los sistemas digitales y analógicos, dando lugar a fallos de funcionamiento, reinicios del sistema o incluso daños permanentes en el sistema si no se diseña o protege adecuadamente [5]. La seguridad de un sistema electrónico en el que existan dispositivos que produzcan perturbaciones electromagnéticas y elementos o circuitos de pequeña señal sensibles a dichas perturbaciones, depende de la compatibilidad de los niveles de señal utilizados. Por ello, es conveniente cumplir con unas normas de diseño específicas que hagan compatibles los niveles de perturbación generados por los elementos fuente de las interferencias con los niveles de señal utilizados por los posibles elementos víctimas o sensibles a dichas interferencias. La sonda diseñada está optimizada para minimizar las interferencias electromagnéticas (EMI) mediante un apantallamiento que filtra campos eléctricos no deseados y se enfoca en medir campos magnéticos. Su funcionamiento depende del tamaño del bucle y la distancia a la fuente emisora: un bucle más pequeño proporciona mayor precisión, pero menor sensibilidad. La sonda debe posicionarse y rotarse con cuidado para identificar áreas con intensas emisiones magnéticas, logrando una resolución espacial adecuada. Con un rango de frecuencia uniforme entre 180 MHz y 6 GHz, puede medir emisiones en un espectro

amplio, comparable a sondas comerciales de alta calidad. Además, el diseño evita resonancias no deseadas, aunque pequeñas capacitancias parásitas del entorno pueden causar desviaciones menores. En conjunto, estas características hacen que la sonda sea efectiva para capturar campos magnéticos mientras mitiga las interferencias externas.

2.2 Supuestos teóricos

2.2.1 Estudio y análisis de la tecnología de redes de frecuencia única y su aplicación en radio fusión en las bandas AM y FM para la optimización del espectro electromagnético.

Según Erazo, (2009) La modulación en amplitud AM es el primer método de transmisión por radio, se basa en variar la amplitud de la onda portadora en función de la amplitud de la onda moduladora, obteniendo como resultado una onda modulada que contiene a la moduladora.

Un modulador AM es un dispositivo no lineal con dos entradas y una salida, una entrada es una señal portadora de amplitud constante y alta frecuencia y la segunda es una señal de información de frecuencia relativamente baja.

La Figura 3 muestra el espectro de frecuencias de una señal moduladora vs una señal modulada.

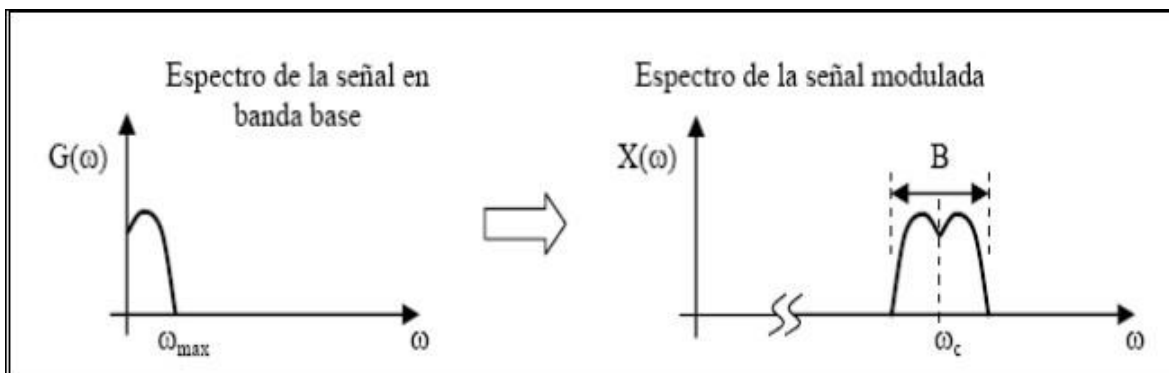


Figura 3 Señal AM moduladora y modulada

Fuente: (Erazo, 2009)

2.2.2 Muestreo y frecuencia Nyquist

Según Semeria (2015), Cuando se diseña un canal de comunicaciones, dentro de los objetivos primordiales estará el hecho de obtener la máxima transferencia de información (obviamente sin error) por unidad de tiempo, aspecto con el que se busca optimizar al máximo el rendimiento del medio físico.

Una de las formas - la que nos ocupa en este caso - será procurando enviar solamente la mínima información "eléctrica" necesaria (eliminando todo contenido irrelevante e innecesario), que posteriormente mediante un proceso tecnológico (con basamento matemático) del lado del receptor pueda reconstruir la señal original para permitir interpretar la información. El resultado de este proceso, evidentemente es un menor uso del canal por parte de la señal transmitida. Nyquist, en 1924, demostró que no es necesario enviar todo un periodo de la señal (una sucesión de infinitos puntos característica de toda señal analógica) para que pueda ser interpretada por el otro lado del receptor, sino sólo dos muestras por ciclo. Son suficientes. para esto, la señal original aún se puede recuperar.

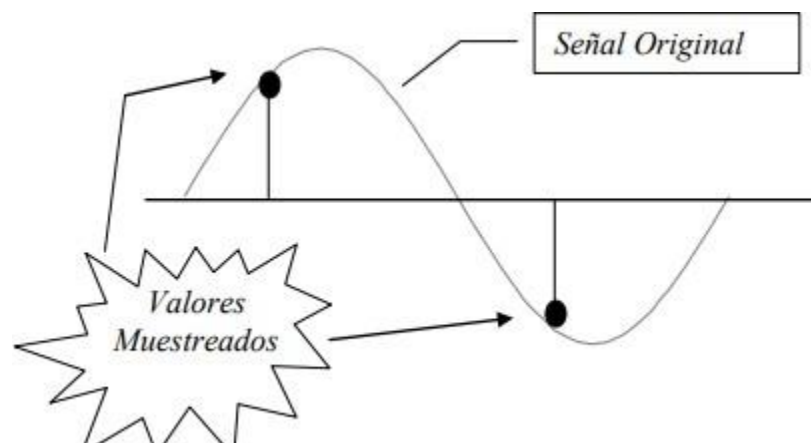


Figura 4 Valores muestreados para recuperar una señal sinusoidal Fuente: (Semeria, 2015)

En la figura 4 se observa que, si conoce dos puntos de la frecuencia de la señal original (puntos muestreados) serán suficientes para visualizar "a primera vista" al menos un gráfico como el que se muestra con la línea de puntos. El resto será un filtro de paso bajo que realizará el efecto de "moldear" (reconstruir) la señal para

obtener la señal fuente.

El teorema de muestreo de Nyquist explica la relación entre la tasa de muestreo y la frecuencia de la señal. La velocidad de muestreo de f_s debe ser dos veces mayor a la frecuencia más alta generada por los componentes que generan la señal. Esta frecuencia se llama la frecuencia de Nyquist (f_n)

$$f_s > 2 * f_n$$

2.2.3 Adaptación de impedancia para RF

Según Ing. Oscar M. Santa Cruz (2010) La adaptación de impedancias se ha considerado una operación difícil y sofisticada, que aún es temida por la mayoría de los profesionales de la electrónica, especialmente cuando se cubre un ancho de banda. Este es un aspecto muy

importante, ya que de esto depende la optimización del transmisor y receptor, afectando así a la calidad del enlace.

El primer trabajo sobre adaptación de impedancias se publicó, como la mayoría de los trabajos teóricos, en los años de 1950 a 1960. Tiene muchas soluciones al problema planteado. En la actualidad, todavía no es posible sacar conclusiones sobre la eficacia o precisión de cualquiera de estos métodos para determinar cuál es mejor. Amplios y recientes estudios demuestran que aún no está todo por decir sobre la adaptación de la banda ancha. Sin embargo, independientemente del procedimiento aplicado, los resultados numéricos son similares. Por lo general, es para determinar el valor de tres o cuatro componentes pasivos, bobinas o condensadores. Este proceso es largo y tedioso, incluso con ecuaciones con 12 incógnitas. Por lo tanto, esta situación permite a estimar rápidamente los componentes, cuyo cálculo se puede simplificar. La solución final se obtiene mediante una serie de pruebas prácticas adicionales. Los avances tecnológicos de la década de 1990 aplicados a las computadoras permitieron el desarrollo de algoritmos de optimización que aligeraron un poco el trabajo de los diseñadores. Esta parte está dedicada a la adaptación de impedancia por medio del

método llamado de impedancias conjugadas y del cálculo del coeficiente de sobretensión del circuito con carga.

En radiocomunicaciones, lo que se pretende es transferir la máxima potencia de una fuente de tensión V_E , con una resistencia interna R_G , a una carga de valor R_L . El esquema simplificado de la figura 5 resume el enunciado del problema.

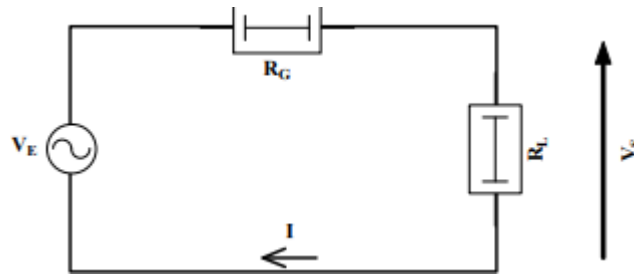


Figura 5 Circuito de radiocomunicaciones

Fuente: (Ing. Oscar M. Santa Cruz, 2010)

La tensión V_S en los bornes de la carga R_L vale:

$$V_S = V_E \frac{R_L}{R_L + R_G} \quad (1)$$

La potencia P_S suministrada a la carga R_L vale

$$P_S = \frac{V_S^2}{R_L} = V_E^2 \frac{R_L}{(R_L + R_G)^2} \quad (2)$$

Se pretende entonces hallar la relación entre R_L y R_G , tal que la potencia sea máxima:

$$\frac{dP_S}{dR_L} = V_E^2 \frac{R_G - R_L}{(R_L + R_G)^2} \quad (3)$$

Cuando $\frac{dP_S}{dR_L} = 0$ la potencia P_S es máxima. Esta condición equivale a la relación bien conocida $R_G = R_L$

Cuando la resistencia de carga R_L es igual a la resistencia interna del generador R_G , el circuito está adaptado en potencia. La potencia P_S suministrada a la carga es máxima y vale:

$$P_{S_{MAX}} = \frac{V_E^2}{4R_L} \quad (4)$$

En el caso simple de la figura 9.1, las impedancias R_G y R_L son resistencias

puras.

Ciertamente, puede darse este hecho concreto, pero no suele ser un caso real muy frecuente. Generalmente, las impedancias Z_G y Z_L son impedancias complejas. Una impedancia compleja Z puede expresarse de la siguiente forma:

$$Z_P = \frac{NP}{DP} \quad (5)$$

2.2.4 Sondas en impedancias

Según Alfonso et al., (2019), Las sondas son dispositivos esenciales en los equipos de medición porque permiten conexiones físicas y eléctricas precisas (Technologies, 2011). La sonda interactúa directamente con la señal deseada, por lo que la efectividad de la medición depende de la calidad y la elección de la sonda. Es fundamental considerar las características de oscilación, las especificaciones de las sondas, los circuitos y los tipos de señal a medir. Una elección inadecuada de la sonda para un tipo específico de señal puede afectar los circuitos bajo prueba y los instrumentos de medición. Los parámetros que se deben tener en cuenta al momento de su diseño deben iniciar en el rango máximo de voltaje dinámico, ya que dependerá de los componentes activos que lo generarán, Estos mismos componentes limitarán el rango de frecuencia, ya que la distorsión o capacitancia eléctrica se presenta cuando hay un aumento en la frecuencia de entrada y el voltaje, afectando la fidelidad de la señal bajo prueba. Otro parámetro del diseño es la distorsión armónica, también conocida como distorsión de amplitud, utiliza los términos distorsión de amplitud cuando se consideran señales en el dominio del tiempo y distorsión armónica cuando se piensa en señales en el dominio de la frecuencia Schwarz,(2013). generada durante la conversión de la señal de entrada a salida en ese punto, cuando la frecuencia comienza a exceder, debido al tiempo de respuesta natural del circuito de frecuencia.

Y por último se encuentra el ancho de banda se define como la frecuencia máxima de la señal de onda sinusoidal o la mayor ganancia de voltaje que el sistema puede lograr

sin reducir la amplitud por debajo su valor real es 70,7%, también conocido como (punto 3dB) Boylestad y Nashelsky, (2009) El ancho de banda se mide entre los puntos de frecuencia inferior y superior, donde la amplitud de la señal se reduce en 3 dB por debajo de la frecuencia del ancho de banda, y esto se debe a capacitores de acoplamiento "Por encima de la banda media, la capacitancia interna y parásita reduce la ganancia de voltaje" HERRES, (2019). A frecuencias superiores al punto de 3dB, la amplitud de la señal se atenúa demasiado y los resultados de la medición se vuelven poco fiables.

2.2.5 Modulación FM

La modulación por frecuencia (FM) es una técnica de modulación utilizada para transmitir información a través de una señal portadora variando su frecuencia de acuerdo con la señal de entrada, que generalmente es una señal de audio. A diferencia de la modulación en amplitud (AM), en la que la amplitud de la señal portadora varía mientras la frecuencia permanece constante, en la modulación FM, es la frecuencia de la portadora la que cambia, mientras que la amplitud se mantiene constante. Esta técnica es ampliamente utilizada en las transmisiones de radio FM debido a su mayor resistencia al ruido y las interferencias, lo que resulta en una mejor calidad de sonido. La frecuencia modulada es también empleada en aplicaciones como la transmisión de televisión, comunicaciones por satélite y enlaces de microondas.

2.2.5.1 Tarjetas de conocidas en Modulación FM

Transmisor FM Básico con Transistor

Componentes principales:

Un transistor NPN (por ejemplo, 2N2222 o BC547)

Bobina de inductancia (generalmente se enrolla manualmente)

Capacitores y resistencias

Micrófono electret (para entrada de audio)

Antena (puede ser un simple cable)

Funcionamiento: Este es un circuito sencillo donde el micrófono convierte

las ondas sonoras en una señal eléctrica que modula la frecuencia de la señal portadora generada por el oscilador LC (inductancia y capacitancia). El transistor amplifica esta señal antes de ser transmitida por la antena.

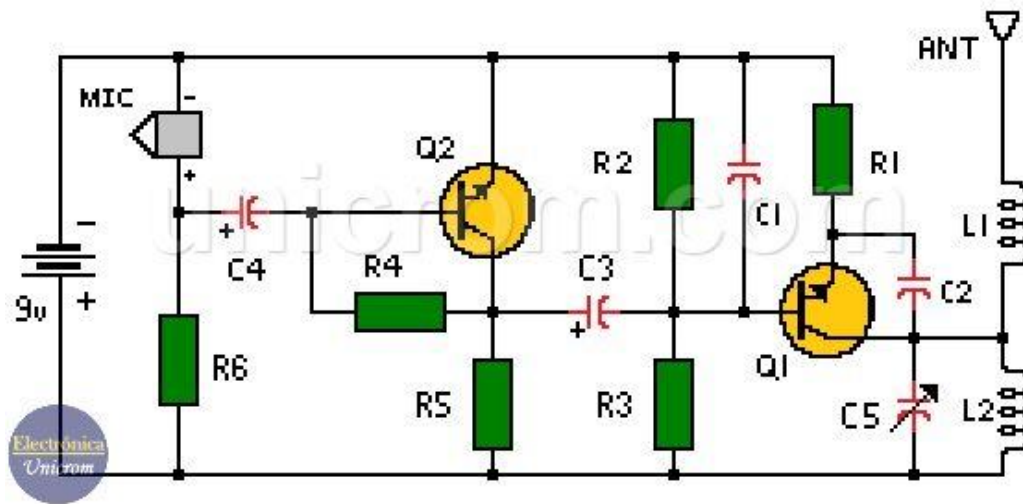


Figura 6 Transmisor FM, dos transistores NPN 2N2222

Transmisor FM de Media Potencia

Componentes principales:

- Oscilador controlado por cristal (para mayor estabilidad)
- Mezclador de frecuencia (con diodos o transistores)
- Etapas de amplificación de RF (con transistores o circuitos integrados como el 2N3866)
- Filtros de paso bajo para limpiar la señal
- Antena externa

Funcionamiento: Este circuito ofrece una mayor estabilidad y potencia, adecuado para transmisiones de media distancia. Utiliza un oscilador controlado por cristal para generar una señal de frecuencia fija que se modula con la entrada de

audio. La señal se amplifica y se limpia antes de ser emitida.

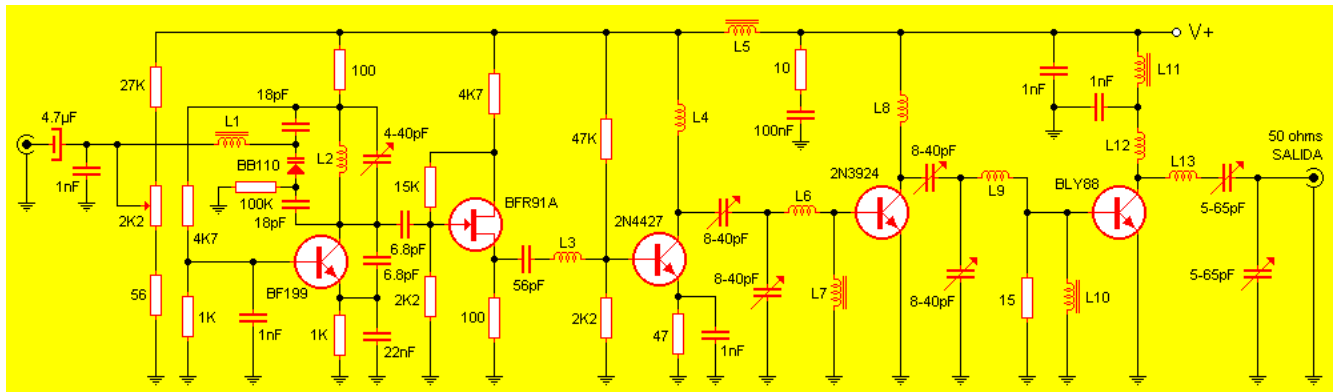


Figura 7 Transmisor de FM de 18w

Transmisor FM con Circuito Integrado BA1404

Componentes principales:

Circuito integrado BA1404 (un chip que contiene la mayor parte de la circuitería necesaria)

Condensadores y resistencias para configuración

Bobinas de ajuste para frecuencia

Antena de alambre o telescópica

Funcionamiento: El BA1404 es un IC diseñado específicamente para aplicaciones de transmisión FM. Contiene un oscilador, modulador y amplificador. Es popular para proyectos de radio DIY por su simplicidad y eficiencia, y se puede alimentar con una batería para portabilidad.

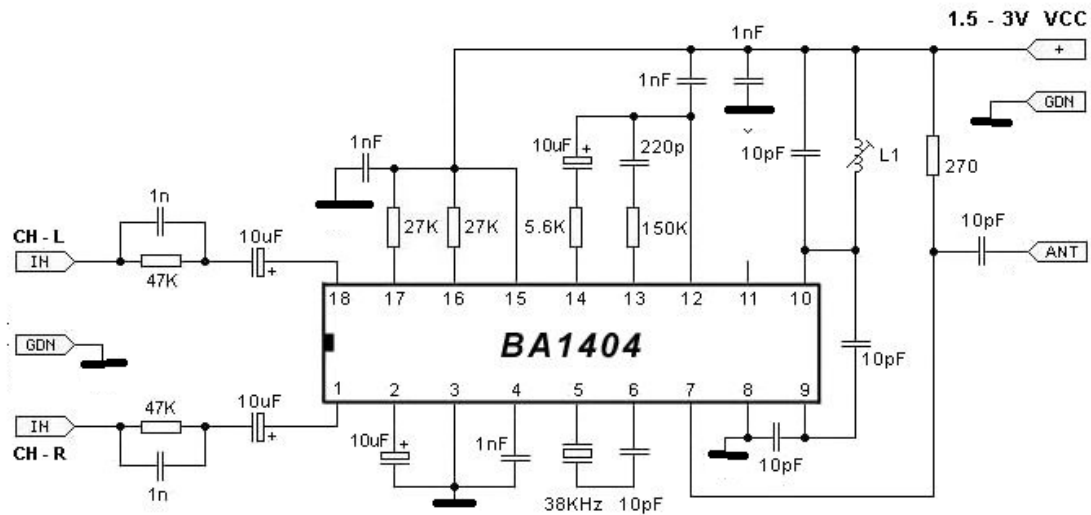


Figura 8 Transmisor FM Estéreo con el BA1404 (CIR5231S)

Fuente: (Braga, 2015)

Transmisor FM PLL (Phase-Locked Loop)

Componentes principales:

PLL (por ejemplo, IC LM7001 o TEA5767)

Microcontrolador para configuración (opcional)

Oscilador de cristal

Etapas de amplificación de RF

Filtros y antena

Funcionamiento: Un transmisor FM con PLL es más avanzado y ofrece una alta estabilidad de frecuencia, ideal para aplicaciones que requieren precisión. El PLL se utiliza para mantener la frecuencia de transmisión constante, ajustándose automáticamente a pequeñas variaciones.

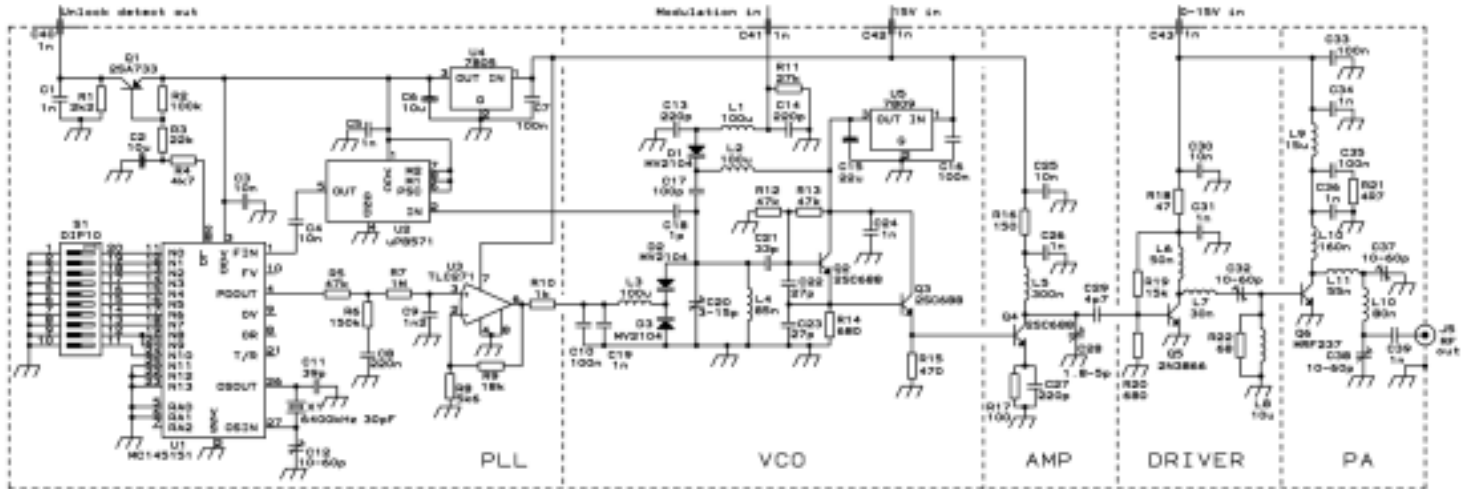


Figura 9 PLL FM Transmitter Circuit

Fuente: (Marian, 2009)

Nota: para conocer a detalle las ventajas y desventajas de cada transmisor en modulación FM lo podemos observar en el anexo 1 en el documento llamado Transmisor Fm

Al comparar los distintos transmisores FM, se observa que el transmisor básico con transistor es ideal para principiantes debido a su simplicidad y bajo costo, aunque ofrece una estabilidad limitada y un alcance reducido. El transmisor de media potencia, por otro lado, proporciona una mayor estabilidad y mejor calidad de señal gracias al uso de un oscilador controlado por cristal y una etapa de amplificación, aunque a un costo y complejidad superiores. El transmisor basado en el circuito integrado BA1404 simplifica el diseño al integrar varias funciones en un solo chip, lo que lo hace ideal para proyectos portátiles y DIY, aunque con un alcance y flexibilidad limitados. Finalmente, el transmisor FM con PLL ofrece la mayor estabilidad y precisión, siendo adecuado para aplicaciones avanzadas y profesionales, aunque requiere un mayor conocimiento técnico y presenta un costo y consumo de energía más elevados. Cada tipo de transmisor tiene su lugar dependiendo de las necesidades específicas del usuario y del proyecto. De igual manera otra razón importante es que en frecuencia los componentes de una señal FM varían y con ello dificultan su interpretación a nivel académico, así como la evaluación del desempeño del prototipo.

