



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

TRABAJO DE TITULACIÓN

**Trabajo complejo, previo a la obtención del título
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

"Implementación y Evaluación de Técnicas de Medición de Parámetros RF Usando un VNA
Libre y un Kit de Demostración de RF"

AUTOR:

Nahima Elizabeth Mora Rosero

TUTOR SUGERIDO:

Ing. Luis Miguel Amaya

LA LIBERTAD- ECUADOR

2024

DEDICATORIA

Mi trabajo lo dedico con todo mi amor a mis padres por su sacrificio y esfuerzo, por darme un estudio para mi futuro y por creer en mi capacidad, aunque hemos pasado momentos muy difíciles siempre han estado brindándome su comprensión, amor y mano amiga.

A mis compañeros y amigos presentes, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegría y tristezas conmigo y a todas aquellas personas que durante todos estos años estuvieron a mi lado apoyándome a que culmine con este logro y este sueño se haga realidad.

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a sus aportes, a su amor, a su inmensa bondad y apoyo, lo complicado de lograr esta meta ha sido más llevadero. Les agradezco y hago presente mi afecto hacia ustedes, mi hermosa familia.

Nahima Elizabeth Mora Rosero.

AGRADECIMIENTO

Gracias Dios por ser mi fortaleza y peñasco, pues mediante sus bendiciones he podido lograr que culmine esta etapa de mi vida con éxito, por haberme dado sabiduría de discernir los conocimientos impartidos por mis gratos Ingenieros y así mediante poner en práctica muchos de ellos para ser una ayuda positiva a la sociedad.

A mis adorados padres, fuentes de inspiración que, a pesar de sus obligaciones en el trabajo, demostraron que nunca es tarde para cumplir sus metas, en especial a mi querida madre, gracias por su ayuda incondicional a pesar de su temperamento, siempre he contado con su mano amiga.

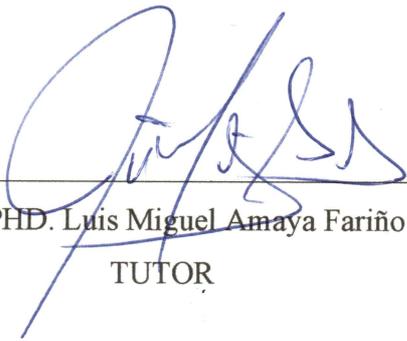
Y como olvidar a mis queridos amigos que supieron llegar a mí, gracias por compartir su valioso tiempo conmigo para poder concluir esta etapa de mi vida.

Nahima Elizabeth Mora Rosero.

APROBACION DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del trabajo de titulación denominado: “Implementación y Evaluación de Técnicas de Medición de parámetros RF Usando un VNA libre y un kit de Demostración de RF”, presentado por la estudiante Mora Rosero Nahima Elizabeth, de la carrera de Telecomunicaciones de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes y autorizo a la estudiante para que inicie los trámites legales correspondientes.

La Libertad, 26 de julio de 2024.



PHD. Luis Miguel Amaya Fariño
TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



PhD. Ronald Rovira Jurado.

DIRECTOR DE LA CARRERA



Ing. Andrade Caiche Carlos M.Sc.

DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Luis Amaya Fariño, M.Sc

DOCENTE TUTOR GUÍA



Ing. Corina Gonzabay De La A

SECRETARIA

Índice de Contenido

Dedicatoria.....	2
Agradecimiento.....	3
Resumen:.....	10
Objetivos Específicos:	11
Metodología:	12
Capítulo I	14
1.1 Introducción	14
1.1.1 Contexto y Justificación.....	14
1.1.2 Objetivos del Capítulo	15
1.1.3 Alcance de la Implementación.....	15
1.2 Revisión Bibliográfica	16
1.2.1 Principios Fundamentales de RF	16
1.2.2 Análisis de Parámetros S.....	16
1.2.3 Uso de VNAs en Medición de RF	19
Historia y evolución de los VNAs	19
Comparación entre VNAs comerciales y VNAs libres.....	20
1.3 Descripción del Equipo y Herramientas Utilizadas	21
1.3.1 Analizador de Redes Vectoriales (VNA) Libre (NanoVNA):.....	21
1.3.1.1 Especificaciones Técnicas del NanoVNA:	21
1.3.1.2 Características y Funcionalidades:.....	23
1.3.2 Kit de Demostración de RF:	26
1.3.2.1 Componentes Incluidos en el Kit:.....	26
1.3.2.2 Aplicaciones de los Componentes:	29
1.3.3 Software de Análisis	29

1.3.3.1	Instalación y Configuración.....	29
1.3.3.2	Funcionalidades Principales.....	32
1.4	Configuración del Laboratorio.....	34
1.4.1	Preparación del Área de Trabajo.....	34
1.4.1.1	Disposición del Equipo.....	34
1.4.1.2	Condiciones Ambientales.....	35
1.4.2	Conexión de los Dispositivos.....	36
1.4.2.1	Conexión del NanoVNA al Filtro.....	36
1.4.2.2	Uso de Cables y Adaptadores.....	37
1.5	Calibración del VNA.....	38
1.5.1	Importancia de la Calibración.....	38
1.5.2	Procedimiento de Calibración SOLT.....	40
1.5.2.1	Estándar de Circuito Abierto (Open).....	42
1.5.3	Verificación de la Calibración.....	46
1.5.3.1	Pruebas Iniciales de Medición.....	46
1.5.3.2	Ajustes y Correcciones.....	46
1.6	Procedimiento de Medición de Parámetros S.....	47
1.6.1	Selección del Rango de Frecuencia.....	47
1.6.2	Medición de Componentes Pasivos.....	48
1.6.2.1	Tipos de Filtros.....	48
1.6.2.4	Atenuadores.....	50
1.6.2.5	Antenas.....	50
1.6	Conclusión del Capítulo.....	51
1.6.1	Resumen de la Implementación.....	51
1.6.2	Logros y Resultados Obtenidos.....	52

1.6.3 Perspectivas para Trabajos Futuros.....	52
Capítulo II.....	53
2.1.1 Objetivo del Capítulo:.....	53
2.1.2 Importancia de los Filtros en Sistemas de RF:.....	53
2.1.3 Descripción de los Filtros Utilizados:.....	53
2.2 Procedimiento Experimental.....	54
2.2.1 Configuración del Sistema de Medición:.....	54
2.2.1.1 Selección del Rango de Frecuencia:.....	55
2.2.1.2 Conexión de los Filtros al NanoVNA:.....	55
2.2.1.3 Calibración del Sistema:.....	55
2.3 Medición y Análisis de Filtros Pasa-Bajas.....	56
2.3.1 Descripción del Filtro Pasa-Bajas:.....	56
2.4 Medición y Análisis de Filtros Pasa-Altas.....	57
2.4.1 Descripción del Filtro Pasa-Altas:.....	57
2.5 Medición y Análisis de Filtros Pasa-Banda.....	57
2.5.1 Descripción del Filtro Pasa-Banda:.....	57
2.6 Medición y Análisis de Filtros Rechaza-Banda.....	58
2.6.1 Descripción del Filtro Rechaza-Banda:.....	58
2.7 Comparación de Resultados.....	58
2.7.1 Comparación de Características de Filtros.....	58
2.7.2 Discusión de Discrepancias:.....	59
2.7.3 Implicaciones Prácticas:.....	60
2.8 Conclusión del Capítulo.....	60
2.8.1 Resumen de los Resultados Obtenidos:.....	60
2.8.2 Evaluación de la Metodología:.....	61

Capítulo III	61
3.1 Introducción	61
3.1.1 Objetivo del Capítulo:.....	61
3.1.2 Importancia de la Implementación Práctica:.....	62
3.1.3 Descripción de los Circuitos Utilizados:.....	62
3.2 Procedimiento General para la Medición	63
3.2.1 Configuración Inicial del NanoVNA:.....	63
3.2.2 Calibración del NanoVNA:.....	63
3.2.3 Procedimiento de Conexión de los Circuitos:.....	64
3.3 Implementación y Medición de Cada Circuito	64
3.4 Análisis y Comparación de Resultados.....	80
3.4.1 Comparación de Mediciones:	80
3.4.2 Discusión de Resultados:	80
Desarrollo de Material Educativo Basado en Resultados	81
Ejercicio 1: Medición y Análisis de un Circuito RLC Serie.....	81
Objetivos:.....	81
Ejercicio 2: Diseño y Medición de un Filtro Pasa-Bajas	83
Objetivos:.....	83
Ejercicio 3: Medición de Adaptación de Impedancia en un Sistema de Antena.....	84
Objetivos:.....	84
Conclusión del Capítulo.....	87
3.6.1 Resumen de los Resultados Obtenidos:	85
3.6.2 Evaluación de la Metodología:	87
Anexos	89
Bibliografías.....	90

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1	Línea de tiempo de la Historia del VNA Fuente: [10]	20
Ilustración 2	Interfaz Gráfica del libre VNA	24
Ilustración 3	Datos de mediciones guardados Fuente: Autor	25
Ilustración 4	Conexión del VNA a la PC	25
Ilustración 5	Selección de Puerto USB en la interfaz del NanoVNA	26
Ilustración 6	RF Demo KIT	28
Ilustración 7	Conectores UFL Hembra	28
Ilustración 8	Descarga del software Fuente: Autor	30
Ilustración 9	Descomprimir el archivo ZIP Fuente: Autor	30
Ilustración 10	Interfaz del software Libre VNA Fuente: Autor	31
Ilustración 11	Selección del Puerto USB de la PC Fuente: Autor	32
Ilustración 12	Conexión correcta del VNA a la Pc Fuente: Autor	37
Ilustración 13	Conectores SMA y UFL respectivamente Fuente: Autor	38
Ilustración 14	Resultados sin Calibración Fuente: Autor	39
Ilustración 15	Conexión Física Fuente: Autor	40
Ilustración 16	Kit De Calibración Fuente: Autor	40
Ilustración 17	Encendido de VNA Fuente: Autor	41
Ilustración 18	Ajustes de Calibración en el VNA Fuente: Autor	41
Ilustración 19	Conexión de circuito abierto en el Puerto 1 Fuente: Autor	42
Ilustración 20	Medidas para el circuito abierto	43
Ilustración 21	Calibración Puerto 1 Corto Fuente: Autor	44
Ilustración 22	Calibración de Carga Fuente: Autor	44
Ilustración 23	Conexión correcta para calibración THRU Fuente: Autor	45
Ilustración 24	Ventana de Calibración Fuente: Autor	46
Ilustración 25	Kit de Calibración Fuente: Autor	56
Ilustración 26	Calibración SOLT de 1GHz hasta 6GHz Fuente: Autor	63
Ilustración 27	Calibración SOLT con las frecuencias de trabajo Fuente: Autor	64

Ilustración 28	Conexión del filtro con el VNA Fuente: Autor	65
Ilustración 29	Parámetro S11 del circuito 1 Fuente: Autor.....	65
Ilustración 30	Parámetros S11 del Circuito 2	67
Ilustración 31	Parámetros S11 del circuito 3 Fuente: Autor	68
Ilustración 32	Parámetro S11 circuito 4 Fuente: Autor.....	69
Ilustración 33	Calibración del Circuito 5 Fuente: Autor.....	70
Ilustración 34	LOGMAG del circuito 5 Fuente: Autor.....	70
Ilustración 35	Calibración del circuito 6 Fuente: Autor.....	71
Ilustración 36	S21 LOGMAG del circuito 6 Fuente: Autor.....	72
Ilustración 37	Calibración del circuito 7 Fuente: Autor.....	73
Ilustración 38	Parámetro S11 del circuito 7 Fuente: Autor.....	73
Ilustración 39	Calibración del circuito 8 Fuente: Autor.....	74
Ilustración 40	Parámetro S11 del circuito 8 Fuente: Autor.....	75
Ilustración 41	Parámetro S11 en el circuito 9 Fuente: Autor.	76
Ilustración 42	Calibración del circuito 10 Fuente: Autor.....	77
Ilustración 43	Parámetro S11 del circuito 10 Fuente: Autor.....	77
Ilustración 44	LOGMAG 21 del circuito 11	78
Ilustración 45	Parámetro S21 LOGMAG circuito 11 Fuente: Autor.	78
Ilustración 46	Atenuación 10 dB.....	82
Ilustración 47	Carga Ideal 50 Ohm.....	83
Ilustración 48	Cortocircuito.....	85