Se identificaron varios circuitos disponibles comercialmente, sin embargo, se encontró que su ancho de banda no coincide con los requisitos específicos establecidos al analizar las guías de laboratorio. Esto representa una limitación significativa, ya que el ancho de banda es crucial para asegurar que el circuito pueda manejar adecuadamente las señales dentro del rango de frecuencias necesario. Como resultado, es posible que estos circuitos no sean óptimos para cumplir con los objetivos del experimento, lo que podría afectar tanto la precisión de las mediciones como la efectividad del prototipo desarrollado.

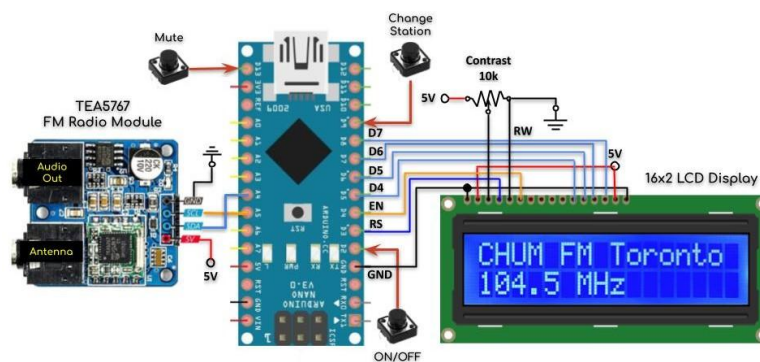


Figura 10 Circuito modulador-demodulador Fm TEA5767

Fuente: (Kuzechie, 2021)

Se determinó que la mayoría de los circuitos de modulación FM están diseñados principalmente para trabajar con frecuencias de audio, y en algunos casos, no proporcionaban una demodulación adecuada para obtener los componentes de frecuencia en el analizador debido a la naturaleza de su señal portadora. Por lo tanto, se decidió investigar circuitos de modulación AM como alternativa

2.2.5.2 Modulación AM

La modulación AM es relativamente fácil de implementar tanto en transmisores como en receptores. Los circuitos de generación y demodulación de señales AM son menos complejos en comparación con otros métodos de modulación como FM (modulación de frecuencia) o PM (modulación de fase).

De igual manera, en una señal AM, de banda lateral doble y de portadora completa, el espectro de frecuencia de la señal modulada contiene una portadora y dos bandas laterales (superior e inferior), que son espejos de las frecuencias de la señal original (moduladora). Esto facilita la identificación y análisis de las frecuencias de la señal modulada mediante herramientas como el análisis de Fourier.

Se encontró un modulador balanceado en señal AM de baja frecuencia el cual en circuito integrado cuya referencia es: MC1496. Dicho circuito realizaba bien su función, pero no se lograba una correcta amplificación y se necesitaba de circuitos externos para poder obtener alguna imagen en el analizador de espectro por ende se necesitó de un circuito capaz de modular y amplificar la señal y que a su vez realice la combinación de la señal portadora con la señal moduladora y ser transmitida al analizador de espectro con potencia suficiente. Carrillo, (2013)

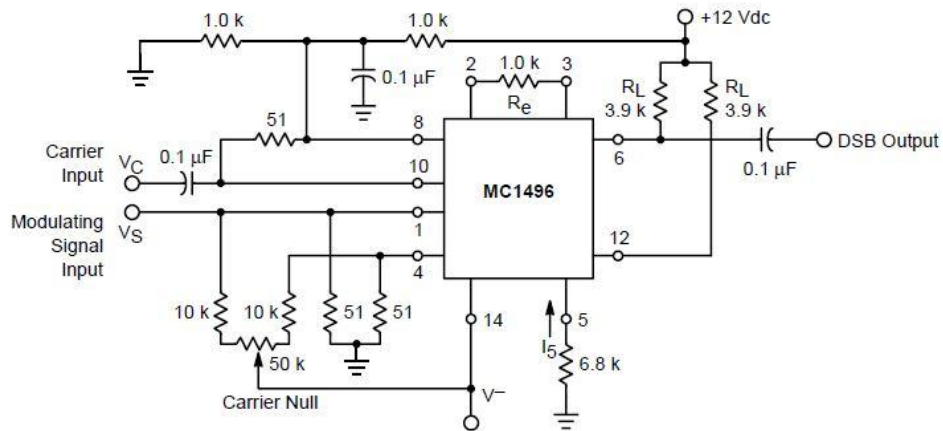


Figura 11 Circuito modulador equilibrado MC1496

El circuito modulador de AM está cuidadosamente diseñado para funcionar dentro del rango especificado del analizador de espectro, asegurando que todas las señales de prueba permanezcan dentro de los límites de frecuencia del instrumento. Esto permite una comparación precisa entre la señal modulada original y las señales recibidas. Se generaron diferentes señales de prueba con distintas frecuencias y amplitudes para realizar el experimento. Los datos obtenidos de estas pruebas se

presentarán en detalle en la siguiente sección.

2.2.5.3 -Controlled AM Transmitter

Según (Mukherji, 2014) Un transmisor AM (amplitud modulada) controlado por cristal utiliza un cristal de cuarzo para establecer y mantener una frecuencia de transmisión estable. Este tipo de transmisor es especialmente útil en aplicaciones donde la precisión y la estabilidad de la frecuencia son esenciales, como en las comunicaciones de radio y en la transmisión de señales de baja potencia. A continuación, te doy un resumen de su funcionamiento y características principales:

2.2.5.4 Análisis de Fourier

▪ Señal Sinusoidal

Para una señal sinusoidal pura, el análisis de Fourier revela que la energía de la señal está concentrada únicamente en una frecuencia específica, conocida como frecuencia fundamental

$$X(t) = \sin w_0 t \quad (6)$$

Dado que la señal sinusoidal no tiene armónicos, su espectro de frecuencia consiste en un solo pico en W_0 . Esto hace que la señal sinusoidal sea la más sencilla en términos de contenido espectral, ya que no presenta componentes adicionales en frecuencias superiores. Alan-V.-Oppenheim-Alan-S.-Willsky-with-S.-Hamid, (1996)

▪ Señal Cuadrada

Una señal cuadrada, que alterna periódicamente entre dos valores (alto y bajo), tiene un espectro de frecuencia más complejo. Su representación de Fourier se compone de una serie de armónicos impares (1er, 3er, 5to, etc.), cada uno con una frecuencia que es un múltiplo impar de la frecuencia fundamental. Si la frecuencia fundamental es W_0 , la serie de Fourier para una señal cuadrada de amplitud A es:

$$X_{am}(t) = \underbrace{\left(A_c + \frac{V_m}{2}\right)}_{\text{Portadora}} \sin(w_c t) + \underbrace{\frac{v_m}{\pi} \cos((w_c - w_o)t) - \frac{v_m}{\pi} \cos((w_c + w_o)t)}_{\text{Portadora+Moduladora}} + \dots \quad (7)$$

Cada armónico tiene una amplitud que disminuye con el orden del armónico, en proporción a $\frac{1}{n}$, donde n es el número del armónico (solo impares). Esto genera un espectro que se atenúa gradualmente, dando lugar a una representación rica en frecuencias que contribuyen a la forma característica de la señal cuadrada.

B.P.LATHI, (2009)

▪ Señal Triangular

La señal triangular es otra forma periódica común que también puede representarse mediante una serie de Fourier, pero en este caso, los armónicos impares disminuyen más rápidamente que en la señal cuadrada. La serie de Fourier de una señal triangular de frecuencia fundamental ω_0 y amplitud A es:

$$X_{am} = A_c [1 + \mu(a_{-5} \dots + a_0 + \dots a_5)] \cos(\omega_c t) \quad (8)$$

En este caso, la amplitud de cada armónico disminuye en proporción a $\frac{1}{n^2}$ para los armónicos impares. Esto provoca una caída más rápida en las frecuencias altas, lo que se traduce en una forma de onda más suave en comparación con la señal cuadrada. Así, el contenido de alta frecuencia es menos prominente en la señal triangular, y el espectro es más concentrado en los primeros armónicos. V.Churchill, (1993)

Nota: para conocer más afondo del proceso teórico de cada señal estudiada se encuentran en el anexo 2 en el documento llamado procesos matemáticos

2.3 Definición de conceptos

2.3.1.1 Definición nominal de conceptos

La fidelidad se midió en términos del error cuadrático medio del nivel de potencia de los componentes de frecuencia de una señal patrón teórica calculados mediante el análisis de Fourier. Los cuales fueron comparados con los mostrados por

el analizador de espectro provenientes de la sonda inalámbrica, aplicada a un circuito de prueba que generaba dicha señal patrón.

2.3.1.2 Definición operativa de conceptos

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y - \bar{y})^2 \quad (9)$$

- y : es el valor de la potencia de un componente de frecuencia de la señal medida en dBm.
- \bar{y} : es el valor de la potencia del mismo componente de frecuencia calculado en forma teórica en dBm.
- n número de componentes de frecuencia considerados en análisis. Para la señal sinusoidal son 3 (portadora + 2 componentes laterales), para la señal diente de sierra son 7 (portadora + 3 componentes laterales derechos + 3 componentes laterales izquierdos), para la señal cuadrada son 9 (portadora + 4 componentes laterales derechos + 4 componentes laterales izquierdos)

Nota: A pesar de que las señales triangular y cuadrada poseen más componentes de frecuencia la magnitud de los componentes incluidos en el análisis corresponde a aquellas que superan el 1% de la magnitud de la portadora los demás componentes no se consideran debido a su baja amplitud

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis de investigación

El error cuadrático medio entre las mediciones obtenidas con la sonda inalámbrica respecto a la estimación teórica realizada mediante análisis de Fourier es inferior a 0.5 dB a nivel de la amplitud de sus componentes, e inferior a 500 Hz a nivel de sus frecuencias.

2.4.2 Hipótesis nula

El error cuadrático medio entre las mediciones obtenidas con la sonda inalámbrica respecto a la estimación teórica realizada mediante análisis de Fourier es superior a 0.5 dB a nivel de la amplitud de sus componentes, e inferior a 500 Hz a nivel de sus frecuencias

2.4.3 Hipótesis alternativa

El error cuadrático medio entre las mediciones obtenidas con la sonda inalámbrica respecto a la estimación teórica realizada mediante análisis de Fourier está en un rango de 0.1 dB y 0.5 dB a nivel de la amplitud de sus componentes, e inferior a 500 Hz a nivel de sus frecuencias

3 Metodología

3.1 Enfoque

El enfoque de este estudio fue cuantitativo, contando con variables relacionadas con el objeto de investigación que se evaluaron numéricamente. Los resultados obtenidos permitieron determinar la fidelidad de la señal recibida por el analizador de espectro, comparándola con una señal de referencia en forma de error.

3.2 Paradigma

Desde un punto de vista epistemológico y metodológico, el modelo que guía la investigación cuantitativa es el positivismo, término instituido por el filósofo francés Auguste Comte Quijano Vodniza, (2009).

Esta investigación es positivista, ya que se busca explicar fenómeno, o predecir. Según lo anterior el prototipo de sonda inalámbrica, se realizaron experimentos de forma controlada, que permitieron medir variables y verificar las hipótesis planteadas.

3.3 Método

Al ser esta investigación cuantitativa, el método que se utilizó es científico, o también conocido como método empírico-analítico Quijano Vodniza (2009), Depende de la fidelidad de la señal generada por los circuitos de prueba desde el análisis teórico y el resultado de sonda inalámbrica para medir las variables de potencia que permitan dar solución al problema de investigación y así validar o rechazar la hipótesis.

3.4 Tipo de investigación

La investigación es de tipo descriptiva, donde se busca estimar el impacto de la transmisión inalámbrica de la señal estudiada, en la potencia de sus componentes de frecuencia, interconectando el prototipo de sonda inalámbrica con el analizador de espectro del laboratorio de la Universidad CESMAG

3.5 Diseño de investigación

El diseño de esta investigación se definió como experimento puro, Se comparó la potencia de los componentes de frecuencia de una señal conocida, extraídos mediante Análisis de Fourier, con respecto a la señal generada usando la sonda inalámbrica.

$$RG1 - O1 O2 \quad (10)$$

$$RG1 X O1 O2 \quad (11)$$

$$RG2 - O1 O2 \quad (12)$$

$$RG2 X O1 O2 \quad (13)$$

$$RG3 - O1 O2 \quad (14)$$

$$RG3 X O1 O2 \quad (15)$$

RG1: Señal Sinusoidal.

RG2: Señal Diente de Sierra (Triangular)

RG3: Tren de pulsos cuadrados.

-: Medida de amplitud y frecuencia de los componentes de la señal, obtenidos mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier.

X: Componentes de frecuencia obtenidos experimentalmente usando el analizador de espectro.

O1: Error cuadrático medio de la amplitud de los componentes de frecuencia

O2: Error cuadrático medio de la frecuencia de los componentes de frecuencia

Nota: El número de experimentos realizados en el proceso de caracterización de la sonda es el siguientes: para la señal sinusoidal se tomaron 31 valores para la frecuencia moduladora, comprendidas entre 10 KHz y 300 KHz e incrementadas en pasos de 10KHz Para la señal diente de sierra (Triangular) se tomaron 3 valores para la frecuencia moduladora: 5KHz, 60KHz, 150KHz, para cada una de ellas se utilizó amplitudes de 200mV y 500mV, Para el tren de pulsos cuadrados se utilizó frecuencias de 3KHz, 30KHz y 100KHz y para cada una de ellas se probó amplitudes de 200mV y 500mV.

3.6 Universo

Prototipo de sonda inalámbrica para la transmisión de los componentes de frecuencia de un circuito de prueba aplicado al analizador de espectro del laboratorio de ingeniería electrónica de la universidad CESMAG. El universo es finito y es accesible.

3.7 Muestra

La muestra en este estudio es equivalente al universo, ya que se analizaron las señales transmitidas y los componentes de frecuencia para su visualización en el analizador de espectro. Dado que el prototipo de sonda inalámbrica está diseñado para evaluar la fidelidad de la señal, la muestra utilizada en el estudio es representativa del universo. Técnicas de recolección de información

Observación directa: la información de referencia se determina a partir del análisis matemático en el dominio del tiempo y la frecuencia de señales conocidas, las cuales son comparadas con los datos obtenidos por el prototipo de sonda inalámbrica. Estos datos se recogen con un analizador de espectro y un osciloscopio, determinando los valores de frecuencia y voltaje. Con estos valores, se realiza una caracterización detallada de la señal bajo prueba.

3.8 Validez de la técnica

La técnica de recolección de información es válida, la medición directa con el analizador de espectro permite establecer las comparaciones deseadas utilizando Análisis de Fourier.

3.9 Confiabilidad técnica

La técnica fue confiable, ya que al repetir el mismo experimento no hubo una variación significativa en los resultados. En ese sentido, el análisis de Fourier, al ser teórico, no presentó variación. De igual manera, el analizador de espectro, al usar la misma señal, mostró los mismos componentes de frecuencia.

3.10 Instrumentos de recolección de la información

Los datos recolectados de la sonda inalámbrica arrojados por el analizador de espectro, corresponden a la frecuencia obtenida por los componentes de la señal medida, fueron recolectados en formato PNG (imagen) o similar para ser evidenciados. Posteriormente se vaciaron en una tabla para estimar el error.

4 Resultados

4.1 Diseño del Prototipo

4.1.1.1 Análisis de las guías de laboratorio para el programa de Ingeniería Electrónica

El analizador de espectro GW-INSTEK 3GHz GSP-730 fue diseñado específicamente para satisfacer las necesidades educativas en el campo de las comunicaciones de Radio Frecuencia (RF). Este equipo cuenta con un amplio rango de frecuencia, desde 150KHz hasta 3GHz, permitiendo abarcar diversos tipos de aplicaciones.

Para identificar las frecuencias utilizadas por los estudiantes en la Universidad CESMAG y optimizar el prototipo destinado al laboratorio, se solicitó el acceso al Banco de Prácticas de Laboratorio del programa de Ingeniería Electrónica en su versión de 2023. En este banco se encuentran registradas diversas prácticas, lo que permitió determinar el rango de frecuencias en el que operan estos montajes. Con estos datos se elaboró la Tabla 1, que presenta la información recopilada sobre las frecuencias utilizadas.

Se logró identificar que en el desarrollo de las prácticas de laboratorio llevadas a cabo en la Universidad CESMAG, las frecuencias empleadas varían en promedio entre aproximadamente 50 Hz y 10 kHz, dependiendo del circuito que se considere. Este espectro de frecuencias demuestra la variedad de experimentos y aplicaciones realizados en el laboratorio, que van desde estudios básicos de circuitos eléctricos hasta análisis más avanzados de señales y sistemas de comunicación.

Tabla 1.

Frecuencias prácticas del laboratorio UNICESMAG, Facultad Ing. electrónica.

| Espacio académico | Práctica | Frecuencia |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Circuitos análogos | Guía laboratorio #2 Filtros activos | $300H_z \rightarrow 4KH_z$ |
| Circuito de corriente Alterna | -Práctica #2 Carga y descarga de un condensador -Implementación de Circuitos RLC | $100H_z \rightarrow 10KH_z$ |
| Comunicaciones digitales. | -Simulación de procesamiento de señales en PCM usando Matlab. Airmax. | $1H_z \rightarrow 100H_z$ |
| Electrónica básica | -Aplicación con diodo Zener | $60H_z \rightarrow 4KH_z$ |
| Sistema de control analógico | -Caracterización Dinámica De Un Motor Dc | $1KH_z \rightarrow 5KH_z$ |

4.1.2 Selección del esquema de modulación

Dado que el analizador de espectro opera dentro de un rango específico de frecuencias, es fundamental identificar un modelo de transmisión, ya sea digital o analógico, que se ajuste a este rango. Los esquemas de modulación analógica más comunes incluyen AM (Amplitud Modulada), FM (Frecuencia Modulada) y PM (Modulación de Fase). En comunicaciones digitales, se encuentran modulaciones como ASK (Modulación por cambio de Amplitud), FSK (Modulación por cambio en Frecuencia), PSK (Modulación por Cambio de Fase), y QAM (Modulación en Amplitud en Cuadratura), entre otras. Es importante destacar que, dependiendo del esquema de modulación elegido, los componentes de frecuencia se presentan de manera diferente en el analizador. La modulación AM tiene la ventaja de conservar las componentes originales de la señal, desplazándolas alrededor de la frecuencia portadora. En cuanto a FM, existen soluciones como tarjetas de desarrollo y moduladores balanceados en circuitos integrados, lo que motivó una exploración de estas alternativas.

4.2 Modelo Esquemático del prototipo de sonda inalámbrica

Para el presente proyecto se tomó como referencia el circuito AM descrito en (Crystal-Controlled AM Transmitter). Este circuito corresponde a un diseño de mediana potencia, lo que permite una evaluación más precisa de su desempeño en las condiciones especificadas.

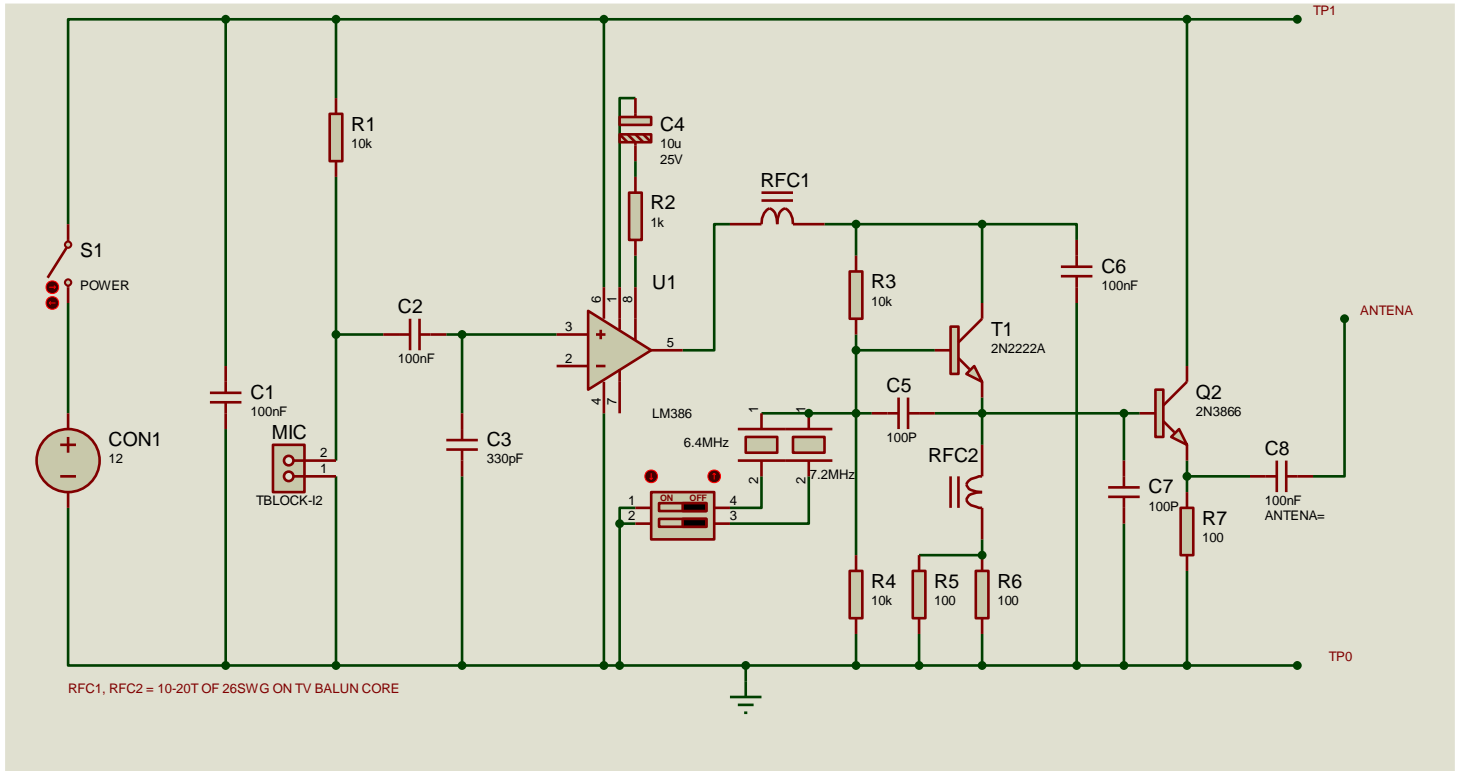


Figura 12. Modelo esquemático (Crystal-Controlled AM Transmitter)

Fuente: MUKHERJI, (2014)

En el modelo esquemático de la figura 12, se identifican diversos aspectos que fueron importantes para el desarrollo e implementación del circuito, garantizando la correcta obtención de la señal de prueba en el analizador de espectro.

Características del sistema

El diagrama del circuito transmisor AM controlado por cristal está construido utilizando un micrófono electret (MICI), un amplificador de audio de baja potencia LM386 (ICI), un interruptor DIP de 2 vías (DIPT), y transistores PN2222A (T1) y 2N3866A (T2). El circuito opera en las frecuencias de 6,4 MHz y 7,2 MHz, y la salida se selecciona mediante una frecuencia de cristal utilizando el interruptor DIP1. El funcionamiento del circuito es relativamente sencillo:

El transistor T1, junto con sus componentes asociados, forma un oscilador Colpitts. En este diseño, las resistencias R1, R2, R3 y R4 proporcionan la polarización adecuada, mientras que los condensadores C2 y C3 se encargan de la retroalimentación. El transistor T1 amplifica las pequeñas oscilaciones generadas por los cristales en las frecuencias fundamentales de X1 o X2. El IC1 se utiliza como modulador en serie para amplificar el audio proveniente del micrófono electret (MICI), que está acoplado directamente al colector del transistor T1. La señal de audio se superpone a la frecuencia portadora variando la entrada de corriente continua (CC) al oscilador, permitiendo así una modulación de hasta el 100% al hablar por el micrófono. El transistor T2 actúa como un seguidor de emisor simple, sirviendo como amortiguador entre el oscilador y el mundo exterior. Aunque el transmisor AM controlado por cristal tiene una modulación de amplitud de solo 40 mW, los picos de modulación pueden alcanzar hasta 160 mW en condiciones de modulación compleja.

El oscilador Colpitts, utilizado en el circuito, es un tipo de oscilador LC que se caracteriza por su capacidad para generar oscilaciones estables en una amplia gama de frecuencias. Su diseño se basa en una configuración de retroalimentación capacitiva, que permite ajustar la frecuencia de oscilación mediante la variación de los capacitores y la inductancia del circuito. En el oscilador Colpitts, se utilizan: una inductancia (L) y dos capacitores (C1 y C2), que forman una red de retroalimentación. La frecuencia de oscilación está determinada por estos componentes y se puede ajustar para cumplir con las especificaciones del circuito. La estabilidad y precisión de las oscilaciones generadas por el Colpitts son esenciales para aplicaciones de transmisión y recepción de señales, ya que garantizan que la frecuencia portadora se mantenga constante y libre de interferencias.

Se analizó el modelo esquemático y se identificó que algunos componentes no estaban disponibles en la ciudad. Por esta razón, se decidió desarrollar un modelo adaptado utilizando componentes adquiridos localmente. Para asegurar la correcta

implementación, se construyó una tabla detallando los elementos necesarios.

Posteriormente, se utilizó el simulador Proteus para verificar si estos componentes alternativos cumplían su función en la modulación AM.

Tabla 2

componentes modelo esquemático

| Cantidad | Elemento |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | LM386 circuito integrado que contiene un amplificador de potencia de audio de bajo voltaje. |
| 1 | PN2222A |
| 1 | 2N3053 |
| 7 | Resistor Valores (1k, 10k, 10ohm) |
| 8 | Condensador Valores (100nf, 100pf, 10ufx25v, 330pf) |
| 1 | Cristal Valor (8Mhz) |
| 2 | Bobinas de choque con valores variados |
| 1 | Analizador de espectro |
| 1 | Multímetro digital ut -50c |
| 1 | Generador de señales con contador de frecuencia |
| 1 | Fuente digital doble regulada |

4.3 Modelo esquemático simulado Proteus)

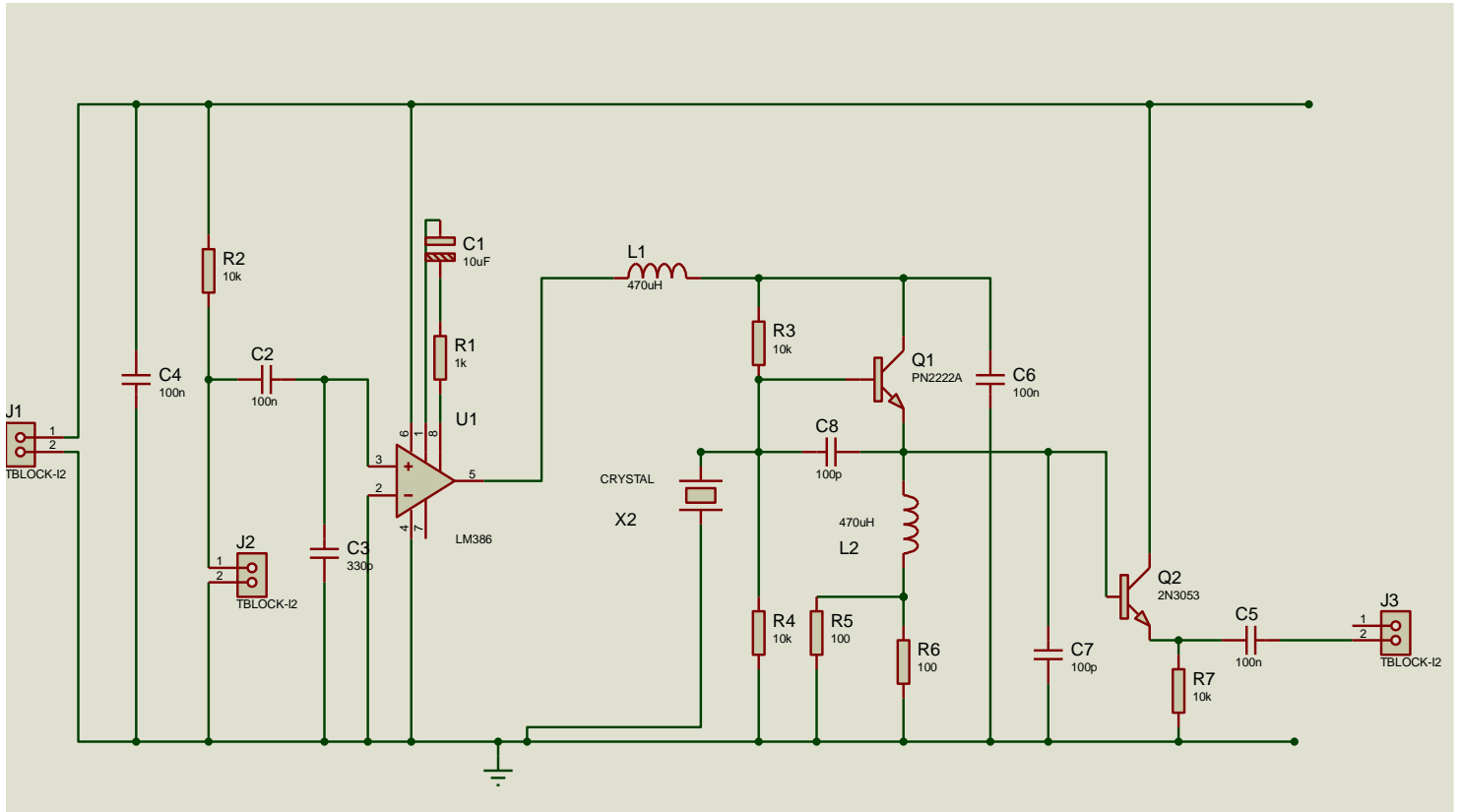


Figura 13 Circuito (Crystal-Controlled AM Transmitter) simulación proteus

Diagrama de funcionamiento

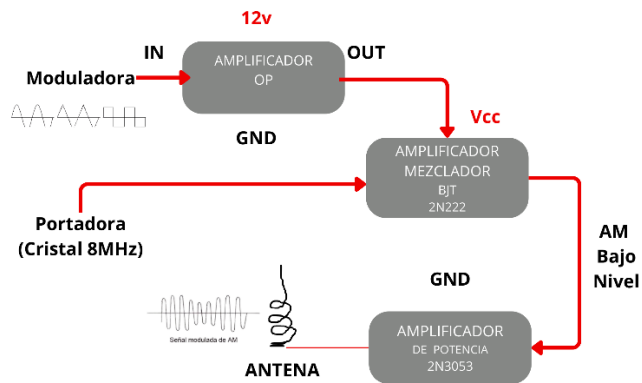


Figura 14 Circuito (Crystal-Controlled AM Transmitter) Diagrama funcionamiento

El diagrama de funcionamiento muestra el proceso completo de la sonda. La señal moduladora entra al sistema a través de un amplificador operacional, que amplifica la señal y la envía a otros componentes amplificadores (2N2222 y 2N3053) con una ganancia 20 (o 26Db). La señal portadora, generada por un cristal de 8 MHz que oscila a esta frecuencia, ingresa al amplificador 2N2222, donde se mezcla con la señal moduladora. La señal resultante, una combinación de ambas, es enviada al amplificador de potencia 2N3053 para ser irradiada mediante una antena y observada en el analizador de espectro, en este caso en modulación AM.

La Figura 15 muestra la señal obtenida a partir de la simulación del prototipo. Ello permitió verificar su funcionamiento y proceder a su implementación en protoboard para comprobar lo obtenido.

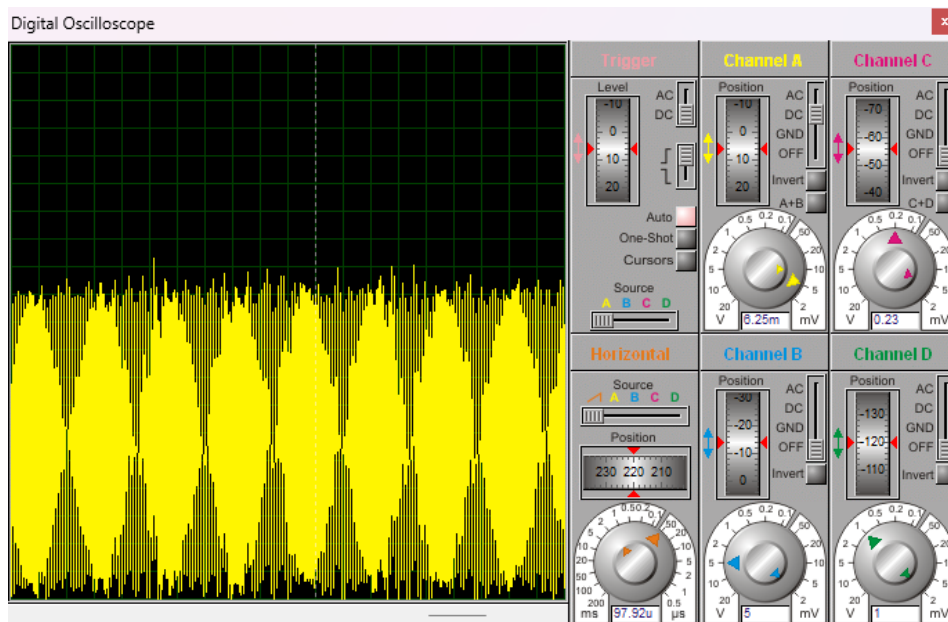


Figura 15 Circuito (Crystal-Controlled AM Transmitter) señal simulada

Modelo PCB de la sonda inalámbrica

El circuito implementado en la PCB presenta una vista aproximada del montaje final de la sonda inalámbrica, mostrando el posicionamiento preciso de los componentes y la distribución estratégica de las pistas. Estas pistas tienen un ancho de 40 Thou (equivalente a 1.016 mm), mientras que la huella pasante para U1 es de tipo C90-40, y para los demás componentes (exceptuando J1, J2 y J3) es de tipo C70-30. Los conectores J1, J2 y J3 cuentan con huella pasante de tipo C120-60. Los

archivos de diseño fueron exportados en formato Gerber (.GBR) y posteriormente grabados utilizando una máquina CNC en el laboratorio, garantizando una buena calidad en las conexiones eléctricas. Las dimensiones finales de la PCB son de 9 cm de ancho por 9 cm de largo, proporcionando un montaje compacto.

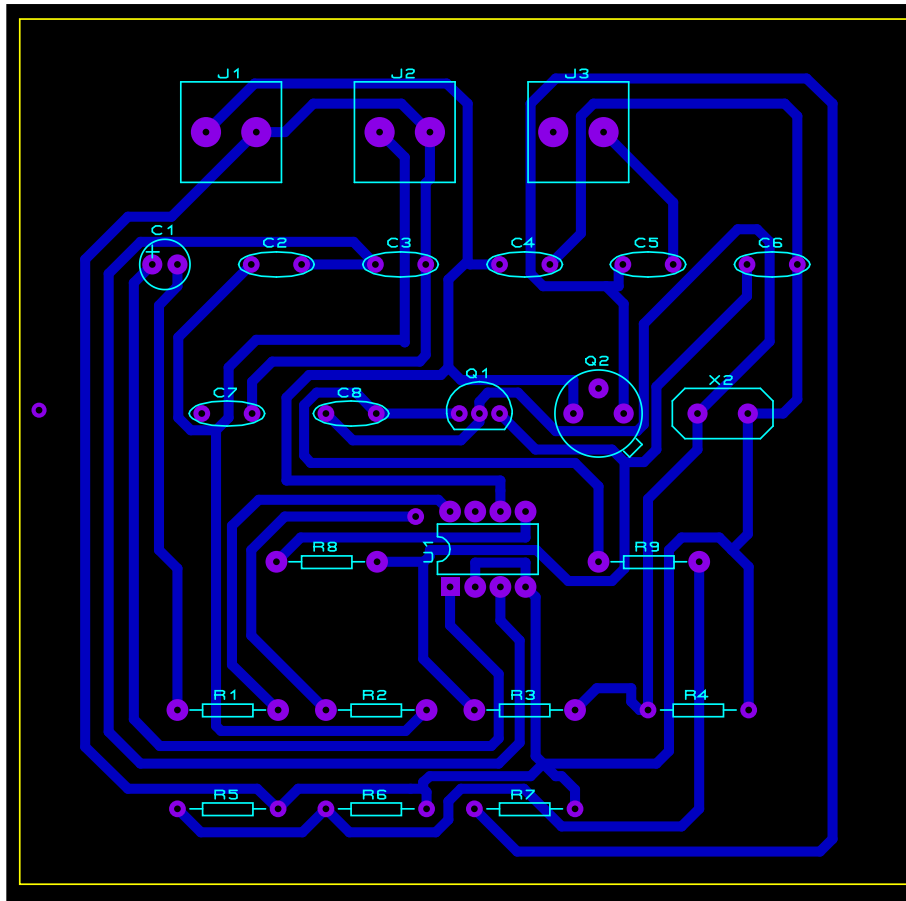


Figura 16 Circuito (Crystal-Controlled AM Transmitter) PCB resultado final sonda inalámbrica

Diseño 3D

Modelo de recipiente de contención para el prototipo de sonda inalámbrica, diseñado específicamente para el analizador de espectro. Diseño realizado en TinkerCad, su cuerpo principal posee las siguientes medidas: largo (12.5cm), ancho (9.5cm), alto (6cm) con un borde interno de 0.5cm. La tapa posee las siguientes medidas: largo (12.5cm), ancho (9.5cm), alto (0.9cm). Los archivos fueron exportados en extensión (.STL) y fueron impresos en 3D en el Laboratorio de Ingeniería Electrónica.

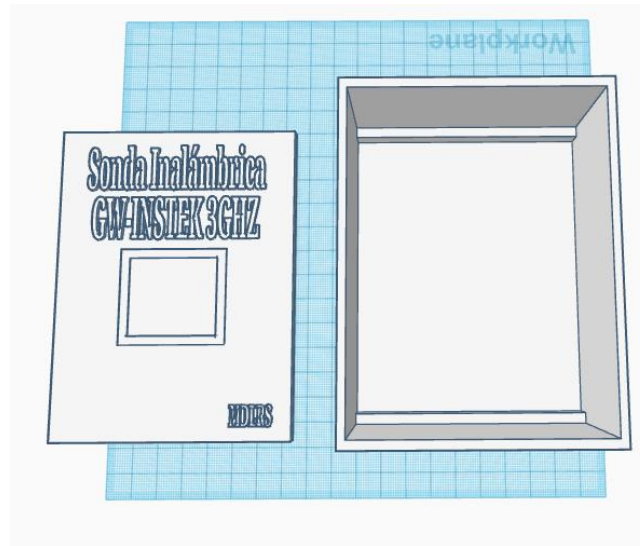


Figura 17 Diseño 3D caja repositorio del prototipo, sonda inalámbrica

Prototipo final sonda inalámbrica

Resultado final del prototipo de la sonda inalámbrica con todos los componentes integrados en su placa PCB. El prototipo está organizado y alojado en un compartimiento diseñado en 3D, que no solo facilita el manejo de la sonda, sino que también asegura una conservación de sus componentes internos. En la salida del prototipo, se encuentra un cable que actúa como una antena tipo monopolo, con una longitud de 7.5 metros la cual se la determinó de la siguiente manera.

$$L = \frac{c}{4f} \quad (16)$$

donde:

- L es la longitud de la antena en metros,
- C es la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s),
- f es la frecuencia de operación en hercios (Hz)

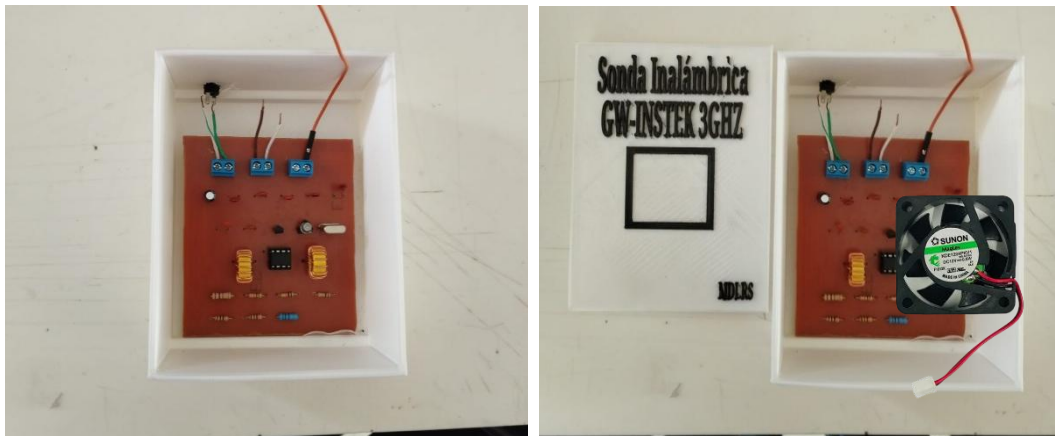


Figura 18 Circuito (Crystal-Controlled Am Transmitter) prototipo de sonda inalámbrica

4.4 Caracterización

La obtención de datos de la sonda inalámbrica abarca la medición de componentes de frecuencia y la distancia relativa entre la antena de recepción y el prototipo, según se detalla en el esquema de conexión presentado en la Figura 19 y 20. En esta caracterización, se implementaron tres señales de prueba: la señal sinusoidal, el tren de pulsos cuadrados y la señal diente de sierra (triangular). Estas señales fueron escogidas debido a que son muy conocidas y facilitan el estudio de sus componentes de frecuencia. Para cada una de estas señales, se extrajeron datos sobre voltaje, frecuencia y amplitud. Estos datos fueron posteriormente comparados con modelos simulados de las mismas señales en MATLAB, con el fin de evaluar el funcionamiento de la sonda y analizar los comportamientos que presenta al recibir estas señales.

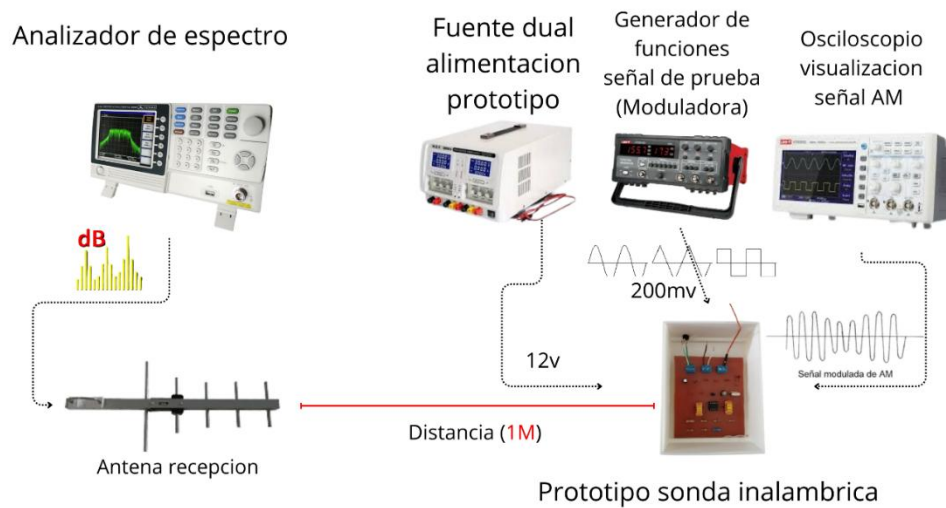


Figura 19 Circuito (Crystal-Controlled Am Transmitter) prototipo de sonda inalámbrica.



Figura 20 Circuito (Crystal-Controlled Am Transmitter) prototipo de sonda inalámbrica caracterización de sonda

4.4.1 Señal sinusoidal

En primera instancia, se utiliza la señal senoidal ya que es la más simple para obtener componentes de frecuencia en el analizador de espectro. Cuando se visualiza una señal senoidal en un analizador de espectro, se verá como un pico o una línea en el espectro, correspondiente a la frecuencia de oscilación de la señal. La altura de

este pico indica la potencia recibida de la señal senoidal. Sin embargo, si hay otras señales presentes en el espectro, como ruido de fondo o señales armónicas, estos también se mostrarán en el espectro y podrían afectar su apariencia.

De igual manera esta señal sirve de referencia para calibrar y calcular los componentes de frecuencia de la señal triangular como del tren de pulsos cuadrados.

En la figura 21 se observa el comportamiento ideal de una señal sinusoidal en su transformada de Fourier.

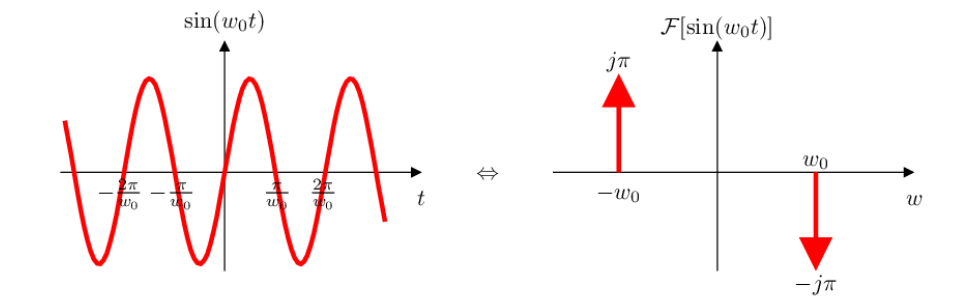


Figura 21 transformada de Fourier función seno

Fuente: (HERRERA, 2014)

Tras la obtención de la señal AM con moduladora senoidal en el analizador de espectro, se procedió a realizar una caracterización detallada para comprobar su fidelidad. Como parte de este proceso, la Tabla 3 permite observar y analizar el comportamiento de la señal modulada para diferentes frecuencias y amplitudes de la moduladora, lo que permite evaluar el comportamiento del prototipo.

Tabla 3.