Índice de tablas

Tabla 1	Ventajas y Limitaciones de VNAs comerciales y libres Fuente: Autor	21
Tabla 2	Especificaciones técnicas del Libre NanoVNA	22
Tabla 3	Circuitos Kit Demo Fuente: RF Demo Quick Start Guide	28
Tabla 4	Comparación de filtros Fuente: Pozar, Microwave Engineering	59
Tabla 5	Comparación de resultados Fuente: Autor	80

Resumen:

El objetivo de este trabajo de titulación es desarrollar un marco práctico y educativo para la enseñanza y la evaluación de técnicas de medición de parámetros de radiofrecuencia (RF) en un entorno de laboratorio. Utilizando un VNA libre, como el NanoVNA, y un Kit de Demostración de RF, se implementarán y evaluarán diferentes métodos de medición y análisis de componentes pasivos de RF. Este trabajo no solo reforzará los conceptos teóricos aprendidos en el aula, sino que también proporcionará habilidades prácticas esenciales para futuros ingenieros de telecomunicaciones.

Los sistemas de medición de los parámetros de radiofrecuencia (RF) son esenciales para aplicaciones tecnológicas como telecomunicaciones, sistemas de radar, y electrónica de consumo. Estos sistemas aseguran la calidad, eficiencia y seguridad de dispositivos que dependen de señales RF. El patrón de radiación de una antena, que muestra directividad, intensidad de campo y polarización, es complejo de obtener manualmente, pero se facilita con sistemas de medición automatizados. Estos sistemas permiten que la antena transmisora gire, mientras que una antena receptora fija, del tipo corneta y operando en frecuencias de microondas, capta los datos.

Medir con precisión los parámetros RF es crucial para garantizar la calidad del servicio en telecomunicaciones y cumplir con normativas de emisión de señales para evitar interferencias y proteger la salud pública. Las mediciones precisas también son vitales para el mantenimiento predictivo y correctivo, reduciendo tiempos de inactividad y costos de reparación. Estos sistemas evalúan la respuesta de redes de RF midiendo parámetros como la impedancia y la pérdida de retorno, y permiten la integración y automatización de mediciones mediante software de control.

Palabras Clave: Analizador, radiofrecuencia, calibración, medición, VNA.

Abstract:

The objective of this thesis work is to develop a practical and educational framework for teaching and evaluating radiofrequency (RF) parameter measurement techniques in a laboratory environment. Using a free VNA, such as the NanoVNA, and an RF Demonstration Kit, different measurement and analysis methods for passive RF components will be implemented and evaluated. This work will not only reinforce the theoretical concepts learned in the classroom but also provide essential practical skills for future telecommunications engineers.

RF parameter measurement systems are essential for technological applications such as telecommunications, radar systems, and consumer electronics. These systems ensure the quality, efficiency, and safety of devices that rely on RF signals. The radiation pattern of an antenna, which shows directivity, field intensity, and polarization, is complex to obtain manually but is facilitated with automated measurement systems. These systems allow the transmitting antenna to rotate while a fixed horn-type receiving antenna, operating at microwave frequencies, captures the data.

Accurately measuring RF parameters is crucial to ensuring service quality in telecommunications and complying with signal emission regulations to avoid interference and protect public health. Accurate measurements are also vital for predictive and corrective maintenance, reducing downtime and repair costs. These systems evaluate the response of RF networks by measuring parameters such as impedance and return loss, and they enable the integration and automation of measurements through control software.

Keywords: Analyzer, radiofrequency, calibration, measurement, VNA.

Objetivos Específicos:

1. **Configurar y Calibrar el VNA Libre:** Aprender a configurar y calibrar correctamente un VNA libre utilizando estándares de calibración y técnicas adecuadas.
2. **Medición de Componentes Pasivos de RF:** Medir y analizar parámetros S (S_{11} , S_{21}) de diferentes componentes pasivos como filtros, atenuadores y antenas.
3. **Análisis y Documentación de Datos:** Interpretar los datos obtenidos, compararlos con especificaciones teóricas y documentar los resultados en informes técnicos.
4. **Desarrollo de Material Educativo:** Crear guías prácticas y tutoriales para estudiantes y profesores sobre el uso del VNA libre y el Kit de Demostración de RF en el laboratorio.

Metodología:

1. **Revisión Bibliográfica:** Investigar conceptos clave de RF, técnicas de medición y uso de VNAs en aplicaciones educativas.
2. **Configuración del Laboratorio:**
 - Adquirir y preparar el VNA libre y el Kit de Demostración de RF.
 - Instalar y familiarizarse con el software necesario
3. **Calibración del VNA:**
 - Realizar calibraciones SOLT (Short-Open-Load-Thru) utilizando los estándares del kit.
4. **Medición de Componentes Pasivos:**
 - Filtros: Realizar mediciones de parámetros S de filtros pasa-bajas, pasa-altas, pasa-banda y rechaza-banda.
 - Antenas: Medir y analizar la adaptación y eficiencia de diferentes tipos de antenas.
 - Atenuadores: Evaluar la pérdida de inserción y la adaptación de impedancia de atenuadores.
5. **Análisis de Datos:**
 - Interpretar y comparar los resultados obtenidos con las especificaciones teóricas y de diseño.
 - Utilizar herramientas de software para visualizar y analizar los datos.

6. Desarrollo de Material Educativo:

- Crear tutoriales y guías paso a paso sobre el uso del VNA y el kit de demostración para realizar mediciones de RF.
- Diseñar ejercicios prácticos y actividades de laboratorio para estudiantes.

Resultados Esperados:

- Un informe técnico detallado que documente todas las mediciones y análisis realizados, incluyendo gráficas y tablas de datos.
- Guías educativas y tutoriales para el uso del VNA libre y el Kit de Demostración de RF.
- Ejemplos prácticos y ejercicios de laboratorio que puedan ser integrados en el currículo de telecomunicaciones.