Frecuencias y voltajes de operación del prototipo de sonda

| Frecuencia de la señal moduladora senoidal | Voltaje pico de la señal moduladora Senoidal | Voltaje mínimo de la señal AM | Voltaje máximo de la señal AM | Configuración del analizador – Frecuencia Izquierda | Configuración del analizador – Frecuencia Derecha |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| | | | | | |

| | | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|---------|---------|
| 100 KHz | 20mv | 100mv | 4.02v | - | 8MHz |
| | 600mv | N/A | - | - | - |
| 150KHz | 20mv | 200mv | 6.8v | 7.85Mhz | 8.15Mhz |
| 200KHz | 20mv | 400mv | 7.0v | 7.8Mhz | 8.2Mhz |
| 250KHz | 20mv | 600mv | 7.80v | 7.74Mhz | 8.26Mhz |
| 300KHz | 20mv | 0v | 8.20v | 7.7Mhz | 8.3Mhz |

En la tabla anterior se presentan todos los datos obtenidos, tanto de frecuencia como de voltaje, de la señal modulada en AM sinusoidal. Para ilustrar con mayor detalle cómo se extrajeron estos datos, se muestra en la Figura 22 y 23 el procedimiento realizado

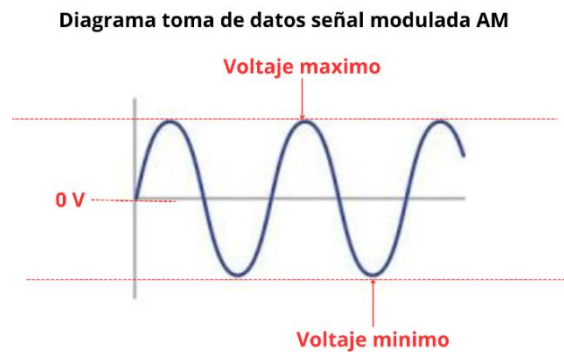


Figura 22 Diagrama obtención voltaje máximo y mínimo señal sinusoidal

**Diagrama toma de datos señal modulada AM
Analizador de espectro**

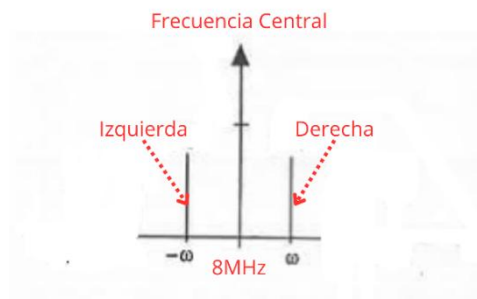


Figura 23 Diagrama obtención frecuencia señal sinusoidal

4.4.1.1 Simulación (Matlab)

En el proceso de caracterización del prototipo se utilizó una señal sinusoidal modulada usando AM. Mediante un script de MATLAB se generó una señal ideal de AM con características controladas, variando las frecuencias desde 10 kHz hasta 300 kHz en incrementos de 10 kHz. Esta estrategia permitió comparar los resultados obtenidos del prototipo con los valores esperados en cada rango de frecuencia. El análisis reveló no sólo la precisión del prototipo en replicar la señal sinusoidal modulada, sino también su ancho de banda, destacando cualquier desviación o error en el comportamiento del sistema, especialmente en la fidelidad de la modulación AM a lo largo del espectro de frecuencias evaluado.

En la figura 24 se evidencia los componentes de frecuencia obtenidos del script de Matlab para la señal modulada en AM senoidal que posteriormente se centralizan en una tabla donde se observa el comportamiento de esta señal al ser sometida a diferentes frecuencias en este caso a una frecuencia de 100KHz

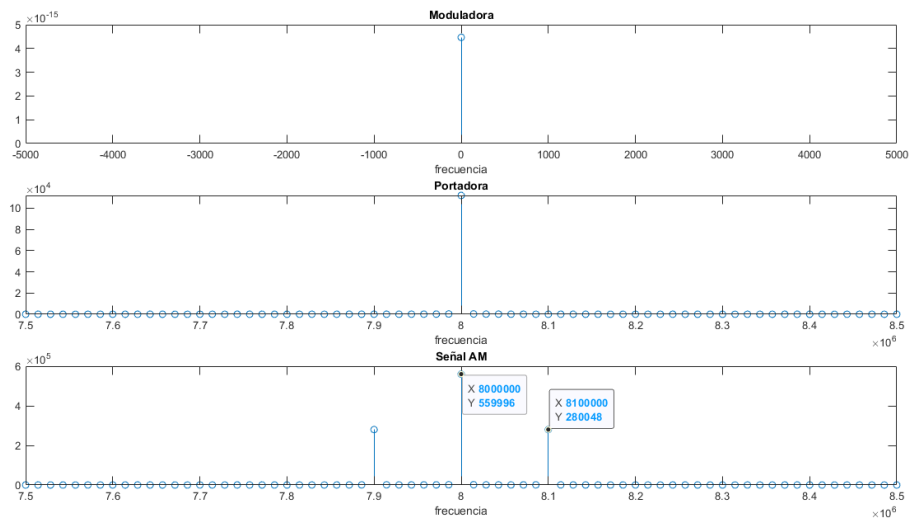


Figura 24 transformada de Fourier simulación Matlab componentes de frecuencia señal sinusoidal

Los datos obtenidos de las pruebas realizadas con la señal sinusoidal modulada en AM se colocaron en la Tabla 4, que relaciona cada frecuencia utilizada, desde 10 kHz hasta 300 kHz en incrementos de 10 kHz, con los valores medidos de amplitud.

Una vez se obtuvo los valores de amplitud de los componentes de la señal sinusoidal, se procedió a convertirlos en escala logarítmica para poder compararlos con los datos obtenidos en el analizador, que arroja valores en dBm,

Amplitud relativa componente késimo

$$= 20 \log_{10}(\text{amplitud portadora}) - 20 \log_{10}(\text{amplitud componete késimo}) \quad (17)$$

Tabla 4.

Datos Amplitud señal sinusoidal 10KHz-100KHz

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| Frecuencia moduladora senoidal (KHz) | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| Amplitudes componentes de frecuencia(dBm) Prototipo | 5 | 13 | 16 | 22 | 26 | 23 | 23 | 25 | 14 | 3 |
| Amplitudes componentes de frecuencia (Matlab) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |

Tabla 5.

Datos Amplitud señal sinusoidal 110KHz-200KHz

| | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Frecuencia moduladora senoidal (KHz) | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 | 190 | 200 |
| Amplitudes | 12 | 15 | 13 | 14 | 13 | 11 | 10 | 12 | 12 | 10 |

| | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| componentes de frecuencia(dBm) | | | | | | | | | | | |
| Prototipo | | | | | | | | | | | |
| Amplitudes | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| componentes de frecuencia (Matlab) | | | | | | | | | | | |

Tabla 6.

Datos Amplitud señal sinusoidal 210KHz-300KHz

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Frecuencia | 210 | 220 | 230 | 240 | 250 | 260 | 270 | 280 | 290 | 300 |
| moduladora senoidal (KHz) | | | | | | | | | | |
| Amplitudes | 9 | 9 | 10 | 8 | 9 | 10 | 9 | 7 | 8 | 8 |
| componentes de frecuencia(dBm) | | | | | | | | | | |
| Prototipo | | | | | | | | | | |
| Amplitudes | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| componentes de frecuencia (Matlab) | | | | | | | | | | |

Una vez organizados los datos de los componentes de frecuencia (bandas laterales) de la señal modulada en AM, se procedió a graficar la información obtenida en la Tabla 4, 5 y 6, como se muestra en la Figura 25, con el fin de visualizar el comportamiento del prototipo en función de la frecuencia.

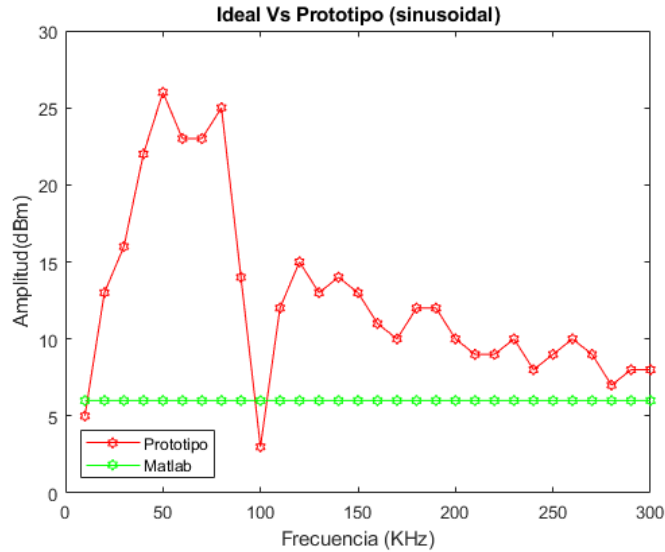


Figura 25 señal sinusoidal, frecuencias 10KHz-300KHz, comportamiento prototipo sonda inalámbrica

Al comparar los resultados obtenidos del prototipo, se observa que, a medida que los componentes de frecuencia se alejan de la frecuencia de la portadora, hay un decaimiento progresivo en la amplitud de dichos componentes. Este comportamiento es clave para determinar el ancho de banda efectivo del prototipo. Lo interesante es que, a pesar de este decaimiento general, se destacan dos regiones en las que la amplitud se mantiene más o menos constante: la primera, entre 50 KHz y 90 KHz, y la segunda, entre 110 KHz y 300 KHz. Estas zonas de estabilidad en la amplitud indican áreas de mayor consistencia en la transmisión, lo que es útil para evaluar el rendimiento y las limitaciones del sistema en el procesamiento de señales.

4.4.1.2 Variación de amplitud de la señal moduladora sinusoidal

Para evaluar el comportamiento de la señal modulada en Am, se modificaron la frecuencia y amplitud de la señal moduladora sinusoidal, observando cómo estos cambios afectan la señal resultante. Se conectó la señal portadora al prototipo con una frecuencia de 8 MHz y una alimentación de 12 V. Posteriormente, se realizaron mediciones utilizando un osciloscopio, capturando el comportamiento de la señal modulada. Con el fin de ver como esta señal se comporta al ser expuesta a diferentes frecuencias esto permite delimitar un rango de frecuencia aceptable para un buen

funcionamiento del prototipo con lo anteriormente mencionado permitió observar los componentes de frecuencia en la señal modulada senoidal.

En la Figura 26, se muestra la señal modulada en AM. La señal no presenta sobre modulación y el comportamiento del prototipo es estable. La frecuencia de la señal moduladora es de 100 kHz y la frecuencia de la señal portadora es de 8 MHz.

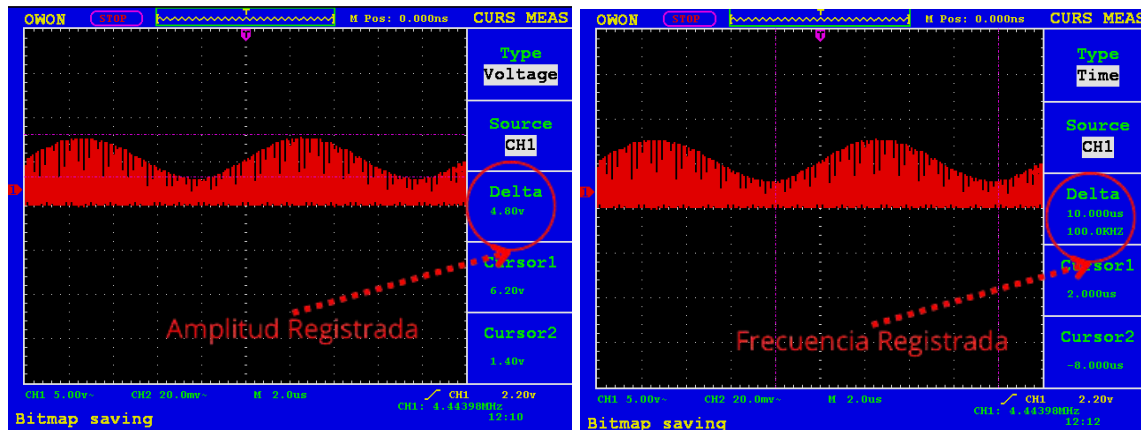


Figura 26 señal de referencia osciloscopio voltaje-tiempo amplitud señal sinusoidal

En la Figura 27, la señal registrada en el osciloscopio muestra un leve incremento en la amplitud, de la señal modulada, lo que provoca un aumento en el voltaje máximo. Este comportamiento indica una falta de simetría en las crestas de la señal modulada.

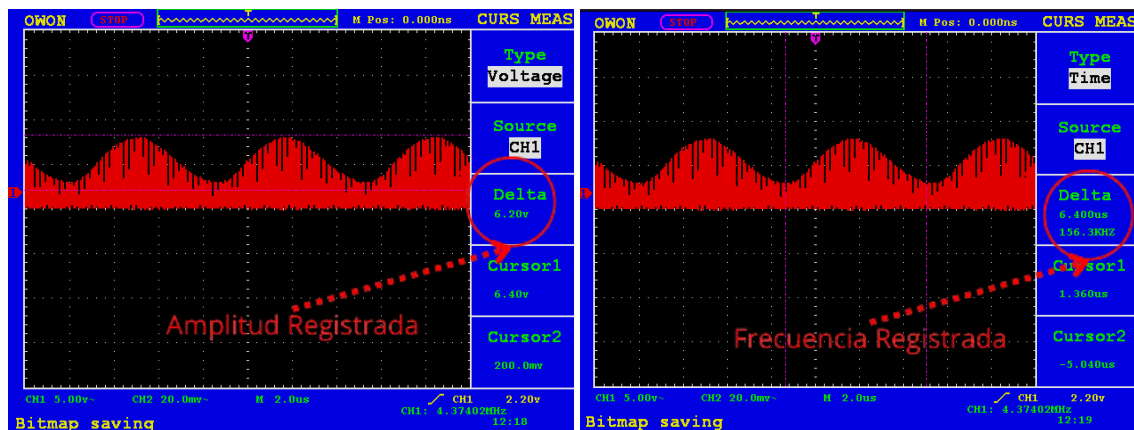


Figura 27 señal de referencia osciloscopio voltaje-tiempo amplitud señal sinusoidal falta de simetría.

En la Figura 28, se muestra que la señal obtenida en el osciloscopio comienza a deformarse al incrementar la frecuencia, lo que resulta en una medición menos precisa. En el analizador de espectro, los valores de voltaje también experimentan cambios.

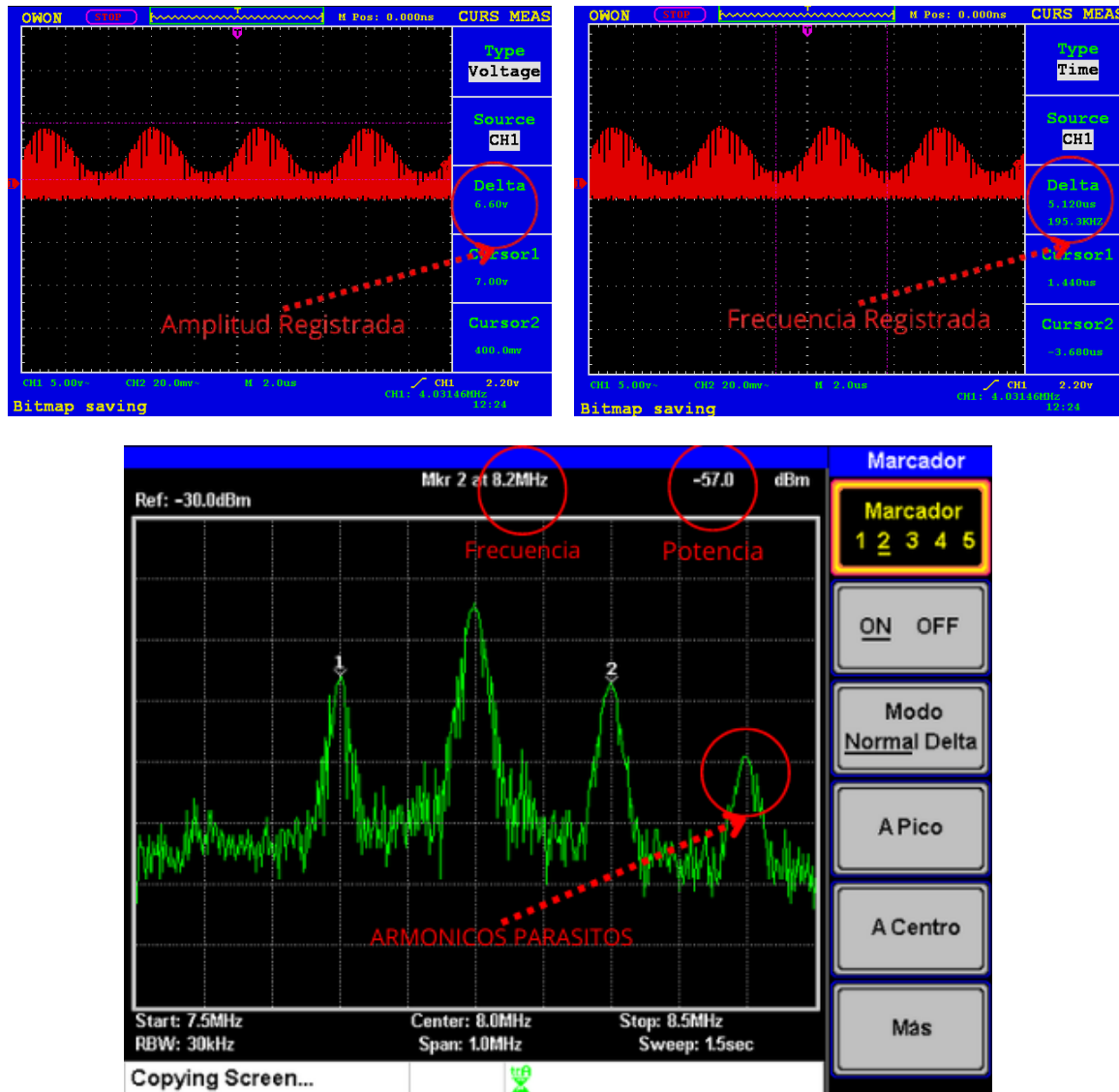


Figura 28 señal de referencia osciloscopio voltaje-tiempo amplitud señal sinusoidal, primeros índices de sobre modulación 200KHz.

En la figura 29. La señal observada en el osciloscopio muestra una deformidad considerable a medida que se incrementa la frecuencia. Este comportamiento permitió identificar el rango de frecuencia en el cual la señal no se ve afectada, asegurando así una correcta lectura de sus componentes de frecuencia en el analizador.

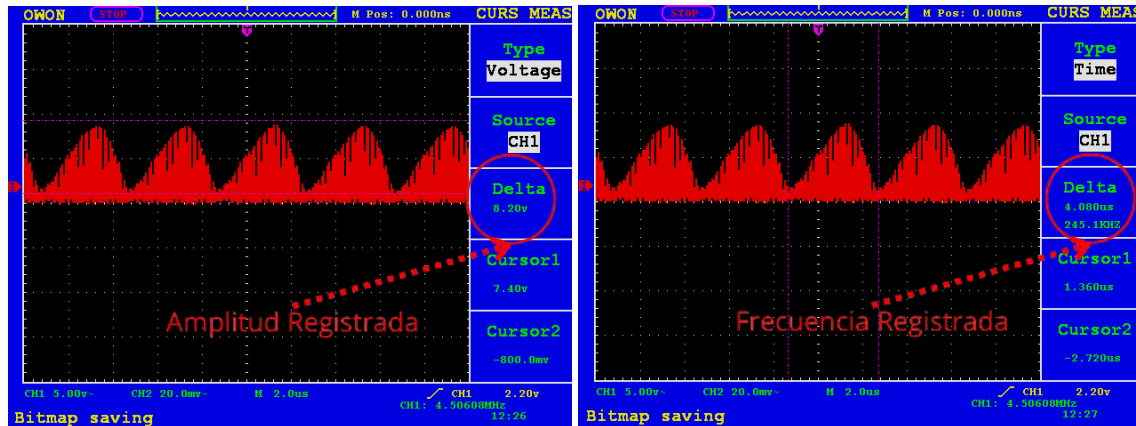


Figura 29 señal de referencia osciloscopio voltaje-tiempo amplitud señal sinusoidal, señal sobre modulada, perdida de simetría.

En la figura 30. La señal de referencia al llegar a una frecuencia de 300KHz presenta una deformidad bastante considerable. Para una señal moduladora sinusoidal, la sonda presenta un ancho de banda de trabajo de 300 KHz y un voltaje de operación de entre 20 y 500 mV

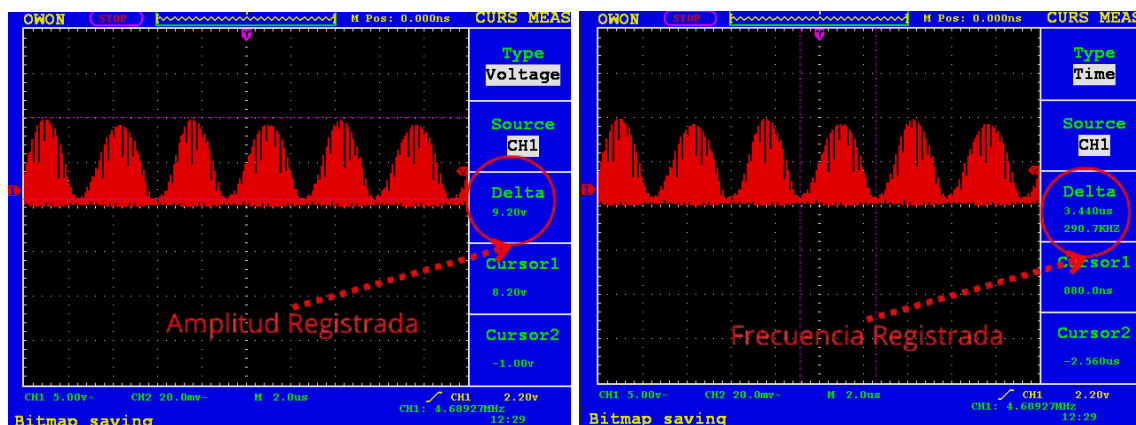


Figura 30. señal de referencia osciloscopio voltaje-tiempo amplitud señal sinusoidal, señal sobre modulada, perdida de simetría.

4.4.1.3 Variación de frecuencia de la señal moduladora

Para evaluar el comportamiento de la señal modulada en AM, se ajustaron la frecuencia y la amplitud de la señal moduladora sinusoidal, observando cómo estos cambios impactan en la señal resultante. La señal portadora, con una frecuencia de 8 MHz y una alimentación de 12 V, se conectó al prototipo, y posteriormente se realizaron mediciones con un osciloscopio para capturar el comportamiento de la señal modulada. Este análisis permitió observar cómo la señal modulada responde a diferentes frecuencias, lo cual ayudó a definir un rango de frecuencia adecuado para el buen funcionamiento del prototipo. Además, se identificaron los componentes de frecuencia presentes en la señal modulada sinusoidal, lo que es fundamental para evaluar su desempeño. Estos aspectos permiten determinar los fenómenos que el prototipo presenta al ser sometido a variaciones de frecuencia, proporcionando una visión clara de su estabilidad y respuesta ante dichas condiciones.

En la Figura 31, se muestra la primera obtención de la señal de referencia en el analizador de espectro. Se observa el pico central correspondiente a la señal portadora a una frecuencia de 8MHz, con dos réplicas de la señal portadora más la señal moduladora a ambos lados a su lado izquierdo con una frecuencia de 7.9MHz y a su derecha de 8.1MHz, inyectada por el generador de funciones.