Conclusión:

Este trabajo de titulación proporcionará un recurso valioso tanto para estudiantes como para profesores en el campo de las telecomunicaciones, mejorando la comprensión y las habilidades prácticas en la medición y el análisis de parámetros RF. Además, el uso de herramientas accesibles como el VNA libre y el Kit de Demostración de RF facilitará la enseñanza y el aprendizaje en laboratorios educativos de telecomunicaciones.

CAPITULO I

Implementación del Sistema de Medición de Parámetros RF

1.1 Introducción

1.1.1 Contexto y Justificación:

Descripción de la importancia de las mediciones de RF en telecomunicaciones:

Los sistemas de medición de los parámetros de radiofrecuencia (RF) son esenciales en diversas aplicaciones tecnológicas, incluyendo telecomunicaciones, sistemas de radar, electrónica de consumo y espectro de señales RF, lo cual es de gran importancia para garantizar la calidad, eficiencia y seguridad de los dispositivos y sistemas que dependen de estas señales.

El patrón de radiación de una antena es la representación gráfica de las propiedades de radiación como es la directividad, intensidad de campo y la polarización o fase de las coordenadas espaciales, El proceso de obtención del patrón de radiación de una antena es muy laborioso cuando se realiza manualmente, ya que implica la recolección de una gran cantidad de datos. Sin embargo, utilizando un sistema de medición, este proceso se vuelve más eficiente. En este sistema, la antena transmisora gira mediante un mecanismo de posicionamiento, mientras que la antena receptora, que es de tipo corneta, permanece fija. Esta antena corneta opera en frecuencias de microondas y tiene un amplio ancho de banda [1]

Un analizador de redes (VNA) sirve para medir frecuencias en un entorno controlado para medir pequeños circuitos, filtros, en los cuales se utilizan en estudios para comprobar hipótesis con respecto a la frecuencia de trabajo en la que funciona el dispositivo. Estos instrumentos funcionan con un sistema de estímulo-respuesta, compuesto por una fuente de radiofrecuencia (RF) y múltiples receptores de medición. Esto permite medir parámetros como los coeficientes de reflexión, características de transmisión y parámetros de dispersión (S).

Justificación del uso de un VNA libre y un Kit de Demostración de RF:

La medición precisa de los parámetros RF es crucial para asegurar la calidad del servicio en las telecomunicaciones. Los operadores de redes móviles, por ejemplo, necesitan asegurarse de

que sus señales RF cumplen con las especificaciones requeridas para evitar interferencias y garantizar una buena calidad de llamada y transferencia de datos.

Existen regulaciones estrictas sobre la emisión de señales RF para evitar interferencias perjudiciales y proteger la salud pública. Las mediciones precisas de parámetros RF ayudan a asegurar que los dispositivos cumplen con estas normativas y regulaciones internacionales y locales [2].

Para el mantenimiento predictivo y correctivo de equipos de RF, es necesario monitorear continuamente los parámetros clave. Esto permite detectar fallos potenciales antes de que ocurran, reduciendo el tiempo de inactividad y los costos de reparación.

Evalúa la respuesta de redes de RF y sistemas, incluyendo la medida de parámetros como la impedancia y la pérdida de retorno. Mediante el software de control de análisis permite la integración y automatización de las mediciones, así como el análisis de datos para generar informes y realizar diagnósticos [3].

1.1.2 Objetivos del Capítulo:

Establecer los objetivos específicos:

- Configurar y calibrar correctamente el VNA libre.
- Realizar mediciones precisas de componentes pasivos de RF.
- Analizar e interpretar los datos obtenidos.

1.1.3 Alcance de la Implementación:

Delimitar el alcance del trabajo:

- Especificar los componentes que se medirán (filtros, atenuadores, circuitos, antenas).
- Describir los métodos de medición y análisis que se utilizarán.
- Definir las herramientas y el software que se emplearán en el proceso.

1.2 Revisión Bibliográfica

1.2.1 Principios Fundamentales de RF:

Introducción a los conceptos básicos de RF:

La radiofrecuencia (RF) se refiere al rango de frecuencias dentro del espectro electromagnético que se utiliza principalmente para la transmisión y recepción de señales de radio, entre las características principales de radio frecuencia hay dos principales:

I.Frecuencia y Longitud de Onda: se conoce como frecuencia el número de ciclos de una onda que ocurren por un segundo en cambio la longitud es la distancia que una onda recorre en un ciclo completo.

II.Ondas electromagnéticas se constituyen en composición y propagación, las ondas de radio (RF) consiste en campos eléctricos y magnéticos que oscilan perpendicularmente entre sí y suelen propagarse a través del espacio libre.[4]

Frecuencia y longitud de onda:

- Definir la relación entre frecuencia y longitud de onda.
- Presentar ejemplos de aplicaciones en diferentes bandas de frecuencia.

1.2.2 Análisis de Parámetros S:

Descripción de los parámetros S:

Los parámetros de dispersión, comúnmente conocidos como parámetros S, son una representación matemática utilizada en ingeniería de radiofrecuencia (RF) y microondas para describir cómo las señales se transmiten y reflejan a través de un dispositivo de RF. Estos parámetros se utilizan para caracterizar la respuesta en frecuencia de componentes y redes de RF, como amplificadores, filtros, antenas y líneas de transmisión.[5]

Principales Parámetros S

- I. S_{11} (Coeficiente de Reflexión de Entrada):

Es el encargado de medir la cantidad de señal reflejada de vuelta al puerto de entrada, además indica como la impedancia del dispositivo se adapta a la impedancia de la fuente.

II. S_{21} (Coeficiente de Transmisión de Entrada a Salida):

Mide la cantidad de señal que pasa desde el puerto de entrada al puerto de salida es el parámetro encargado de indicar la ganancia o pérdida de la señal a través del dispositivo.

III. S_{12} (Coeficiente de Transmisión de Salida a Entrada):

Es el opuesto al coeficiente de transmisión de entrada a salida como su nombre lo detalla ya que mide la cantidad de señal que pasa del puerto de salida al puerto de entrada además de indicar la ganancia o pérdida en la dirección inversa que tiene mucha relevancia en los dispositivos bidireccionales.