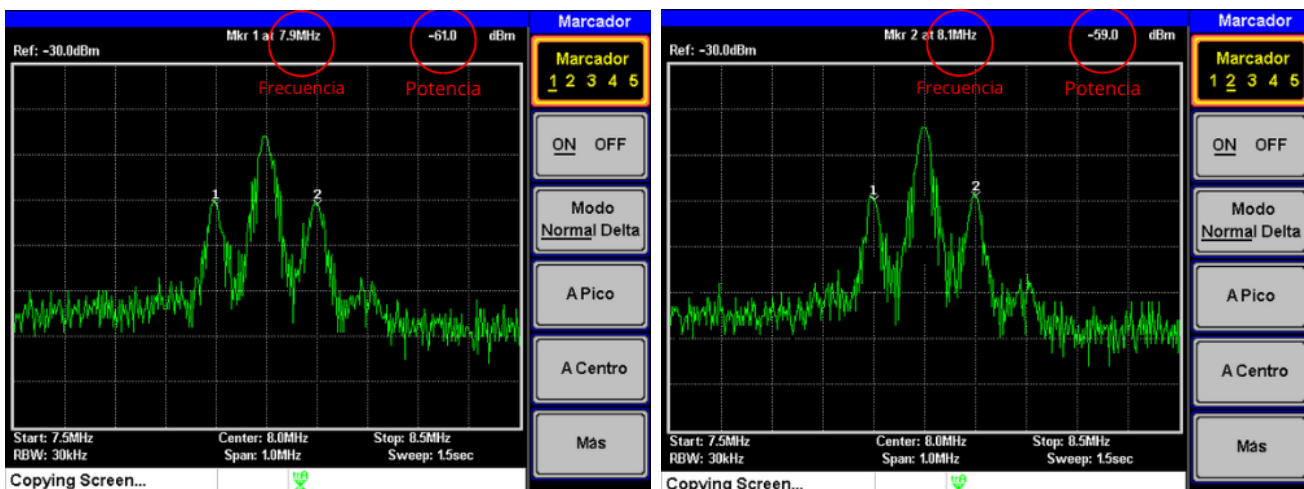


Figura 31 señal de referencia analizador de espectro Frecuencia 100Khz

En la Figura 32. A medida que se incrementa la frecuencia de la señal de referencia suministrada por el generador de funciones, se observa que los picos a los lados de la señal de 8 MHz se separan, aunque mantienen su estructura en este punto. La frecuencia moduladora es de 150 kHz, generando Componentes de frecuencia laterales a 7.85 MHz y 8.15 MHz.

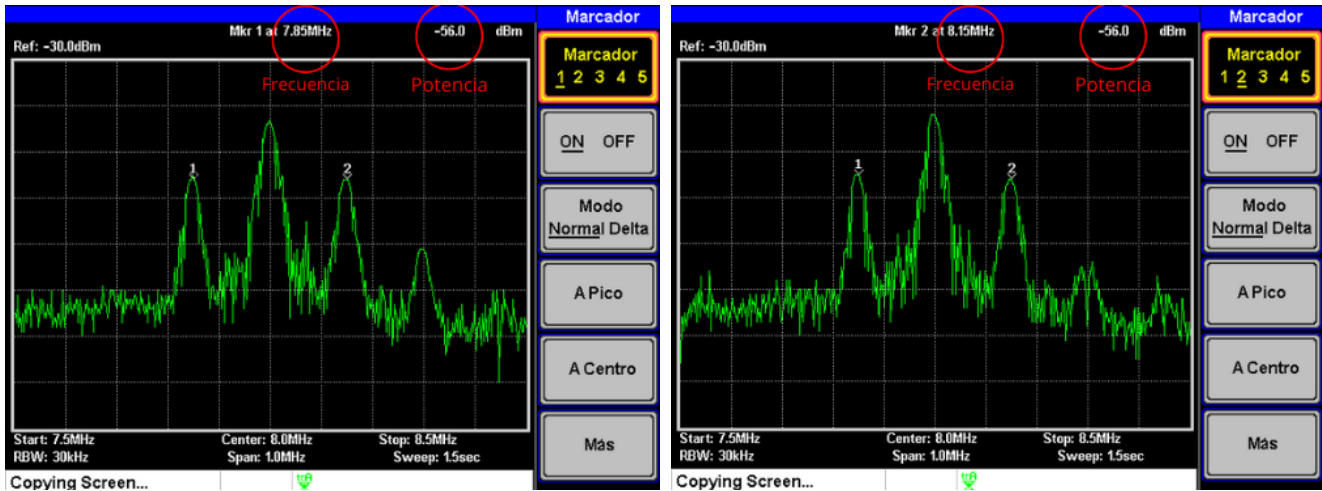


Figura 32 señal de referencia analizador de espectro Frecuencia 150Khz

En la Figura 33, al incrementar la frecuencia moduladora, en este caso a 200KHz. Se puede observar en el analizador de espectro la presencia de armónicos o señales parasitas en la transmisión de la señal de referencia se pierde fidelidad de lectura en el equipo generando componentes de frecuencia a sus laterales a 7.8MHz y 8.2MHz.

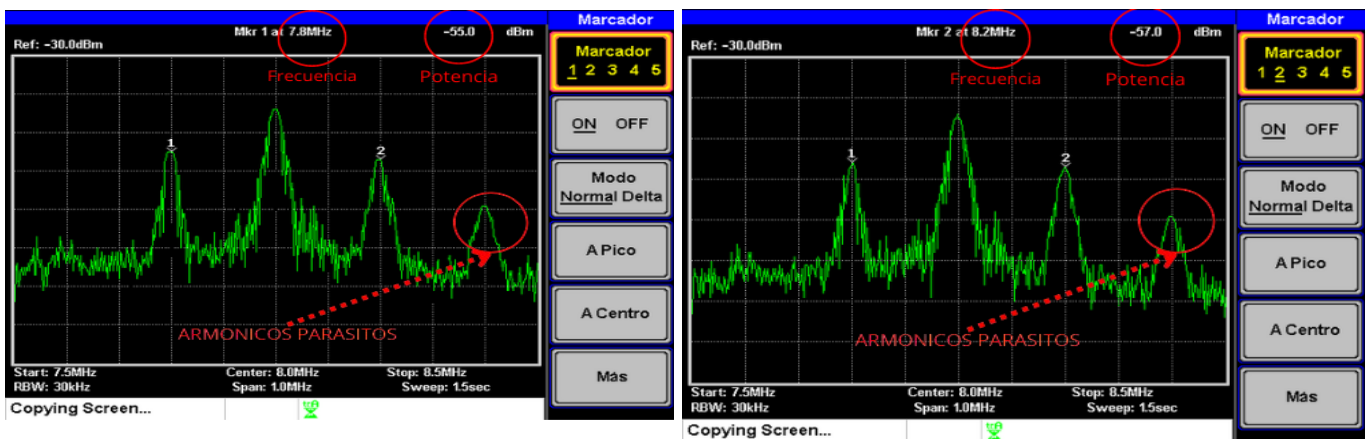


Figura 33. señal de referencia analizador de espectro Frecuencia 200Khz

En la Figura 34, aumenta la presencia de armónicos en la obtención de la señal de referencia en el analizador de espectro el incremento de frecuencia impide la buena obtención de los componentes de frecuencia de la señal aplicada, los componentes de frecuencia.

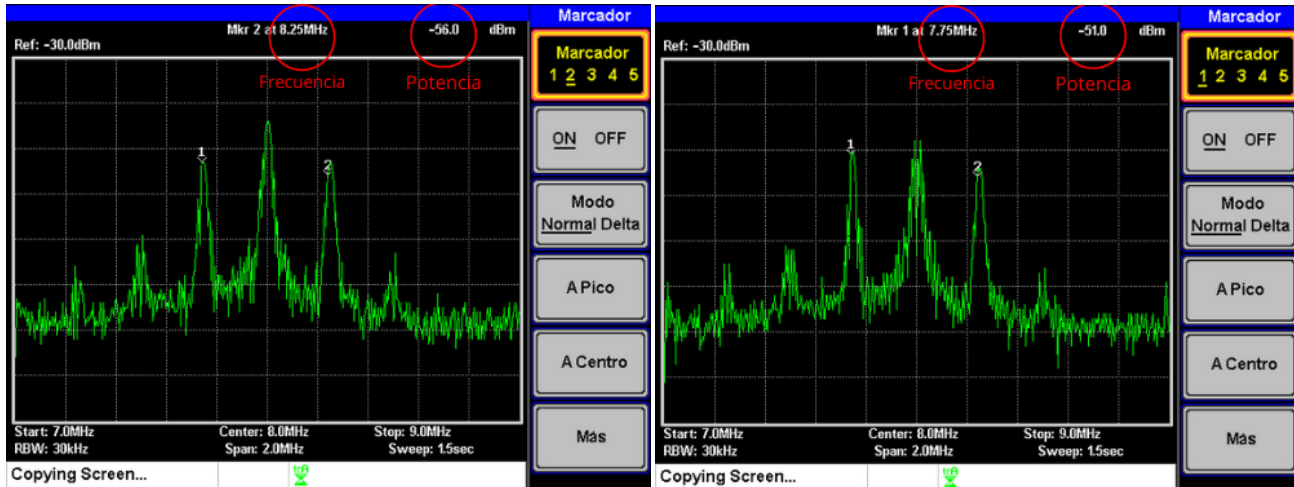


Figura 34 señal de referencia analizador de espectro Frecuencia 250Khz

En la Figura 35, al llegar al límite de frecuencia que se tomó como ejemplo, la señal de referencia obtenida en el analizador de espectro presenta armónicos en una cantidad considerable, describiendo la distorsión que se hizo evidente en la Figura 32, componentes de frecuencia registrados en sus laterales a 7.7MHz y 8.3MHz

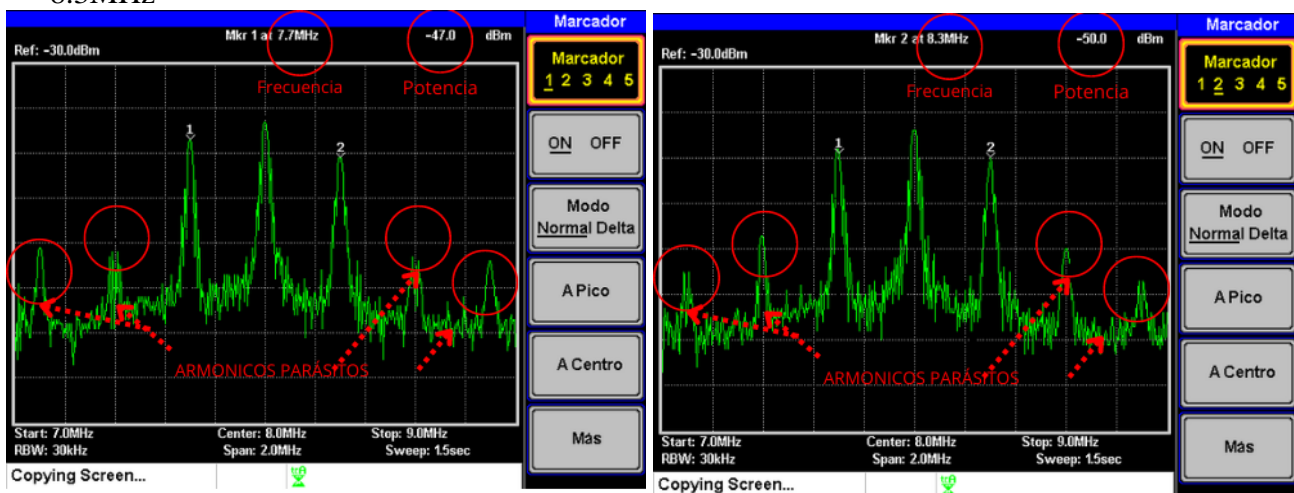


Figura 35 señal de referencia analizador de espectro Frecuencia 300Khz

La Tabla 7 presenta los valores experimentales obtenidos de la sonda, correspondientes a las frecuencias y amplitudes de sus componentes en las bandas laterales. Estos datos se utilizaron para validar el comportamiento del prototipo en diferentes días para posteriormente determinar que tan variables son estos valores.

Tabla 7

Datos experimentales señal modulada AM. Sinusoidal, componentes de frecuencia del prototipo con sus respectivas fechas.

| Datos experimentales señal modulada AM Sinusoidal | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----|-----|----------------------------|-----|-----|-----------------------------|-----|-----|
| Frecuencia Moduladora (KHz) | Banda Lateral Inferior-BLI (MHz) | Banda Lateral Superior - BLS(MHz) | Amplitud (dBm) | | | | | | | | |
| | | | Experimento 1 9/04/2024 | | | Experimento 2 4/07/2024 | | | Experimento 3 14/08/2024 | | |
| | | | Porta dora | BLI | BLS | Porta dora | BLI | BLS | Porta dora | BLI | BLS |
| 100 | 8.1 | 7.9 | -44 | -61 | -59 | -44 | 52 | -57 | -37 | 34 | -32 |
| 150 | 8.15 | 7.85 | -44 | -56 | -56 | -44 | 50 | -50 | -37 | 50 | -52 |
| 200 | 8.2 | 7.8 | -44 | -57 | -55 | | | | -36 | 46 | -46 |

4.4.2 Tren de pulsos cuadrados

4.4.2.1 Simulación usando Matlab

Se procedió a tomar mediciones en el prototipo y se implementó un código en Matlab de una señal de pulso cuadrado donde se obtienen datos ideales de lo que se espera en la modulación AM con respecto al valor obtenido en el prototipo.

En el script de Matlab se utilizó la Transformada Rápida de Fourier para obtener los componentes de frecuencia de la señal. En este script se encuentran datos esenciales para comprender qué componentes se debería obtener en el prototipo. Todos estos Los detalles del código escrito usando Matlab se pueden consultar en el Anexo 1.

Para la señal modulada con un pulso cuadrado, se limitó la frecuencia moduladora a un rango de 5 a 150 kHz, eligiendo una frecuencia de 30 kHz. Esta selección se debe a que, al trabajar con componentes de frecuencia más numerosos en el pulso cuadrado, se alcanza una sobremodulación en frecuencias superiores a 40 kHz. Este fenómeno se evidencia en el apartado de variación de frecuencia de la señal moduladora de tren de pulsos cuadrados, donde se observa cómo la elección de 30 kHz permite un funcionamiento estable sin sobremodulación significativa.

Para la señal de tren de pulsos cuadrados, como se mencionó anteriormente, se utilizó una frecuencia de 30 kHz y una amplitud de 200 mV. Esta configuración se eligió debido a los fenómenos observados en la señal modulada en AM, ya que la señal cuadrada presenta una mayor cantidad de componentes de frecuencia en comparación con las señales sinusoidal y triangular. Al trabajar con esta frecuencia, se evita alcanzar niveles de sobremodulación, lo que permite mantener una señal simétrica en sus picos superior e inferior. Esta simetría es esencial para minimizar la aparición de ruido o armónicos parásitos, obteniendo así componentes de frecuencia más limpios y precisos, ideales para un análisis posterior.

En la Figura 36, se evidencian los componentes de frecuencia obtenidos mediante la Transformada Rápida de Fourier en un script de Matlab, todo este proceso se puede observar en el Anexo 3, proceso componentes de frecuencia

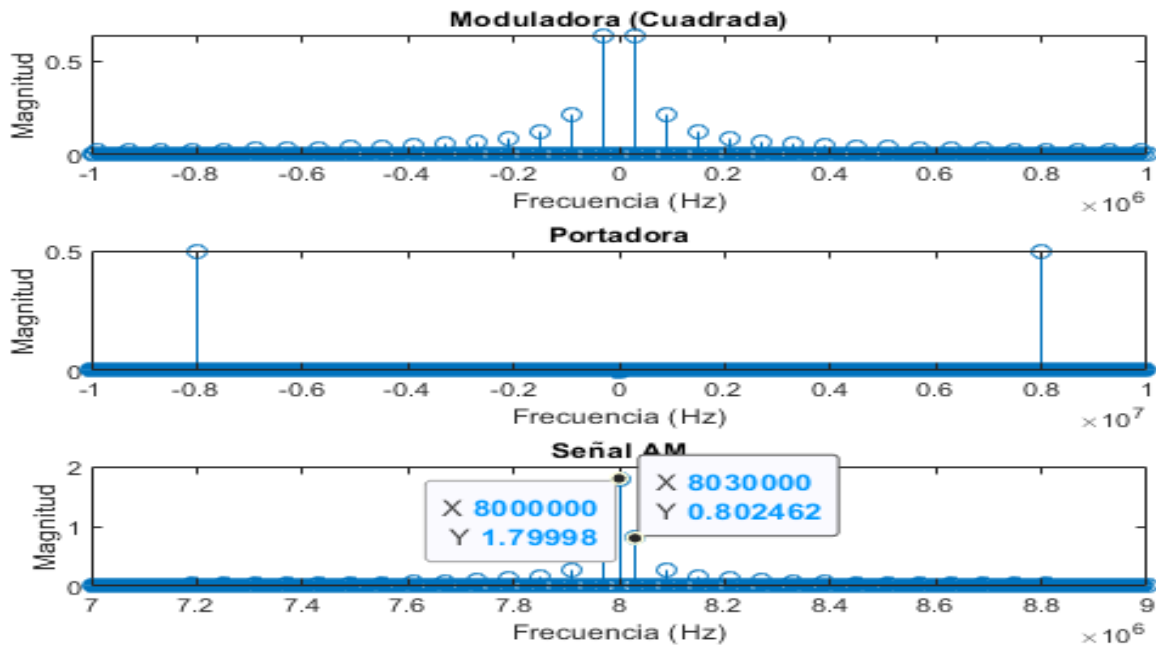


Figura 36 señal Pulso cuadrado, frecuencia 30KHz componentes de frecuencia esperados (simulación Matlab)

Una vez se obtuvo los valores de amplitud de los componentes del tren de pulsos, se procedió a convertirlos en escala logarítmica para poder compararlos con los datos obtenidos en el analizador, que arroja valores en dBm, de la siguiente manera:

Amplitud relativa componente késimo

$$= 20 \log_{10}(\text{amplitud portadora}) - 20 \log_{10}(\text{amplitud componente késimo}) \quad (18)$$

En la tabla 8 se encuentran valores obtenidos de la simulación, frecuencias y amplitudes de cada componente en decibelios (dB).

Tabla 8.

Datos simulación (Matlab) tren de pulsos cuadrados señal AM modulada

| | | | | | | |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Frecuencias, señal AM | 8.030 | 8.090 | 8.150 | 8.210 | 8.270 | 8.330 |
| modulada con tren de | | | | | | |

| pulsos cuadrados Matlab (MHz) | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Amplitud, componentes de frecuencia tren de pulsos cuadrados Matlab (dB) | 7.01686 | 16.56 | 20.99 | 23.92 | 26.10 | 27.84 |

A partir de los datos de la Tabla 8, se observa que. a medida que las frecuencias se alejan de la portadora, la amplitud de los componentes de frecuencia disminuye gradualmente. Esta disminución en la amplitud provoca que las diferencias entre los valores simulados y medidos se incrementen, como se refleja en la tabla.

4.4.2.2 Variación de amplitud del tren de pulsos cuadrados

Para la señal cuadrada, se estableció una frecuencia de operación de 30 kHz y una amplitud de 200 mV, ya que a amplitudes superiores a 500 mV se presenta sobremodulación, lo que genera distorsión en la señal modulada. Esta distorsión se manifiesta como una amplitud no simétrica en la señal. El prototipo, por su parte, está alimentado con un voltaje de 12 V y utiliza una señal portadora de 8 MHz, como se describe a continuación.

En la figura 37 se establece una frecuencia de 3KHz y una amplitud de 200mV para la señal moduladora cuadrada. Se nota que la señal AM resultante no presenta sobre modulación, es decir, se observa una simetría en su amplitud superior e inferior.

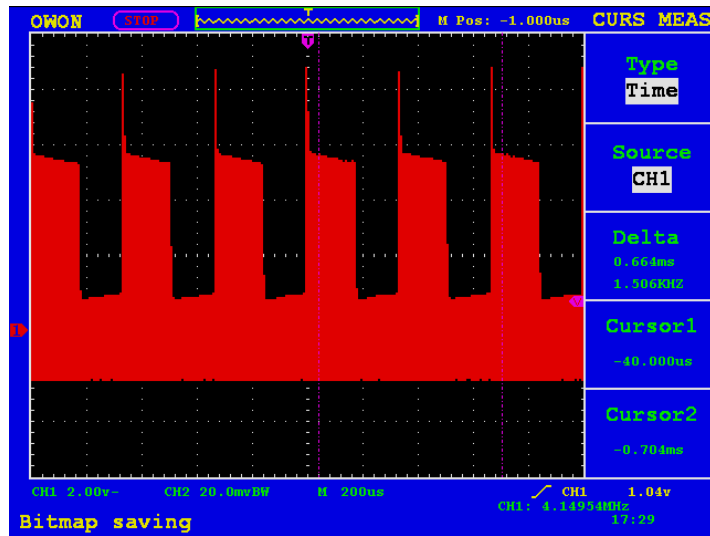


Figura 37 señal Pulso cuadrad, frecuencia 3KHz a 200mV, señal estable

En la figura 38, Cuando se utilizan amplitudes superiores, se produce sobremodulación, que se manifiesta en el analizador como componentes de frecuencia no deseados, conocidos como armónicos. Estos armónicos interfieren con la lectura precisa de la señal y dificultan la obtención de mediciones exactas. En el dominio del tiempo, se observa una distorsión significativa en la amplitud de la señal, tanto en los picos superiores como en los inferiores, mostrando una notable asimetría y el fenómeno de Gibbs.

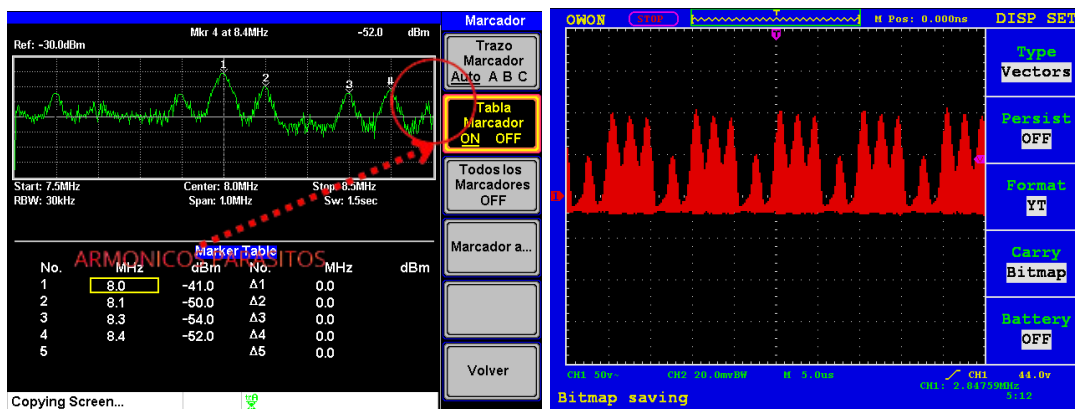


Figura 38 señal Pulso cuadrado, frecuencia 100KHz, señal sobre modulada

En la Figura 39. se observa el comportamiento de la señal modulada en AM correspondiente al tren de pulsos cuadrados a una frecuencia de 30 kHz. Aunque esta frecuencia está dentro del rango considerado como estable, al incrementar su amplitud a 500 mV, se aprecia que la señal presenta sobre modulación. Esto sugiere

que, a pesar de estar en el rango de frecuencia adecuado, el aumento de amplitud afecta la estabilidad de la señal modulada presentando deformidad en la señal impidiendo una lectura de sus componentes de frecuencia.