IV. S_{22} (Coeficiente de Reflexión de Salida):

Mide la cantidad de señal reflejada de vuelta al puerto de salida, con respecto a la impedancia indica como esta se adapta desde el dispositivo a la impedancia de la carga.[6]

Matriz S

Para un dispositivo de dos puertos como es el caso del Libre VNA que se va a utilizar, los parámetros S se organizan en una matriz 2x2, conocida como la matriz s:

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix}$$

Los parámetros S_{11} y S_{22} describen la reflexión en los puertos de entrada y salida, respectivamente. [7]

Los parámetros S_{21} y S_{12} en cambio describen la transmisión de la señal a través del dispositivo en ambas direcciones.

La obtención de los parámetros S (parámetros de dispersión) a partir de mediciones con un Analizador de Redes Vectoriales (VNA) es un proceso fundamental en el análisis y diseño de

componentes y sistemas de RF. Los parámetros S describen cómo las señales de RF se reflejan y transmiten a través de un dispositivo bajo prueba. Estos parámetros se obtienen de la siguiente forma:

- ✓ Calibración del VNA
- ✓ Configuración del VNA
- ✓ Conexión del dispositivo bajo prueba
- ✓ Medición de Parámetros S

Importancia de los parámetros S en la caracterización de dispositivos RF:

Los parámetros S (parámetros de dispersión) son fundamentales en la caracterización y evaluación del desempeño de dispositivos de RF como filtros, amplificadores y antenas. Estos parámetros proporcionan información crucial sobre cómo las señales de RF se reflejan y transmiten a través de un dispositivo, lo que permite a los ingenieros analizar y optimizar su rendimiento [8]. A continuación, se explica cómo se utilizan los parámetros S en la evaluación de estos dispositivos de RF:

Evaluación de Filtros

Parámetros S Relevantes: S₂₁ y S₁₁.

- ✓ **S₂₁ (Coeficiente de Transmisión):** Indica la cantidad de señal que pasa a través del filtro. Un buen filtro tendrá un valor alto de S₂₁ en su banda de paso y un valor bajo en sus bandas de rechazo.
- ✓ **S₁₁ (Coeficiente de Reflexión):** Mide la cantidad de señal que se refleja de vuelta desde la entrada del filtro. Un valor bajo de S₁₁ en la banda de paso indica una buena adaptación de impedancia y mínimas pérdidas por reflexión.

Análisis:

- ✓ **Banda de Paso:** Evaluar el ancho de banda donde S₂₁ es alto, lo que indica una baja atenuación.

- ✓ **Banda de Rechazo:** Determinar las frecuencias donde S_{21} es bajo, indicando que las señales no deseadas son efectivamente atenuadas.
- ✓ **Adaptación de Impedancia:** Asegurarse de que S_{11} sea bajo en la banda de paso para minimizar las reflexiones y pérdidas de señal.

Evaluación de Antenas

- ✓ **Parámetros S Relevantes:** S_{11} .
- ✓ **S_{11} (Coeficiente de Reflexión):** Mide la cantidad de señal que se refleja de vuelta desde la antena. Un valor bajo de S_{11} indica una buena adaptación de impedancia y una mayor eficiencia de radiación.

Análisis:

- ✓ **Adaptación de Impedancia:** Evaluar S_{11} para asegurarse de que la antena esté bien adaptada a la impedancia de la línea de transmisión (generalmente 50 ohmios). Un valor bajo de S_{11} en la banda de operación indica una mínima reflexión y máxima transferencia de potencia.[9]
- ✓ **Ancho de Banda:** Determinar el rango de frecuencias donde S_{11} es suficientemente bajo, indicando que la antena opera eficientemente en ese rango.

1.2.3 Uso de VNAs en Medición de RF:

Historia y evolución de los VNAs:

La evolución de los VNAs ha sido impulsada por los avances en la tecnología de semiconductores, la digitalización y la necesidad de mediciones de RF más precisas y rápidas. Desde sus inicios voluminosos y manuales hasta los modelos modernos compactos y automatizados, los VNAs han transformado la forma en que se analizan y diseñan los sistemas de RF, siendo una herramienta indispensable en la ingeniería y las telecomunicaciones actuales. [10]

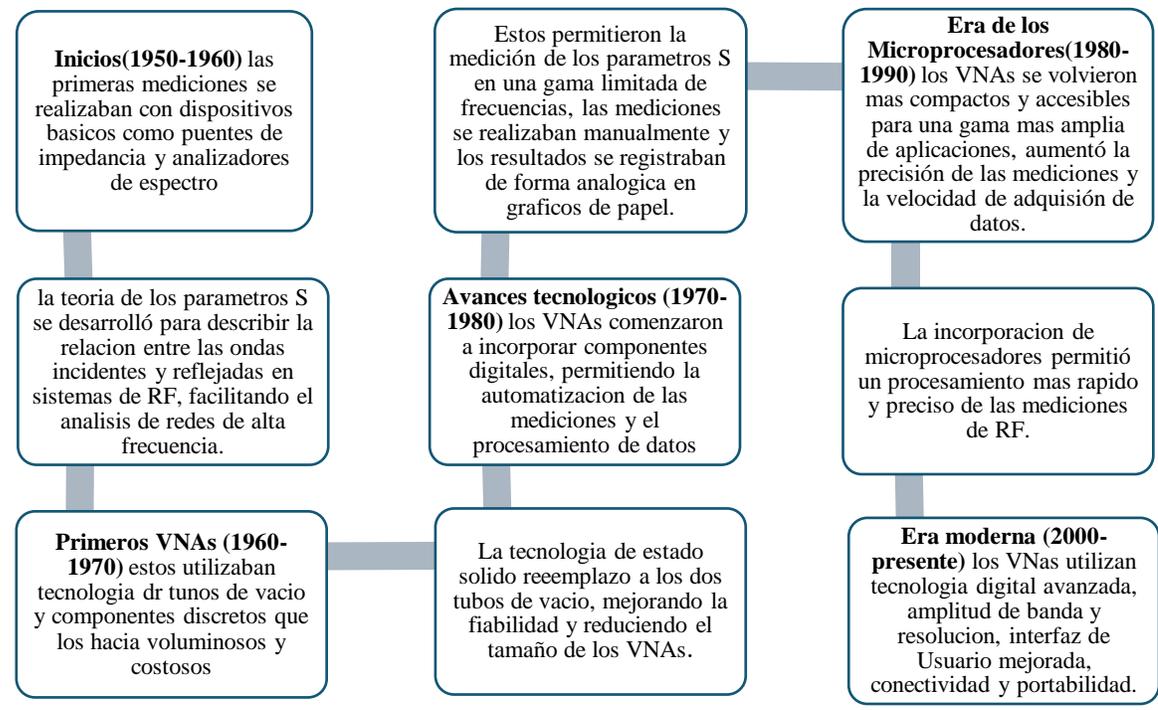


Ilustración 1 Línea de tiempo de la Historia del VNA Fuente: [10]