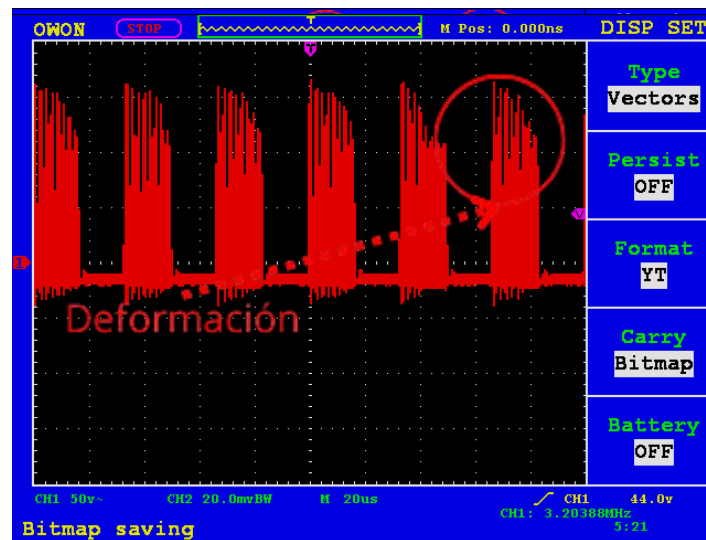


Figura 39 señal Pulso cuadrado, frecuencia 30KHz amplitud incrementada 500mV, presencia de asimetría en la señal.

4.4.2.3 Variación de frecuencia de la señal moduladora tren de pulsos cuadrados

Para la señal cuadrada, se estableció una frecuencia de operación de 30 kHz y una amplitud de 200 mV, debido a la presencia de sobre modulación a frecuencias superiores a 40 KHz, lo que genera distorsión en la señal modulada. Esta distorsión se manifiesta principalmente a través de armónicos no deseados, también conocidos como armónicos parásitos, los cuales dificultan la correcta obtención de los componentes de frecuencia de la señal analizada. El prototipo está alimentado con un voltaje de operación de 12 V y utiliza una señal portadora de 8 MHz, como se describe a continuación.

En la Figura 40, se observa la señal obtenida del analizador de espectro para una frecuencia moduladora que no genera sobre modulación en este caso a 30KHz, lo que indica una señal estable. A partir de esta figura, se obtuvieron las potencias necesarias para compararlas con la simulación realizada en MATLAB.

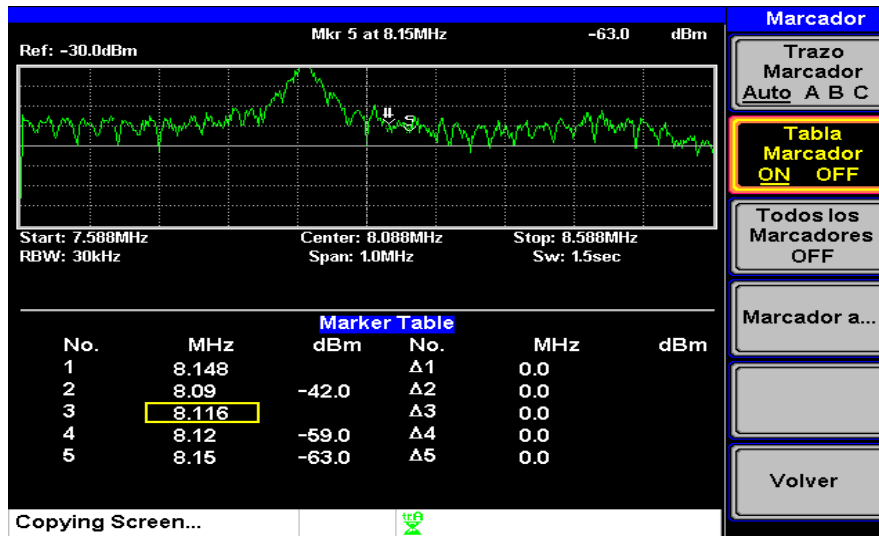


Figura 40 señal Pulso cuadrado, frecuencia 30KHz componentes de frecuencia obtenidos (prototipo-analizador de espectro)

En la Figura 41, se observa la presencia de sobremodulación al ser expuesta la señal de tren de pulso cuadrado a una frecuencia de 80KHz (superior al límite de 40KHz). En este caso el analizador de espectro muestra armónicos que explican la distorsión que se origina en la señal de AM resultante.

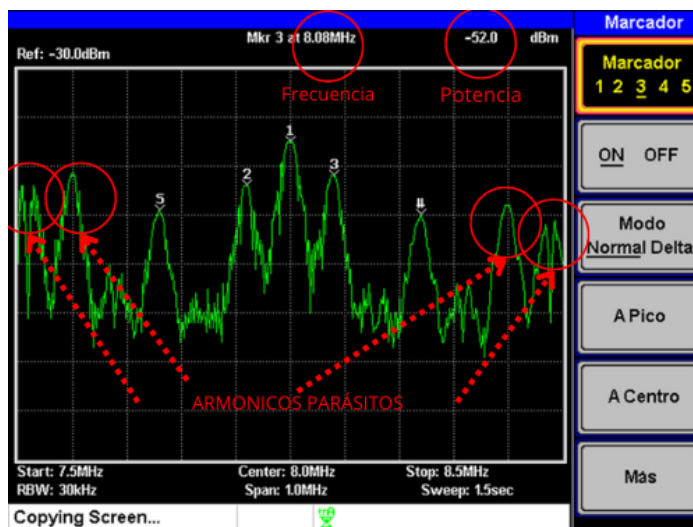


Figura 41. señal Pulso cuadrado, frecuencia 80KHz, presencia de sobre modulación

Con el fin de establecer las condiciones de operación del prototipo ante un tren de pulsos cuadrados actuando como señal moduladora, se extrajo de la Figura 40 las amplitudes de los componentes de frecuencia en dBm para ser comparados con los datos obtenidos de la simulación en Matlab. Estos datos fueron consignados

en la Tabla 9.

Ya que en la simulación los valores obtenidos corresponden a la magnitud de cada componente con respecto a la magnitud de la portadora, medidos en decibelios (dB), se procede a calcular dicha diferencia a partir de los datos recolectados en el analizador de espectro. Es decir, aplicamos la fórmula (19), así:

$$\begin{aligned} & \textit{Amplitud relativa componente késimo} \\ & = \textit{Amplitud portadora} - \textit{Amplitud componente késimo} \end{aligned} \quad (19)$$

En la Tabla 9, se presentan los valores obtenidos del prototipo, incluyendo las frecuencias y las amplitudes de cada componente en decibelios (dB) tras aplicar el cálculo previamente mencionado.

Tabla 9.

Datos analizadores de espectro (prototipo) señal AM modulada con tren de pulsos cuadrados

| | | | | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Frecuencias, señal AM modulada con tren de pulsos cuadrados MATLAB(MHz) | 8.030 | 8.090 | 8.150 | 8.210 | 8.270 | 8.330 |
| Frecuencias, señal AM modulada con tren de pulsos cuadrados prototipo (MHz) | 8.030 | 8.090 | 8.150 | 8.210 | 8.270 | 8.330 |
| Amplitud, componentes de frecuencia tren de pulsos cuadrados, Prototipo (dB) | 13 | 13 | 34 | 37 | 36 | 38 |

Igual que en el apartado anterior los componentes de frecuencia obtenidos corresponden aproximadamente a los esperados en la simulación. Además, las diferencias en amplitud entre los datos medidos y simulados siguen la misma tendencia, lo que indica que el comportamiento general del sistema es consistente, aunque existen ligeras variaciones que pueden deberse a factores como la precisión de los instrumentos o las condiciones experimentales.

La Tabla 10 muestra los datos recopilados en diferentes fechas sobre los componentes de frecuencia de la señal modulada AM con un tren de pulsos cuadrados. Estos datos se utilizaron para analizar el comportamiento del prototipo y evaluar su variabilidad a lo largo del tiempo.

Tabla 10.

Datos experimentales señal modulada AM. Tren de pulsos cuadrados componentes de frecuencia del prototipo con sus respectivas fechas

| Datos experimentales señal modulada AM Tren de pulsos cuadrados | | | | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|-----|-----|---------------|-----|-----|
| | | | Amplitud (dBm) | | | | | |
| | | | Experimento 1 | | | Experimento 2 | | |
| | | | 10/05/2024 | | | 4/07/2024 | | |
| Frecuencia Moduladora (KHz) | Banda Lateral Inferior-BLI (MHz) | Banda Lateral Superior-BLS (MHz) | Portadora | BLI | BLS | Portadora | BLI | BLS |
| 100 | 8.1 | 7.9 | -43 | -61 | -59 | -41 | -50 | -57 |
| | 8.3 | 7.7 | -45 | -55 | -61 | -41 | -54 | -55 |
| | 8.4 | 7.6 | -42 | -54 | -57 | -41 | -52 | -52 |
| 23/05/2024 | | | | | | | | |
| 200 | 8.2 | 7.8 | -35 | -48 | -52 | | | |
| | 8.4 | 7.6 | -38 | -57 | -65 | | | |
| | 8.6 | 7.4 | -41 | -63 | -68 | | | |
| 9/08/2024 | | | | | | | | |
| 30 | 8.03 | 7.97 | -44 | -42 | -42 | | | |
| | 8.09 | 7.91 | -29 | -50 | -52 | | | |
| | 8.15 | 7.85 | -37 | -63 | -61 | | | |
| | 8.21 | 7.79 | -28 | -73 | -73 | | | |
| | 8.27 | 7.73 | -37 | -65 | -67 | | | |
| | 8.33 | 7.67 | -29 | -67 | -65 | | | |
| 4/07/2024 | | | | | | | | |
| 80 | 8.08 | 7.92 | -44 | -52 | -53 | | | |
| | 8.24 | 7.76 | -47 | -60 | -59 | | | |
| | 8.4 | 7.6 | -38 | -58 | -52 | | | |

4.4.3 Señal Diente de sierra (triangular) como moduladora

4.4.3.1 Simulación usando Matlab

Se procedió a tomar mediciones de la señal resultante del prototipo y se implementó un código en Matlab que generara los componentes de frecuencia teóricos correspondientes, que permitan llevar a cabo una comparación.

Para la señal de diente de sierra (triangular), se limitó el rango de frecuencia de operación entre 3 kHz a 100 kHz, eligiendo una frecuencia de 60 kHz con una amplitud de 200 mV. Esta configuración fue seleccionada porque la señal no presentaba sobremodulación y mostraba una simetría adecuada en sus picos superior e inferior. Esto evita la distorsión causada por los componentes de frecuencia adicionales que pueden inducir sobremodulación, como se detalla en el apartado de variación de amplitud de la señal moduladora de diente de sierra (triangular).

En la Figura 42, se evidencian los componentes de frecuencia obtenidos mediante la Transformada Rápida de Fourier de los componentes de frecuencia de la señal modulada en AM en un script de Matlab. Todo este proceso se puede observar más detalladamente en el Anexo 3, proceso componentes de frecuencia.

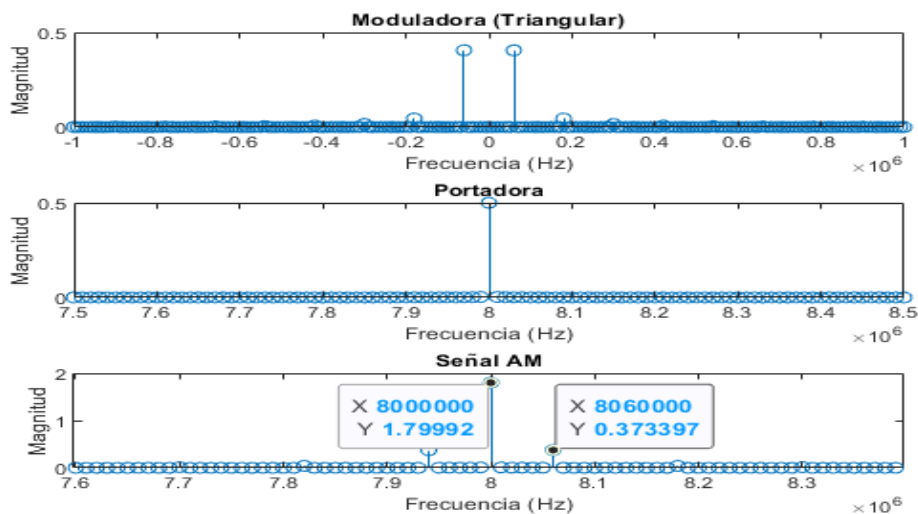


Figura 42 señal diente de sierra (Triangular), frecuencia 60KHz componentes de frecuencia esperados (simulación Matlab)

Una vez se escogió la señal a calcular, se implementó los valores en un script de Matlab y se obtuvo los valores en voltaje. Posteriormente fueron convertidos a escala logarítmica para poder compararlos con los datos obtenidos en el analizador de espectro, que arroja valores en dBm.

Para obtener los valores en dB de los componentes de frecuencia en la simulación de MATLAB, se aplica la siguiente fórmula: estos valores se expresan en dB y no en dBm, ya que representan la diferencia de amplitud entre la señal portadora y un componente específico, en lugar de una medida absoluta de potencia.

$$\begin{aligned} & \textit{Amplitud relativa componente késimo} \\ & = 20(\textit{amplitud portadora}) - 20 (\textit{amplitud componete késimo}) \end{aligned} \quad (20)$$

En la tabla 11, se encuentran valores obtenidos de la simulación, frecuencias y amplitudes relativas a la portadora de cada componente en decibelios (dB).

Tabla 11.

Datos simulación (Matlab) diente de sierra (Triangular), señal AM modulada

| | | | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| Frecuencias, señal AM modulada con diente de sierra (Triangular) (MHz) | 8.60 | 8.180 | 8.300 |
| Amplitud, componentes de frecuencia diente de sierra (Triangular) Matlab (dB) | 13.66 | 32.72 | 41.56 |

A partir de los datos de la Tabla 11, se observa que. a medida que las frecuencias se alejan de la portadora, la amplitud de los componentes de frecuencia disminuye gradualmente. Esta disminución en la amplitud provoca que las diferencias entre los valores simulados y medidos se incrementen

4.4.3.2 Variación de amplitud de la señal moduladora diente de sierra (Triangular) como moduladora

Para la señal triangular, se seleccionó una frecuencia en la cual el prototipo mantuviera estabilidad sin presentar distorsión, comúnmente conocida como sobre modulación. Se buscó que la señal fuera lo más simétrica posible, tanto en su parte superior como inferior. A diferencia de la señal de pulso cuadrado, la señal triangular mostró un mejor comportamiento, ya que sus componentes de frecuencia son menores, lo que contribuye a una mayor estabilidad y menor distorsión en el sistema.

Para la señal diente de sierra (Triangular) se limitó la frecuencia a 60KHz con amplitud de 200mV, ya que la sonda presenta una sobremodulación en frecuencias superiores a 80KHz.

En la Figura 43, se muestra la obtención de la señal diente de sierra (triangular) con una frecuencia de 5 kHz y una amplitud de 200 mV. La señal es estable y no presenta sobre modulación, en el dominio del tiempo se observa una simetría en su amplitud tanto en la parte superior como en la inferior. Además, la señal está modulada en AM con una frecuencia portadora de 8 MHz.

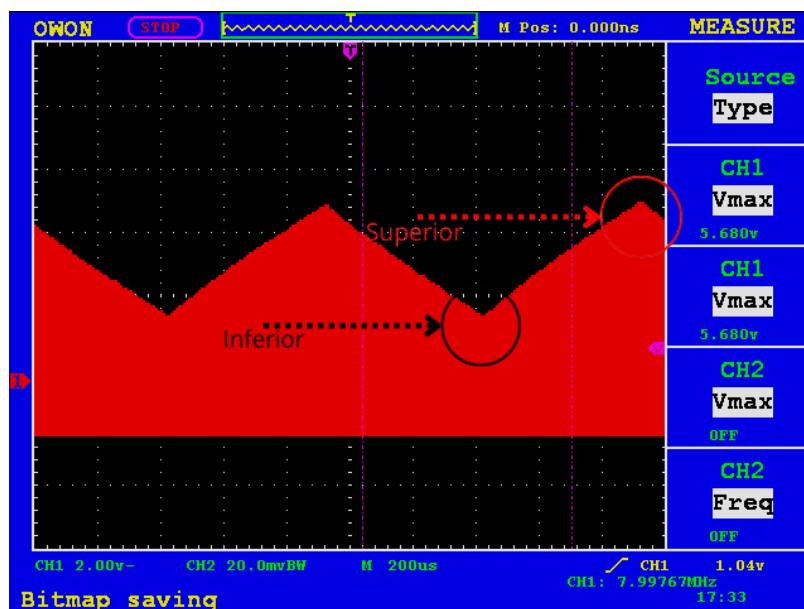


Figura 43 señal Triangular, frecuencia 5KHz señal estable

En la Figura 44 se observa el comportamiento de la señal modulada en AM correspondiente a la señal diente de sierra (Triangular) a una frecuencia de 60 kHz. Aunque esta frecuencia está dentro del rango considerado como estable, al incrementar su amplitud a 500 mV, se aprecia que la señal presenta sobre modulación. Esto sugiere que, a pesar de estar en el rango de frecuencia adecuado, el aumento de amplitud afecta la estabilidad de la señal modulada, generando una lectura incorrecta de sus componentes de frecuencia

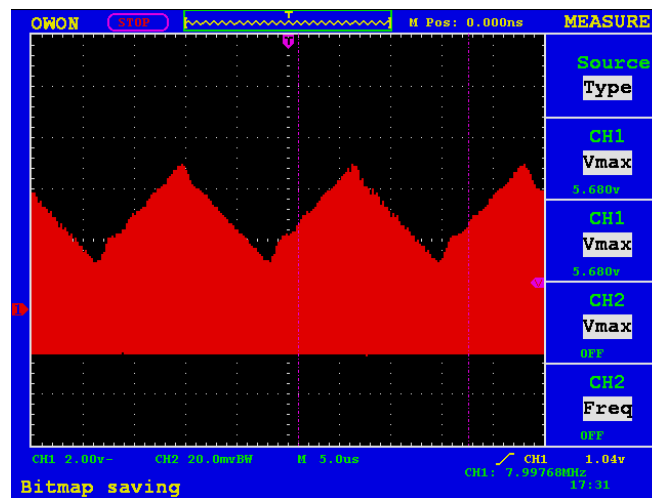


Figura 44 señal diente de sierra (Triangular), frecuencia 60KHz amplitud incrementada 500mV, señal sobre modulado lado derecho, lado izquierdo frecuencia 60KHz amplitud de 200Mv.

En la Figura 45 se muestra el mismo comportamiento descrito en la Figura 43, donde se observa la lectura obtenida en el analizador de espectro al aumentar la amplitud de la señal. Este incremento genera sobremodulación y una deformación en la señal de diente de sierra (triangular).

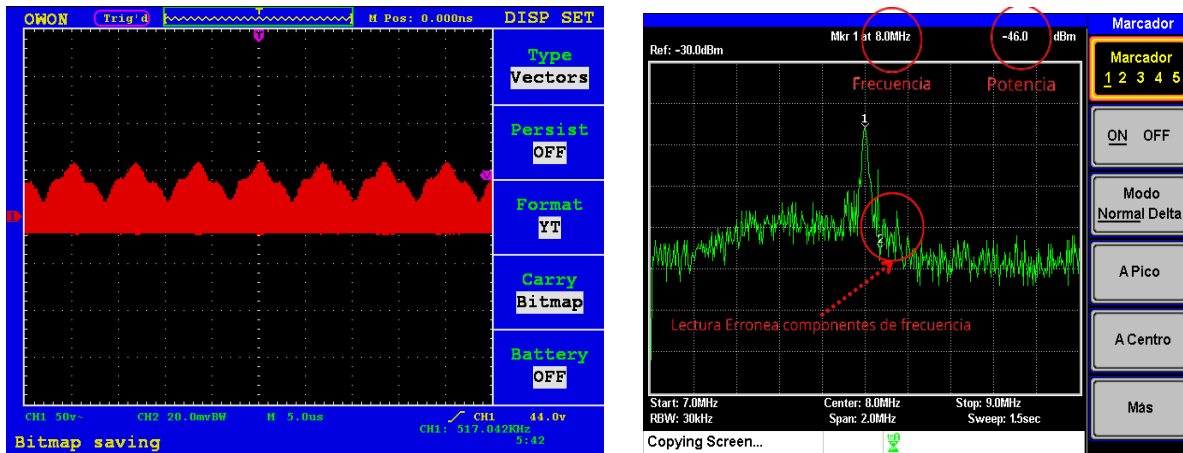
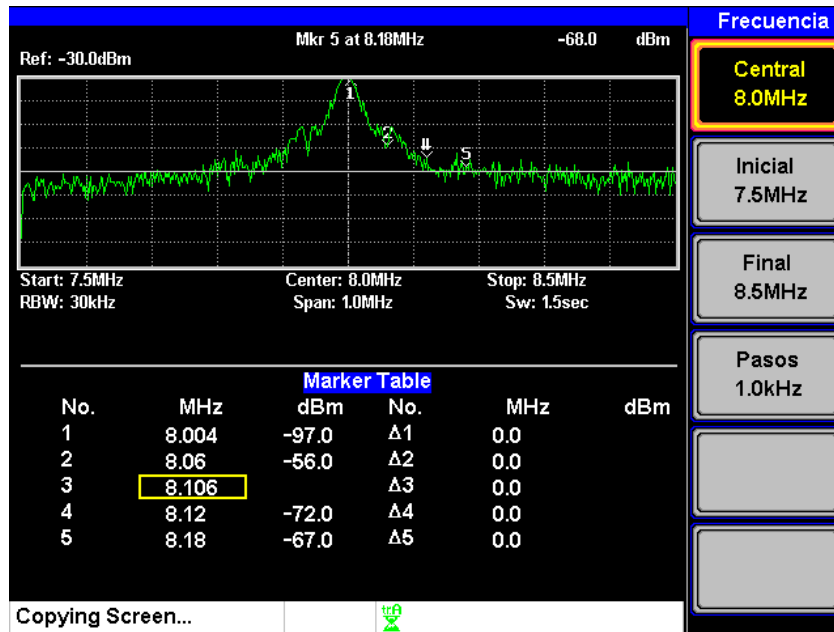


Figura 45 señal diente de sierra (Triangular), frecuencia 60KHz amplitud incrementada 500mV, lectura analizador de espectro.

4.4.3.3 Variación de frecuencia de la señal moduladora diente de sierra (Triangular)

Para la señal triangular, se seleccionó una frecuencia de 60 kHz con una amplitud de 200 mV, garantizando que el prototipo operara de manera estable y sin distorsión, también conocida como sobre modulación. Se buscó asegurar una simetría óptima en la señal, tanto en la parte superior como en la inferior. En comparación con la señal de pulso cuadrado, la señal triangular demostró un mejor rendimiento, ya que sus componentes de frecuencia son más bajos, lo que favorece una mayor estabilidad y reduce la distorsión en el sistema. Además, se ajustó la frecuencia para evaluar el comportamiento de la señal a diferentes valores, identificando el rango en el que funciona correctamente y determinando el punto en el que comienza a mostrar signos de sobre modulación.

En la Figura 46, se muestra la señal AM que produce una moduladora de diente de sierra (triangular) a una frecuencia de 60 kHz y una amplitud de 200 mV. La señal presenta simetría tanto en su parte superior como inferior, y en estas condiciones, se obtienen datos de los componentes de frecuencia sin presentar sobre modulación.



. Figura 46 señal diente de sierra (Triangular), frecuencia 60KHz componentes de frecuencia obtenidos (prototipo-analizador de espectro).

En la Figura 47, se observa la presencia de sobre modulación cuando la señal diente de sierra (triangular) se configura a una frecuencia superior a 80 kHz. En este caso, con una frecuencia establecida de 250 kHz, se evidencia la pérdida de componentes de frecuencia a medida que la señal decae, lo que resulta en mediciones erróneas en sus picos.

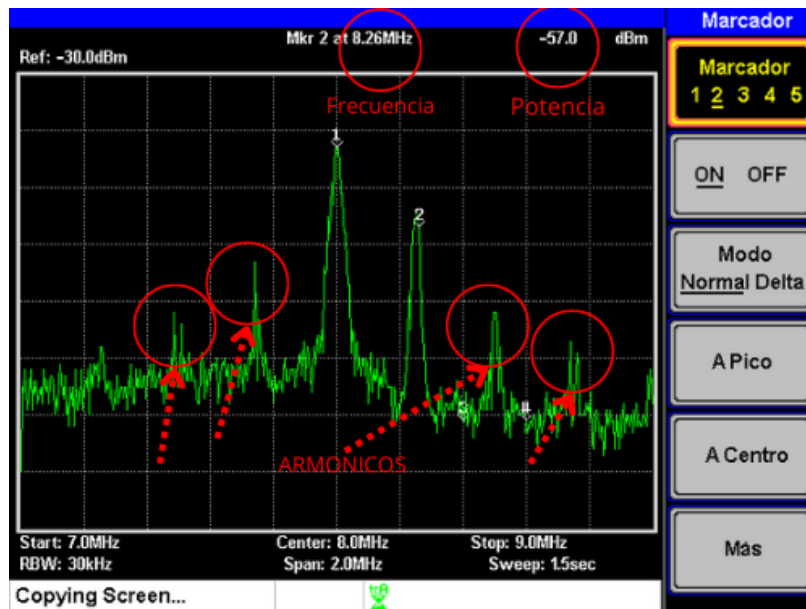


Figura 47 señal diente de sierra, frecuencia 250KHz, presencia de sobre modulación

Se extrajo de la figura 46 las potencias de los componentes de frecuencia en dBm para ser comparados con los datos obtenidos de la simulación en Matlab, estos datos se los adjuntó en la Tabla 11.

Ya que en la simulación los valores obtenidos son en decibelios (dB) se procede a, pasar los datos del analizador a dB, de la siguiente manera:

Amplitud relativa componente késimo

$$= \text{Amplitud portadora} - \text{Amplitud componente késimo} \quad (21)$$

En la Tabla 12, se presentan los valores obtenidos del prototipo, incluyendo las frecuencias y las amplitudes relativas a la portadora de cada componente en decibelios (dB) tras aplicar el cálculo previamente mencionado.

Tabla 12.

Datos analizadores de espectro (prototipo), Señal AM modulada con diente de sierra (Triangular)

| | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|------|-------|-------|
| Frecuencias, señal AM modulada con diente de sierra (Triangular) Matlab (MHz) | 8.60 | 8.180 | 8.300 |
| Frecuencias, señal AM modulada con diente de sierra (Triangular) Prototipo (MHz) | 8.60 | 8.180 | 8.300 |
| Amplitud, componentes de frecuencia diente de sierra (Triangular) Prototipo (dB) | 24 | 31 | 35 |

De igual manera que en los apartados anteriores, en la Tabla 10 se observa la similitud entre las frecuencias medidas y las simuladas, mostrando una clara correspondencia. Además, la tendencia en las amplitudes sigue un comportamiento similar en ambos casos, lo que refuerza la coherencia entre los resultados experimentales y las simulaciones realizadas.

La tabla 13 presenta los datos recopilados en diferentes fechas sobre los componentes de frecuencia de la señal modulada AM utilizando una señal de diente de sierra. Estos valores permiten observar cómo varían las amplitudes de las bandas laterales, proporcionando información clave para analizar la estabilidad y el comportamiento del prototipo. Además, los datos sirven para evaluar qué tan consistente es su desempeño frente a cambios, lo que es esencial para validar su confiabilidad.

Tabla 13.

Datos experimentales señal modulada AM. Diente de sierra (Triangular), componentes de frecuencia del prototipo con sus respectivas fechas

| Datos experimentales señal modulada AM Diente de sierra (Triangular) | | | Amplitud (dBm) | | |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------|-----|-----|
| | | | Experimento 1 | | |
| | | | 23/05/2024 | | |
| Frecuencia Moduladora (KHz) | Banda Lateral Inferior-BLI (MHz) | Banda Lateral Superior-BLS (MHz) | Portadora | BLI | BLS |
| 200 | 8.2 | 7.8 | -40 | -54 | -51 |
| | 8.4 | 7.6 | -43 | -87 | -84 |
| | 8.6 | 7.4 | -40 | -85 | -85 |
| | | | 24/05/2024 | | |
| 250 | 8.25 | 7.75 | -42 | -57 | -65 |
| | 8.5 | 7.5 | -40 | -73 | -72 |
| | | | 27/05/2024 | | |
| 300 | 8.3 | 7.7 | -44 | -52 | -58 |
| | | | 15/08/2024 | | |
| 60 | 8.06 | 7.94 | -42 | -66 | -68 |
| | 8.18 | 7.82 | -40 | -73 | -71 |
| | 8.3 | 7.70 | -42 | -77 | -75 |

4.5 Calculo Error MSE

4.5.1 Señal sinusoidal

Se extrajo los datos obtenidos tanto del prototipo como la simulación en Matlab y se realizó el cálculo de error MSE. Se organizaron estos datos en las Tablas 14, 15 y 16 como se muestra a continuación

Tabla 14.

Datos Error MSE señal sinusoidal

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Frecuencia, señal modulada AM senoidal (MHz) | 8.01 | 8.02 | 8.03 | 8.04 | 8.05 | 8.06 | 8.07 | 8.08 | 8.09 | 8.10 |
| Amplitud, componentes de frecuencia Prototipo (dB) | 5 | 13 | 16 | 22 | 26 | 23 | 23 | 25 | 14 | 3 |
| Amplitud, componentes de frecuencia (Matlab) | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Error Cuadrado | 1 | 49 | 100 | 256 | 400 | 289 | 289 | 361 | 64 | 9 |

Tabla 15.

Datos Error MSE señal sinusoidal 110KHz-200KHz

| | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Frecuencia, señal modulada AM senoidal (MHz) | 8.11 | 8.12 | 8.13 | 8.14 | 8.15 | 8.16 | 8.17 | 8.18 | 8.19 | 8.20 |
| Amplitudes componentes de | 12 | 15 | 13 | 14 | 13 | 11 | 10 | 12 | 12 | 10 |

| | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| frecuencia(dB) | | | | | | | | | | |
| Prototipo | | | | | | | | | | |
| Amplitudes | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| componentes de frecuencia (Matlab) | | | | | | | | | | |
| Error cuadrado | 36 | 81 | 49 | 64 | 49 | 25 | 16 | 36 | 36 | 16 |

Tabla 16.

Datos Error MSE señal sinusoidal 210KHz-300KHz

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------------|------|
| Frecuencia, señal modulada AM senoidal (MHz) | 8.21 | 8.22 | 8.23 | 8.24 | 8.25 | 8.26 | 8.27 | 8.28 | 8.29 | 8.30 |
| Amplitudes | 9 | 9 | 10 | 8 | 9 | 10 | 9 | 7 | 8 | 8 |
| componentes de frecuencia(dB) Prototipo | | | | | | | | | | |
| Amplitudes | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| componentes de frecuencia (Matlab) | | | | | | | | | | |
| Error Cuadrado | 9 | 9 | 16 | 4 | 9 | 16 | 9 | 1 | 4 | 4 |
| Promedio | | | | | | | | Total | 76,9 | |

A partir de las tablas 14, 15 y 16. Se observa que, a medida que los componentes de frecuencia se alejan de la frecuencia de la portadora, la amplitud de estos componentes disminuye progresivamente. Este decaimiento genera un aumento del error en ciertas frecuencias y una disminución en otras. Este comportamiento también puede apreciarse en la Figura 48 a continuación.

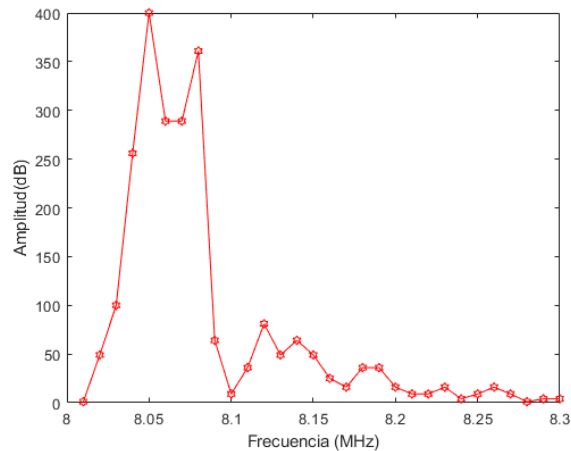


Figura 48 Error cuadrático medio de la amplitud de los componentes de frecuencia de una señal sinusoidal.

4.5.2 Tren de pulsos cuadrados

Se extrajo los datos tanto de la simulación como del prototipo y se procede a realizar el cálculo de error MSE.

En la Tabla 17 se encuentran las amplitudes de los componentes de frecuencia obtenidas de la simulación de Matlab y las amplitudes de los componentes de frecuencias presentes en el prototipo correspondientes a una señal AM con un tren de pulsos como moduladora. Estos datos son presentados en la fila titulada Matlab. En la fila titulada Prototipo se encuentran los datos extraídos del analizador de espectro en (dB) de cada componente. Se procede a calcular el error cuadrático medio presente en la fila titulada Error Cuadrado.

Tabla 17.

Datos Error MSE Amplitud, componentes de frecuencia Tren de pulsos cuadrados

| Componente (k) | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 |
|-------------------------------------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Frecuencias, señal AM modulada con tren de pulsos cuadrados (MHz) | 8.030 | 8.090 | 8.150 | 8.210 | 8.270 | 8.330 |
| Amplitud, componentes de frecuencia Matlab | 7.01686 | 16.56 | 20.99 | 23.92 | 26.10 | 27.84 |

| (dB) | | | | | | |
|----------------------------------------------------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|
| Amplitud, componentes de frecuencia Prototipo (dB) | 13 | 13 | 34 | 37 | 36 | 38 |
| Error Cuadrado | 35.88 | 12.67 | 169.26 | 171.08 | 98.01 | 103.22 |
| Promedio | | | | | Total | 98.35 |

De acuerdo con la Tabla 17, se observa que los primeros componentes de frecuencia son los que presentan el menor error, mientras que los componentes 5 y 7 muestran una discrepancia más notable, con un error más significativo. Esta diferencia se puede explicar al analizar la Figura 25, donde se destaca que, a medida que los componentes de frecuencia se alejan de la frecuencia de la portadora, la amplitud de estos componentes disminuye progresivamente.

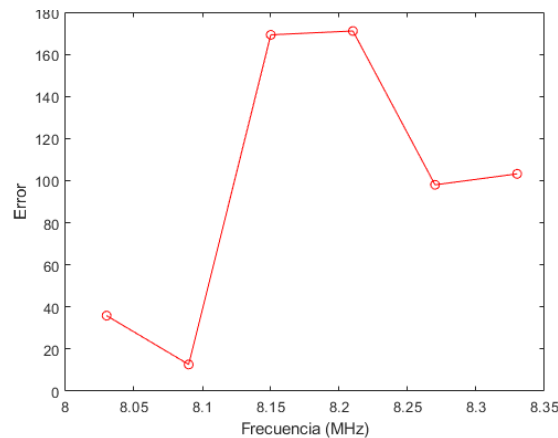


Figura 49 Error cuadrático medio de la amplitud de los componentes de frecuencia de un tren de pulsos cuadrados

De manera similar, se calculó el Error Cuadrático Medio (MSE) para las frecuencias obtenidas tanto de la simulación como del prototipo de la señal tren de pulsos cuadrados, con el fin de analizar y comparar el comportamiento del prototipo en relación con los resultados simulados.

En la Tabla 18 se presentan los datos de frecuencias obtenidos tanto de la

simulación como del prototipo de la señal tren de pulsos cuadrados. Estos datos se comparan a continuación para evaluar las diferencias y similitudes entre ambos resultados.

Tabla 18.

Datos Error MSE frecuencias Tren de pulsos cuadrados

| Componente | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (k) | | | | | | |
| Frecuencia | 8.030 | 8.090 | 8.150 | 8.210 | 8.270 | 8.330 |
| (MHz) | | | | | | |
| Matlab | | | | | | |
| Frecuencia | 8.030 | 8.090 | 8.150 | 8.210 | 8.270 | 8.330 |
| (MHz) | | | | | | |
| prototipo | | | | | | |
| Error | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cuadrado | | | | | | |

De la Tabla 18, se puede concluir que las frecuencias obtenidas tanto en la simulación como en el prototipo coinciden. Esto indica que el prototipo cumple con la característica de estabilidad en las frecuencias, sin mostrar desplazamientos cuando se visualizan en el analizador de espectro.

4.5.2.1 Señal diente de sierra (Triangular)

Se extrajeron los datos tanto de la simulación como del prototipo, y se procedió a calcular el error cuadrático medio (MSE), los cuales se presentan en las Tablas 19 y 20.

En la Tabla 19, Se muestran las amplitudes de los componentes de frecuencia obtenidas tanto de la simulación en Matlab como experimentalmente, correspondientes a una señal AM modulada con una señal de diente de sierra (triangular), expresadas en MHz. También se incluyen los datos extraídos del script de Matlab para los componentes de frecuencia, utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Estos datos aparecen en la fila titulada "Matlab", mientras que en la fila titulada "Prototipo" se encuentran los valores obtenidos del analizador de espectro, expresados en dB para cada componente. Finalmente, en la fila titulada "Error Cuadrado" se presenta el cálculo del error cuadrático medio (MSE) entre ambos conjuntos de datos. Cabe destacar que el error promedio de la amplitud de los componentes de frecuencia es de 50.96.

Tabla 19.

Datos Error MSE Amplitud, componentes de frecuencia Señal AM modulada Triangular

| Componente (K) | 1 | 3 | 5 |
|---------------------------------------------------|--------|-------|-------|
| Frecuencia (MHz) | 8.60 | 8.180 | 8.300 |
| Amplitud, componentes de frecuencia Matlab (dB) | 13.66 | 32.72 | 41.56 |
| Amplitud, componentes de frecuencia Prototipo(dB) | 24 | 31 | 35 |
| Error Cuadrado | 106.91 | 2.95 | 43.03 |

De la tabla 19, se puede observar que, al contrario de lo esperado, el primer componente de frecuencia es el que presenta el mayor error, mientras que los componentes 3 y 5 son los que muestran menores discrepancias, con un error menos significativo. Esto puede explicarse al analizar la Figura 25, donde dice que a medida que los componentes de frecuencia se alejan de la frecuencia de la portadora, hay un decaimiento progresivo en la amplitud de dichos componentes. y se destacan dos regiones en las que la amplitud se mantiene más o menos constante: la primera, entre 50 KHz y 90 KHz, y la segunda, entre 110 KHz y 300 KHz. Estas zonas de

estabilidad en la amplitud indican áreas de mayor consistencia en la transmisión

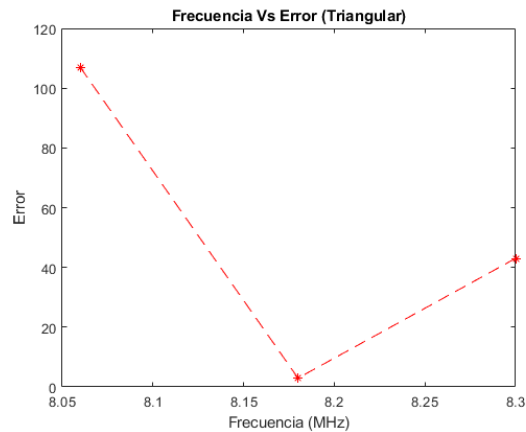


Figura 50 Error cuadrático medio de la amplitud de los componentes de frecuencia de una señal triangular

De manera similar que, en el apartado anterior, se calculó el Error Cuadrático Medio (MSE) para las frecuencias obtenidas tanto de la simulación como del prototipo de la señal diente de sierra (triangular), con el fin de verificar si sigue el mismo comportamiento.

En la Tabla 20 se presentan los datos de frecuencias obtenidos tanto de la simulación como del prototipo de la señal diente de sierra (Triangular). Estos datos se comparan a continuación para evaluar las diferencias y similitudes entre ambos resultados.

Tabla 20.

Datos Error MSE frecuencias Señal Triangular

| Componente | 1 | 3 | 5 |
|----------------|------|-------|-------|
| (K) | | | |
| Frecuencia | 8.60 | 8.180 | 8.300 |
| (MHz) | | | |
| Matlab | | | |
| Frecuencia | 8.60 | 8.180 | 8.300 |
| (MHz) | | | |
| Prototipo | | | |
| Error cuadrado | 0 | 0 | 0 |

De igual manera que para el tren de pulsos cuadrados de la Tabla 20, se puede concluir que las frecuencias obtenidas tanto en la simulación como en el prototipo coinciden. Esto indica que el prototipo cumple con la característica de estabilidad en frecuencia, sin mostrar desplazamientos cuando se visualizan en el analizador de espectro. Esto quiere decir que sigue el mismo comportamiento que el análisis de Fourier.

Análisis de resultados

Hipótesis

Durante el desarrollo del prototipo de sonda inalámbrica, se plantearon tres hipótesis para evaluar su rendimiento frente a los valores teóricos, incluyendo la hipótesis nula, que proponía la ausencia de diferencias significativas. Para comprobar esto, se calculó el Error Cuadrático Medio (MSE), como se detalla en las Tablas 16, 17 y 19. Este análisis se realizó tanto para la amplitud de los componentes de frecuencia de las señales como para la frecuencia en la que se encuentra cada componente. Las señales evaluadas fueron sinusoidales, tren de pulsos cuadrados y triangular. Los resultados mostraron un error superior a 0.5 dB en la amplitud de los componentes y menor a 500 Hz en sus frecuencias, lo cual indica una desviación significativa y respalda la hipótesis nula. Esta conclusión se aplica específicamente a las amplitudes de los componentes de frecuencia, como se observa en las Tablas 21, 22 y 23.

Tabla 19.*Datos Error MSE. frecuencias y amplitudes Señal AM Modulada sinusoidal*

| SEÑAL SINUSOIDAL | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|---------------------|------------|---------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|---------------------|------------|---------------------|-----------------------|------------------|--|
| F. moduladora | Banda lateral derecha | | | | | | Banda lateral Izquierda | | | | | | |
| (KHz) | F.simulada (MHz) | F.experimental(MHz) | ΔF | Amp. Simulada (dBm) | Amp.Experimental(dBm) | $\Delta amp(dB)$ | F.simulada (MHz) | F.experimental(MHz) | ΔF | Amp. Simulada (dBm) | Amp.Experimental(dBm) | $\Delta amp(dB)$ | |
| 10 | 8.01 | 8.01 | 0 | 6 | 5 | 1 | 7.99 | 7.99 | 0 | 6 | 4 | 4 | |
| 20 | 8.02 | 8.02 | 0 | 6 | 13 | 49 | 7.98 | 7.98 | 0 | 6 | 10 | 16 | |
| 30 | 8.03 | 8.03 | 0 | 6 | 16 | 100 | 7.97 | 7.97 | 0 | 6 | 15 | 81 | |
| 40 | 8.04 | 8.04 | 0 | 6 | 22 | 256 | 7.96 | 7.96 | 0 | 6 | 21 | 225 | |
| 50 | 8.05 | 8.05 | 0 | 6 | 26 | 400 | 7.95 | 7.95 | 0 | 6 | 24 | 324 | |
| 60 | 8.06 | 8.06 | 0 | 6 | 23 | 289 | 7.94 | 7.94 | 0 | 6 | 23 | 289 | |
| 70 | 8.07 | 8.07 | 0 | 6 | 23 | 289 | 7.93 | 7.93 | 0 | 6 | 23 | 289 | |
| 80 | 8.08 | 8.08 | 0 | 6 | 25 | 361 | 7.92 | 7.92 | 0 | 6 | 24 | 324 | |
| 90 | 8.09 | 8.09 | 0 | 6 | 14 | 64 | 7.91 | 7.91 | 0 | 6 | 13 | 49 | |
| 100 | 8.10 | 8.10 | 0 | 6 | 3 | 9 | 7.90 | 7.90 | 0 | 6 | 3 | 9 | |
| 110 | 8.11 | 8.11 | 0 | 6 | 12 | 36 | 7.89 | 7.89 | 0 | 6 | 11 | 25 | |
| 120 | 8.12 | 8.12 | 0 | 6 | 15 | 81 | 7.88 | 7.88 | 0 | 6 | 12 | 36 | |
| 130 | 8.13 | 8.13 | 0 | 6 | 13 | 49 | 7.87 | 7.87 | 0 | 6 | 13 | 49 | |
| 140 | 8.14 | 8.14 | 0 | 6 | 14 | 64 | 7.86 | 7.86 | 0 | 6 | 13 | 49 | |
| 150 | 8.15 | 8.15 | 0 | 6 | 13 | 49 | 7.85 | 7.85 | 0 | 6 | 12 | 36 | |
| 160 | 8.16 | 8.16 | 0 | 6 | 11 | 25 | 7.84 | 7.84 | 0 | 6 | 10 | 16 | |
| 170 | 8.17 | 8.17 | 0 | 6 | 10 | 16 | 7.83 | 7.83 | 0 | 6 | 8 | 4 | |
| 180 | 8.18 | 8.18 | 0 | 6 | 12 | 36 | 7.82 | 7.82 | 0 | 6 | 12 | 36 | |
| 190 | 8.19 | 8.19 | 0 | 6 | 12 | 36 | 7.81 | 7.81 | 0 | 6 | 12 | 36 | |
| 200 | 8.20 | 8.20 | 0 | 6 | 10 | 16 | 7.80 | 7.80 | 0 | 6 | 14 | 64 | |
| 210 | 8.21 | 8.21 | 0 | 6 | 9 | 9 | 7.79 | 7.79 | 0 | 6 | 7 | 1 | |
| 220 | 8.22 | 8.22 | 0 | 6 | 9 | 9 | 7.78 | 7.78 | 0 | 6 | 10 | 16 | |
| 230 | 8.23 | 8.23 | 0 | 6 | 10 | 16 | 7.77 | 7.77 | 0 | 6 | 12 | 36 | |
| 240 | 8.24 | 8.24 | 0 | 6 | 8 | 4 | 7.76 | 7.76 | 0 | 6 | 9 | 9 | |
| 250 | 8.25 | 8.25 | 0 | 6 | 9 | 9 | 7.75 | 7.75 | 0 | 6 | 9 | 9 | |
| 260 | 8.26 | 8.26 | 0 | 6 | 10 | 16 | 7.74 | 7.74 | 0 | 6 | 8 | 4 | |
| 270 | 8.27 | 8.27 | 0 | 6 | 9 | 9 | 7.73 | 7.73 | 0 | 6 | 6 | 0 | |
| 280 | 8.28 | 8.28 | 0 | 6 | 7 | 1 | 7.72 | 7.72 | 0 | 6 | 5 | 1 | |
| 290 | 8.29 | 8.29 | 0 | 6 | 8 | 4 | 7.71 | 7.71 | 0 | 6 | 5 | 1 | |
| 300 | 8.30 | 8.30 | 0 | 6 | 8 | 4 | 7.70 | 7.70 | 0 | 6 | 5 | 1 | |
| MSE | | | 0 | | | 76,9 | | | 0 | | | 67,96666667 | |