Comparación entre VNAs comerciales y VNAs libres:

VNAs Comerciales de Alta Gama: Son ideales para aplicaciones profesionales y de investigación donde la precisión, el rango de frecuencia amplio, y las funciones avanzadas son esenciales. A pesar de su alto costo, proporcionan el rendimiento y la confiabilidad necesarios para entornos críticos.

VNAs Libres como el NanoVNA: Son excelentes para aplicaciones educativas, de hobby y pequeñas empresas donde el presupuesto es limitado. Ofrecen una introducción práctica a las mediciones de RF y son suficientemente precisos para muchas aplicaciones básicas, aunque no reemplazan a los VNAs comerciales de alta gama en términos de precisión y capacidades avanzadas. La elección entre un VNA comercial de alta gama y un VNA libre depende de las necesidades específicas, el presupuesto y el nivel de precisión requerido para la aplicación en cuestión.[11]

COMPARACIÓN ENTRE VNAs COMERCIALES Y VNAs LIBRES				
VNAS COMERCIALES				
VENTAJAS	Precisión y Exactitud	Amplio Rango de Frecuencia	Funciones Avanzadas	Soporte y Actualizaciones
LIMITACIONES	Costo	Complejidad		
VNAS LIBRES				
VENTAJAS	Costo	Portabilidad	Simplicidad de Uso	Comunidad y Recursos abiertos
LIMITACIONES	Precisión y Exactitud	Rango de Frecuencia	Funciones Limitadas	Calidad de construcción

Tabla 1 Ventajas y Limitaciones de VNAs comerciales y libres Fuente: Autor

1.3 Descripción del Equipo y Herramientas Utilizadas

1.3.1 Analizador de Redes Vectoriales (VNA) Libre (NanoVNA):

1.3.1.1 Especificaciones Técnicas del NanoVNA:

El NanoVNA es un Analizador de Redes Vectoriales de bajo costo que ha ganado popularidad debido a su accesibilidad y portabilidad. A continuación, se detallan sus especificaciones técnicas relevantes:

Especificaciones Técnicas del NanoVNA	
Rango de Frecuencia	50 kHz a 900 MHz
Rango dinámico	70dB en el rango de 50 kHz a 300 MHz
	50dB en el rango de 300 MHz a 900 MHz
Resolución de Frecuencia	10 Hz
Precisión de Amplitud	±0.5 dB en el rango de 50 kHz a 300 MHz
	±1 dB en el rango de 300 MHz a 900 MHz
Resolución de Amplitud	0.01 dB
Precisión de Fase	± 2 grados
Resolución de Fase	0.01 grados

Impedancia de entrada/salida	50 Ω
Conectividad	USB para conexión a PC y carga
Capacidad de Memoria	Almacenamiento de hasta 101 puntos de calibración en la memoria interna
Formatos de Medición	Parámetros S(S11 y S21), impedancia, resistencia, reactancia, coeficiente de reflexión y pérdida de retorno.
Modos de Visualización	Gráfico de Smith, log-magnitude, pase, group, delay, polar y SWR,.
Calibración	Admite calibraciones de tipo Open, Short, Load y Thru. Posibilidad de guardar múltiples perfiles de calibración.

Tabla 2 Especificaciones técnicas del Libre NanoVNA

Fuente: Datasheet Nano VNA

Ventajas y Limitaciones del NanoVNA

Ventajas:

- ✓ **Costo Efectivo:** Extremadamente accesible en comparación con VNAs comerciales de alta gama.
- ✓ **Portabilidad:** Compacto y fácil de transportar.
- ✓ **Funcionalidad Básica Adecuada:** Suficiente para muchas aplicaciones de hobby, educativas y de pequeñas empresas.
- ✓ **Comunidad Activa:** Amplio soporte de la comunidad con recursos y software de código abierto.

Limitaciones:

- ✓ **Rango de Frecuencia Limitado:** Máximo hasta 900 MHz (1.5 GHz o 3 GHz en modelos extendidos, pero con menor precisión).

- ✓ **Menor Precisión y Resolución:** Comparado con VNAs de alta gama, la precisión y resolución son inferiores.
- ✓ **Calidad de Construcción:** Materiales y componentes menos duraderos.
- ✓ **Soporte Técnico Limitado:** Menos soporte profesional y documentación comparado con VNAs comerciales.
- ✓ El libre NanoVNA es una excelente herramienta para usuarios que requieren un analizador de redes vectoriales económico y portátil, especialmente útil para aplicaciones básicas y educativas.

1.3.1.2 Características y Funcionalidades:

El NanoVNA 2022 es una herramienta poderosa y accesible para la medición de redes vectoriales. Sus características avanzadas, como la capacidad de almacenamiento, conectividad versátil y capacidad de calibración detallada lo hacen ideal tanto para estudiantes como para profesionales en el campo de la RF. Su facilidad de uso y capacidad de realizar mediciones precisas y confiables lo convierten en una opción atractiva para diversas aplicaciones de análisis y diseño de RF. [12]

Interfaz Gráfica Mejorada: Menús gráficos avanzados que facilitan el acceso a las funciones del dispositivo, en donde se grafican los parámetros S

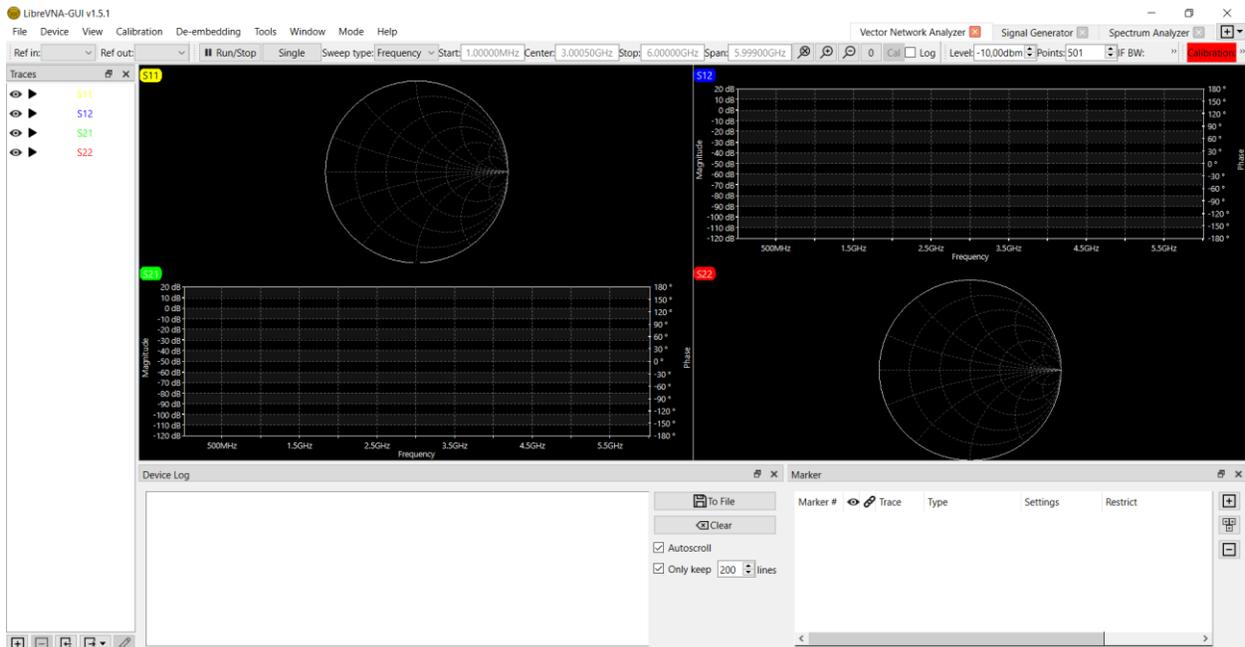


Ilustración 2 Interfaz Gráfica del libre VNA

Facilidad de Uso: Diseñado para que incluso los usuarios principiantes puedan realizar mediciones y análisis sin complicaciones.

Memoria Interna

Calibraciones: Capacidad para almacenar hasta 201 puntos de calibración, permitiendo guardar múltiples perfiles para diferentes configuraciones de prueba.

Datos de Mediciones: Almacenamiento de datos de mediciones para su posterior análisis, como se puede observar en la Ilustración 3 que en la interfaz se encuentra la ventana que permite cargar un análisis de datos medidos que anteriormente han sido guardados.

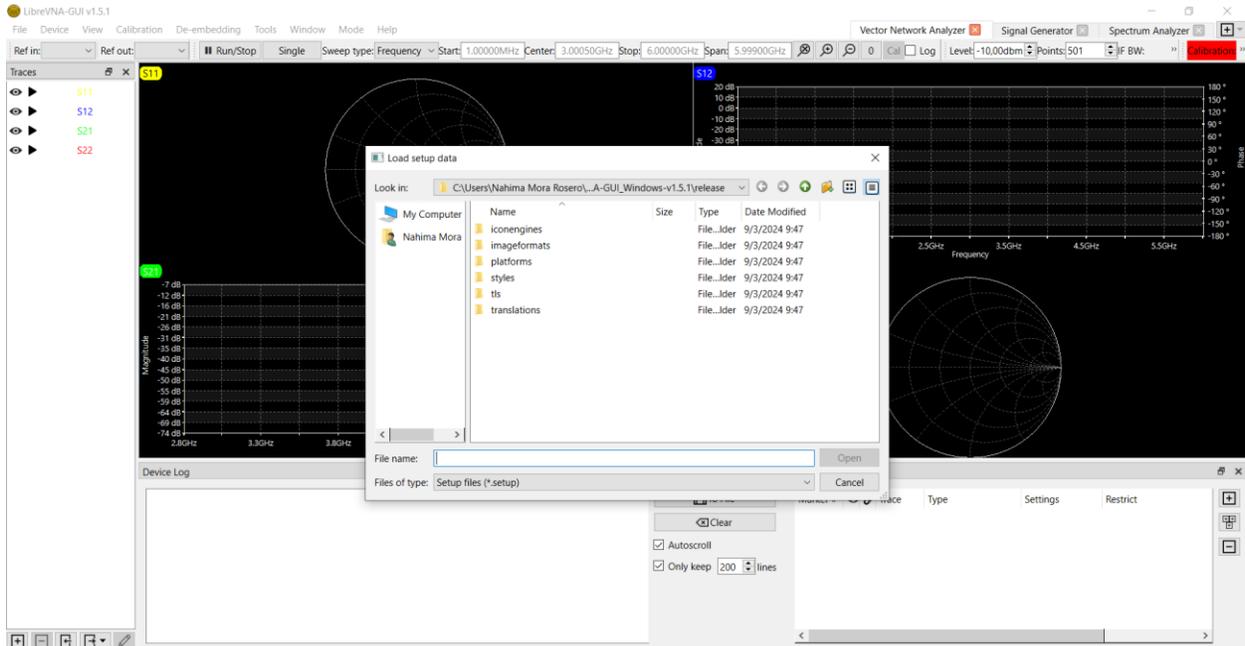


Ilustración 3 Datos de mediciones guardados Fuente: Autor.

Conectividad

- **USB:**

Funcionalidad: Puerto USB tipo C para conexión a PC, para la visualización de la interfaz tal como se observa en la Ilustración 4

Software Compatible: Utilizado para interactuar con software de análisis de redes en PC, permitiendo una visualización y manipulación más avanzada de los datos.