Tabla 20.*Datos Error MSE. frecuencias y amplitudes Señal AM Modulada Tren de pulsos cuadrados*

| SEÑAL CUADRADA | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------|---------------------|------------|---------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|---------------------|------------|---------------------|-----------------------|------------------|--|
| F. moduladora | Banda lateral derecha | | | | | | Banda lateral Izquierda | | | | | | |
| (KHz) | F.simulada (MHz) | F.experimental(MHz) | ΔF | Amp. Simulada (dBm) | Amp.Experimental(dBm) | $\Delta amp(dB)$ | F.simulada (MHz) | F.experimental(MHz) | ΔF | Amp. Simulada (dBm) | Amp.Experimental(dBm) | $\Delta amp(dB)$ | |
| 30 | 8.030 | 8.030 | 0 | 7 | 13 | 35,88 | 7.97 | 7.97 | 0 | 8,1 | 12 | 15,21 | |
| 90 | 8.090 | 8.090 | 0 | 16,56 | 13 | 12,6736 | 7.91 | 7.91 | 0 | 16,25 | 11 | 27,5625 | |
| 150 | 8.150 | 8.150 | 0 | 20,99 | 34 | 169,2601 | 7.85 | 7.85 | 0 | 19,98 | 33 | 169,5204 | |
| 210 | 8.210 | 8.210 | 0 | 23,92 | 37 | 171,0864 | 7.79 | 7.79 | 0 | 22,98 | 35 | 144,4804 | |
| 270 | 8.270 | 8.270 | 0 | 26,1 | 36 | 98,01 | 7.73 | 7.73 | 0 | 26,1 | 36 | 98,01 | |
| 330 | 8.330 | 8.330 | 0 | 27,84 | 38 | 103,2256 | 7.67 | 7.67 | 0 | 27,84 | 37 | 83,9056 | |
| MSE | | | 0 | | | 98,355967 | | | 0 | | | 89,7814833 | |

Tabla 21.*Datos Error MSE. frecuencias y amplitudes Señal AM Modulada diente de sierra (Triangular)*

| SEÑAL TRIANGULAR | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|-----------------------|---------------------|------------|---------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|---------------------|------------|---------------------|-----------------------|------------------|--|
| F. moduladora | Banda lateral derecha | | | | | | Banda lateral Izquierda | | | | | | |
| (KHz) | F.simulada (MHz) | F.experimental(MHz) | ΔF | Amp. Simulada (dBm) | Amp.Experimental(dBm) | $\Delta amp(dB)$ | F.simulada (MHz) | F.experimental(MHz) | ΔF | Amp. Simulada (dBm) | Amp.Experimental(dBm) | $\Delta amp(dB)$ | |
| 60 | 8.060 | 8.060 | 0 | 14 | 24 | 106,92 | 7.94 | 7.94 | 0 | 14 | 23 | 87,2356 | |
| 180 | 8.180 | 8.180 | 0 | 32,72 | 31 | 2,9584 | 7.82 | 7.82 | 0 | 32,72 | 30 | 7,3984 | |
| 300 | 8.300 | 8.300 | 0 | 41,56 | 35 | 43,0336 | 7.70 | 7.70 | 0 | 41,56 | 34 | 57,1536 | |
| MSE | | | 0 | | | 50,9692 | | | 0 | | | 50,5958667 | |

Ancho de banda

El análisis del prototipo reveló que el ancho de banda operativo varía según el tipo de señal utilizada. Para la señal sinusoidal, el prototipo mantuvo un rendimiento estable en un rango de frecuencias que va desde 10 kHz hasta 250 kHz. En el caso de la señal de pulsos cuadrados, el ancho de banda se limitó a un rango más estrecho, operando eficientemente entre 5 kHz y 60 kHz. Por otro lado, la señal triangular mostró un comportamiento adecuado en un ancho de banda que abarca desde 3 kHz hasta 80 kHz.

Este comportamiento está fuertemente influenciado por la cantidad de componentes de frecuencia que posee cada tipo de señal. Cuando los componentes de las señales observadas superan el ancho de banda operativo del prototipo, este comienza a introducir distorsión. Todo esto se identificó en la caracterización de la sonda en el apartado de variación de frecuencia y variación de amplitud. Para la señal de tren de pulso cuadrado se observa este comportamiento en las figuras (37,38,39,40 y 41), mientras que para la señal triangular se observa este comportamiento en las figuras (43,44,45,46 y 47) En el caso de la señal sinusoidal, se observa este comportamiento en las Tablas 4,5 y 6 indicando los rangos de frecuencia en donde el comportamiento del prototipo es aceptable. Debido a que cada señal posee componentes de frecuencia diferentes, no se pueden comparar entre sí. Las siguientes Figuras 51,52 y 53 permite aclarar esta afirmación, considerando el comportamiento de cada señal modulada usando AM.

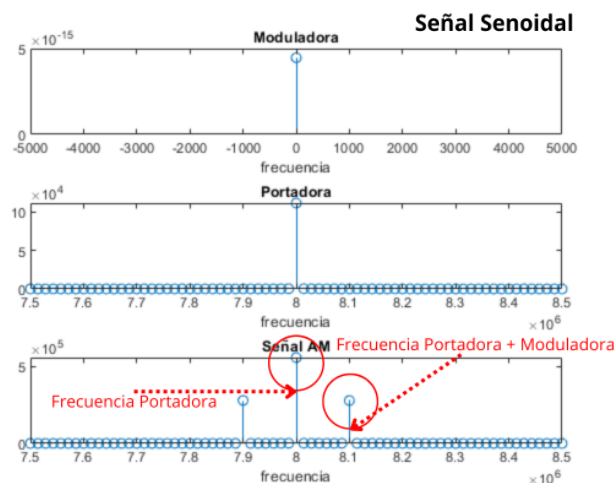


Figura 51 Componentes de frecuencia de una señal AM con moduladora sinusoidal.

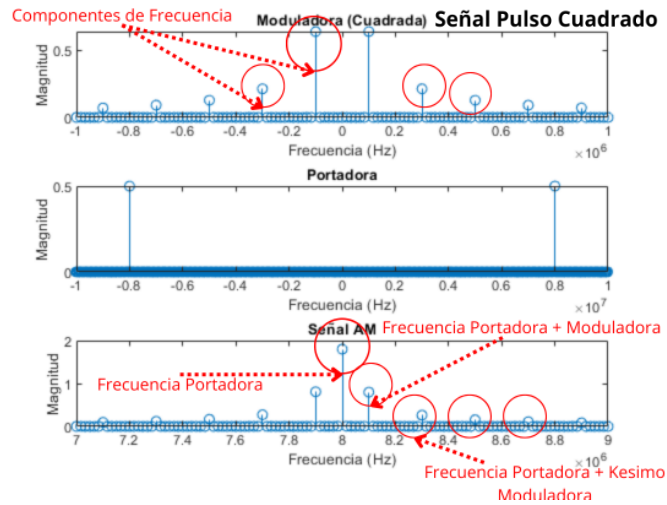


Figura 52. Componentes de frecuencia de una señal AM con un tren de pulsos cuadrados como moduladora.

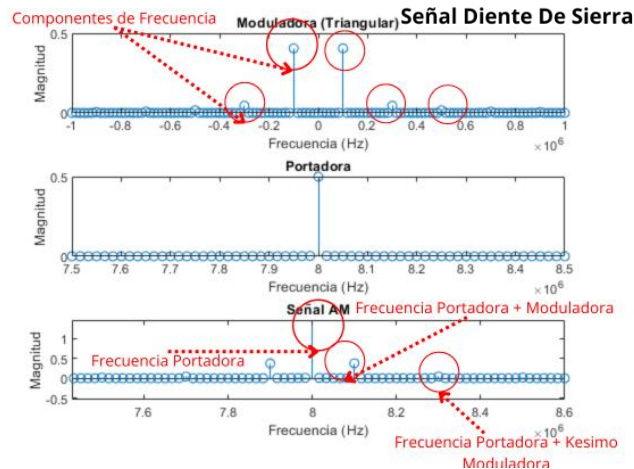


Figura 53 Componentes de frecuencia de una señal AM con una señal triangular como moduladora.

Todos estos hallazgos fueron el resultado de las pruebas realizadas durante la evaluación del prototipo. A lo largo de estas pruebas, se observó detenidamente el comportamiento del sistema durante la toma de datos, lo que permitió identificar los rangos de ancho de banda adecuados para cada tipo de señal y detectar las condiciones bajo las cuales el prototipo comenzaba a experimentar distorsión o sobre modulación. Este análisis fue clave para comprender las limitaciones del prototipo y

establecer las mejores prácticas para su uso efectivo, asegurando que funcione de manera adecuada dentro de los parámetros establecidos.

Amplitud

Se determinaron los niveles de amplitud de entrada óptimos para el funcionamiento del prototipo, así como el análisis del ancho de banda. A partir del estudio de las prácticas de laboratorio en Ingeniería Electrónica en la Universidad CESMAG, se identificaron las frecuencias utilizadas por los estudiantes, lo que permitió establecer los requisitos necesarios para que la sonda operara correctamente en esos rangos de frecuencia. El análisis detallado de estas frecuencias se presenta en el apartado 4.1.1 (análisis de guías de laboratorio), y la tabla 1 muestra las prácticas implementadas por los estudiantes.

Los resultados indicaron que, con un voltaje de entrada inferior a 100 mV, el sistema no consigue realizar la modulación AM de forma efectiva, ya que no se detectan componentes de frecuencia en el analizador. Por otro lado, al superar los 500 mV de voltaje de entrada, el prototipo experimenta sobrecalentamiento, lo que compromete su rendimiento.

Para evitar estos problemas, se estableció que un voltaje de entrada de 200 mV es ideal para la señal moduladora, ya que en este nivel el sistema mantiene la estabilidad y realiza una modulación AM adecuada, sin inconvenientes en su desempeño. Los parámetros completos se encuentran en las secciones 4.4.1.3, 4.4.2.3 y 4.4.3.3, donde se aborda la variación de amplitud de las señales estudiadas.

Conclusiones

El prototipo de sonda inalámbrica ha demostrado satisfacer las necesidades de las prácticas de laboratorio del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad CESMAG. Los resultados obtenidos en las pruebas confirmaron que el prototipo opera dentro de los rangos de frecuencia previstos, permitiendo un análisis adecuado del comportamiento de una señal de prueba aplicada a la sonda.

Se confirmó que el prototipo de sonda inalámbrica contribuye significativamente al fortalecimiento de conocimientos en el área de telecomunicaciones, permitiendo a los estudiantes analizar de manera práctica cómo se comporta una señal en el espectro de frecuencias. Gracias al prototipo, es posible observar en tiempo real cómo las variaciones en frecuencia y amplitud afectan el rendimiento y la calidad de la transmisión de señales. Esto proporciona una comprensión más profunda de los principios de modulación y demodulación, así como de la importancia de ajustar adecuadamente estos parámetros para asegurar una transmisión eficiente y sin distorsiones. En este sentido, la sonda resulta una herramienta esencial para complementar la teoría, facilitando la visualización de fenómenos que son críticos en el diseño y análisis de sistemas de comunicación.

Para la amplitud de los componentes de frecuencia en la señal, el error obtenido supera 0.5dB (Tablas 14, 15 y 17), mientras que para la ubicación de las frecuencias respecto a los valores teóricos/simulados, el error obtenido es cercano a cero, esto respalda la hipótesis nula la cual dice que el error en amplitud es superior a 0.5 dB e inferior a 500 Hz a nivel de sus frecuencias. Esto indica que el prototipo aún presenta limitaciones en la precisión de la amplitud de los componentes de frecuencia,

Adicionalmente, el prototipo fue desarrollado adaptando un diseño preexistente y utilizando componentes de fácil acceso en la ciudad. Esto permite un mantenimiento sencillo y asegura que las piezas necesarias para futuras reparaciones o ajustes puedan ser obtenidas localmente, facilitando la operación a largo plazo del dispositivo.

Recomendaciones

Estudio del Sobrecalentamiento de Componentes

Aunque el prototipo opera de manera adecuada en las condiciones definidas por las guías del laboratorio, es recomendable realizar un estudio exhaustivo sobre el sobrecalentamiento de sus componentes. Este análisis debe incluir la identificación de las temperaturas alcanzadas por cada uno de los elementos clave durante la operación continua, con el fin de evaluar su resistencia térmica y sus límites de funcionamiento seguro. Además, el monitoreo térmico ayudará a determinar si el prototipo requiere mejoras en su sistema de enfriamiento o ajustes en el diseño de los circuitos para prevenir posibles fallas o reducir el desgaste. Implementar sensores de temperatura en puntos críticos y registrar su comportamiento en diferentes condiciones de carga permitirá obtener datos relevantes para mejorar la durabilidad y estabilidad del prototipo en entornos de uso prolongado, asegurando así un funcionamiento seguro y eficiente.

Diseño de un Circuito Independiente para la Generación de Señales

Portadoras

Dado que el acceso a componentes específicos en el mercado ha sido limitado, se recomienda desarrollar un circuito independiente destinado a la generación de señales portadoras, adaptado a las necesidades del prototipo. Este circuito adicional permitiría tener un control preciso sobre las características de la señal portadora, como su frecuencia y amplitud, facilitando una mayor estabilidad y ajustabilidad del sistema en distintas condiciones de prueba. La incorporación de un generador de señal portadora autónomo permitirá al prototipo ser más flexible y autosuficiente, eliminando la dependencia de fuentes externas y componentes que pueden ser difíciles de obtener. Este ajuste no sólo optimizaría el rendimiento, sino que también contribuiría a una mayor versatilidad del prototipo, permitiendo su uso en un rango más amplio de prácticas y experimentos en el laboratorio.

Bibliografía

- Alfonso, O., Mata, H., Ezequiel, J., Solís, M., & Frias, R. A. (2019). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SONDA DE PRUEBA DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN ACTIVE TEST PROBE Resumen. 41(134), 238–252.*
- Asmel Marrero, V. (2013). *Universidad Central “ Marta Abreu ” de Las Villas Universidad Central “ Marta Abreu ” de Las Villas. 30–34.*
- Carniado Cartas, G. (2014). Trabajo Fin de Grado. *Zaguan.Unizar.Es, 0–43.*
- Erazo, H. J. (2009). Estudio y Análisis de la Tecnología de Recursos de Frecuencia única, y su Aplicación en la Radiodifusión en las Bandas de AM Y FM para la Optimización del Espectro Electromagnético en la Ciudad de QUITO. *Escuela Politécnica Nacional, 251.*
- Ing. Oscar M. Santa Cruz. (2010). *Cap. 11. Adaptación de Impedancias. 18.*
<http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/ElectronicaAplicadaIII/Aplicada/Cap11Adaptaciondeimpedancias2008.pdf>
- Quijano Vodniza, A. J. (2009). *Guía de Investigación Cuantitativa. 2, 96–100.*
- Rivera, I. S., Beltrán, S. V., & Piñón, F. M. (2018). *MONITOREO REMOTO MEDIANTE RADIO DEFINIDA POR SOFTWARE SPECTRUM ANALYZER WITH REMOTE MONITORING FUNCTION Resumen. 40(130), 1125–1140.*
- Sander, K. (n.d.). *Differential measurements with Spectrum Analyzers and Probes Application Note.*
- Semeria, M. (2015). *www.econstor.eu.*
- Technologies, A. (2011). *Cómo elegir las mejores sondas de osciloscopio pasivas y activas para sus tareas. 52–54.*
- Usunariz, I. (2011). *Una aproximación al mundo de las Sondas. (p. 13).*
- Final Test. (12 de 04 de 2024). Obtenido de venta de instrumentos de prueba y medición : <https://www.fialtest.com.mx/GW-Instek-GSP-730-p/gsp-730.htm#:~:text=Es%20un%20Analizador%20de%20espectro,los%20experimentos%20de%20comunicación%20RF.>

HERRERA, J. F. (18 de 11 de 2014). Teoria de señales. Obtenido de <https://w3.ual.es/~vruiz/Docencia/Apuntes/Signals/Theory/index.html>

HERRES, D. (07 de 11 de 2019). Text y Measurement.Tips. Obtenido de Text y Measurement.Tips: <https://www.testandmeasurementtips.com/bandwidth-basics-and-fundamentals/>

Hyndman, R. J. (2018). Forecasting: principles and practice. En R. J. Hyndman. Obtenido de <https://otexts.com/fpp3/accuracy.html>

MUKHERJI, J. (10 de 2014). WWW.EFYMAG.COM. Obtenido de ELECTRONICS FOR YOU: <https://www.reddit.com/media?url=https%3A%2F%2Fi.redd.it%2Fcrystal-controlled-am-transmitter-with-100-modulation-v0-jqalvyrwig491.jpg%3Fs%3De66a8da5fc520c7639061fc7c5705f4be2567bef&rdt=52695>

Newark. (11 de 04 de 2024). Obtenido de An Avnet Company: <https://mexico.newark.com/gw-instek/gsp-730/spectrum-analyzer-150khz-to-3ghz/dp/44W8980>

Smith, S. w. (2007). señales y sistemas . McGraw. (04 de septiembre de 2014).

<https://pablin.com.ar/electronica/circuito/radio/txfm18/index.htm>

Alan-V.-Oppenheim-Alan-S.-Willsky-with-S.-Hamid. (1996). *Signals-and-Systems*. USA: Sharyn Vitrano.

<https://materias.df.uba.ar/15a2021c1/files/2021/05/Alan-V.-Oppenheim-Alan-S.-Willsky-with-S.-Hamid-Signals-and-Systems-Prentice-Hall-1996.pdf>

Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer. Berkeley.CA USA: Springer .

Braga, N. C. (12 de octubre de 2015). *instituto NCB*.

<https://www.incb.com.mx/index.php/banco-de-circuitos/6472-transmisor-fm-estereo-con-el-ba1404-cir5231s>

Carrillo, M. M. (03 de marzo de 2013). *wordpress*.

<https://bloglabcom1.wordpress.com/wp->

content/uploads/2010/10/lata_pra07_lm1496_v01_02_01.pdf

Final Test. (12 de 04 de 2024). venta de instrumentos de prueba y medicion :

[https://www.finaltest.com.mx/GW-Instek-GSP-730-p/gsp-](https://www.finaltest.com.mx/GW-Instek-GSP-730-p/gsp-730.htm#:~:text=Es%20un%20Analizador%20de%20espectro,los%20experimentos%20de%20comunicaci3n%20RF.)

[730.htm#:~:text=Es%20un%20Analizador%20de%20espectro,los%20experimentos%20de%20comunicaci3n%20RF.](https://www.finaltest.com.mx/GW-Instek-GSP-730-p/gsp-730.htm#:~:text=Es%20un%20Analizador%20de%20espectro,los%20experimentos%20de%20comunicaci3n%20RF.)

Haikin, S. (2001). *Communication Systems (4th ed.)*. New York: John Wiley & Sons.

HERRERA, J. F. (18 de 11 de 2014). *Teoria de se~nales*.

<https://w3.ual.es/~vruiz/Docencia/Apuntes/Signals/Theory/index.html>

HERRES, D. (07 de 11 de 2019). *Text y Measurement.Tips*. Text y

Measurement.Tips: <https://www.testandmeasurementtips.com/bandwidth-basics-and-fundamentals/>

Hyndman, R. J. (2018). Forecasting: principles and practice. En R. J. Hyndman.

<https://otexts.com/fpp3/accuracy.html>

Kuzechie, A. (24 de marzo de 2021). *Anas Kuzechie projects*.

<https://akuzechie.blogspot.com/2021/03/tea5767-fm-stereo-radio.html>

Marian, P. (20 de Abril de 2009). *ELECTRO SCHEMATICS*. ELECTRO

SCHEMATICS: <https://www.electroschematics.com/pll-transmitter/>

MUKHERJI, J. (10 de 2014). *WWW.EFYMAG.COM*. ELECTRONICS FOR YOU:

<https://www.reddit.com/media?url=https%3A%2F%2Fi.redd.it%2Fcrystal-controlled-am-transmitter-with-100-modulation-v0-jqalvyrwig491.jpg%3Fs%3De66a8da5fc520c7639061fc7c5705f4be2567bef&rdt=52695>

Newark. (11 de 04 de 2024). An Avnet Company: [https://mexico.newark.com/gw-](https://mexico.newark.com/gw-instek/gsp-730/spectrum-analyzer-150khz-to-3ghz/dp/44W8980)

[instek/gsp-730/spectrum-analyzer-150khz-to-3ghz/dp/44W8980](https://mexico.newark.com/gw-instek/gsp-730/spectrum-analyzer-150khz-to-3ghz/dp/44W8980)

Smith, S. w. (2007). *se~nales y sistemas* . McGraw.

Anexos

1. <https://drive.google.com/drive/folders/1-mUyKeKAsgUHo57RrZuNFpt4t4L0bbf?usp=sharing>
Versión de Matlab R2024a
2. https://docs.google.com/document/d/1IGQOWO_QX63LFcISTzVhiOSslQgPh5vo/edit?usp=sharing&oid=103274312137303970418&rtpof=true&sd=true procesos matemáticos
3. [https://docs.google.com/document/d/1BtcjcC6e6-4Tsw9CcnABqizH4iYsekoL/edit?usp=drive link&oid=103274312137303970418&rtpof=true&sd=true](https://docs.google.com/document/d/1BtcjcC6e6-4Tsw9CcnABqizH4iYsekoL/edit?usp=drive_link&oid=103274312137303970418&rtpof=true&sd=true)
proceso componente de frecuencia

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|  <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p> | CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A) | CÓDIGO: AAC-BL-FR-032 |
| | | VERSIÓN: 1 |
| | | FECHA: 09/JUN/2022 |

San Juan de Pasto, 26 de noviembre de 2024

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto


Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado “Prototipo de sonda inalámbrica para un analizador de espectro GW-INSTEK 3GHZ GSP- 730 del laboratorio de ingeniería electrónica de la universidad CESMAG”, presentado por el (los) autor(es) Marlon Alejandro De La Rosa Salas del Programa Académico Ingeniería electrónica al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,


(Firma del Asesor)

Mario Fernando Henao Rosero
c.c. 4612719
Programa de Ingeniería Electrónica
3163455039
mfhenao@unicesmag.edu.co

| | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|  UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</small> | AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL | CÓDIGO: AAC-BL-FR-031 |
| | | VERSIÓN: 1 |
| | | FECHA: 09/JUN/2022 |

| INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES) | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Nombres y apellidos del autor: Marlon Alejandro De La Rosa Salas | Documento de identidad: 1233192817 |
| Correo electrónico: Alejosalas12356@gmail.com | Número de contacto: 3122073593 |
| Nombres y apellidos del autor: | Documento de identidad: |
| Nombres y apellidos del asesor: Mario Fernando Henao Rosero | Documento de identidad: 4612719 |
| Correo electrónico: mfhenao@unicesmag.edu.co | Número de contacto: 3163455039 |
| Título del trabajo de grado: Prototipo de sonda inalámbrica para un analizador de espectro GW-INSTEK 3GHZ GSP- 730 del laboratorio de ingeniería electrónica de la universidad CESMAG | |
| Facultad y Programa Académico: Facultad de Ingeniería – Programa Ingeniería electrónica | |

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve (mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje (mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
|  <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p> | AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL | CÓDIGO: AAC-BL-FR-031 |
| | | VERSIÓN: 1 |
| | | FECHA: 09/JUN/2022 |


- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMA
- G por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 26 días del mes de noviembre del año 2024

| |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Firma del autor |
| Nombre del autor: Marlon Alejandro de la rosa salas |

| |
|--|
| |
|--|



UNIVERSIDAD
CESMAG
NIT: 800.109.387-7
VIGILADA MINEDUCACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL

CÓDIGO: AAC-BL-FR-031

VERSIÓN: 1

FECHA: 09/JUN/2022

Firma del asesor

Nombre del asesor: Mario Fernando Henao Rosero