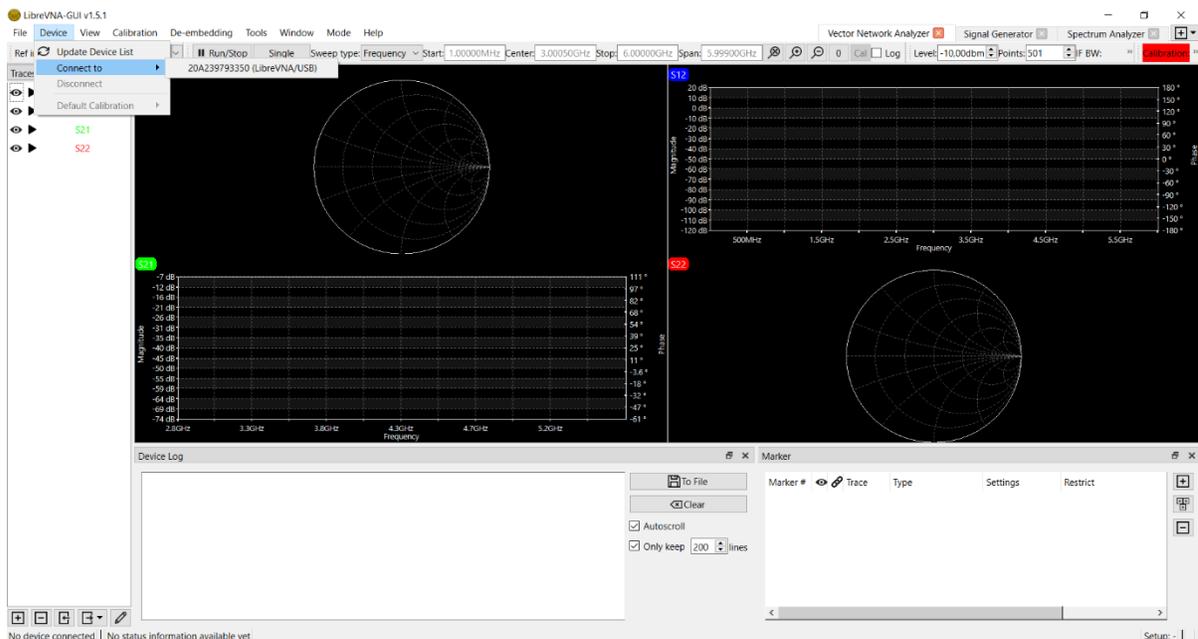


Ilustración 4 Conexión del VNA a la PC

Fuente: Autor

Al momento de conectar el dispositivo a la PC se puede observar tal como se ejemplifica en la Ilustración 5 que las gráficas otorgadas por el equipo no son claras por esta razón el dispositivo se presenta con herramientas de calibración para tener mediciones precisas.

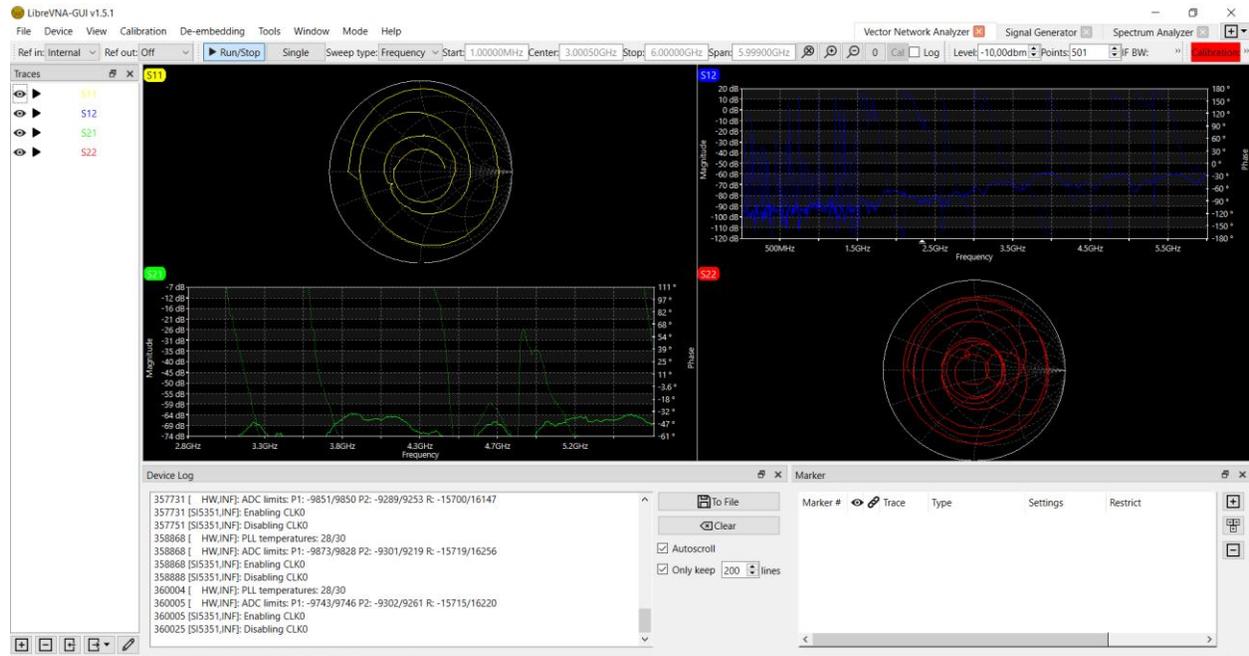


Ilustración 5 Selección de Puerto USB en la interfaz del NanoVNA

Fuente: Autor

1.3.2 Kit de Demostración de RF:

1.3.2.1 Componentes Incluidos en el Kit:

Este kit de demostración de RF está diseñado para proporcionar una amplia gama de componentes necesarios para experimentar y aprender sobre diversas aplicaciones y mediciones de radiofrecuencia. Desde la calibración y medición básica hasta el análisis avanzado de sistemas de RF, estos componentes permiten una experiencia de aprendizaje integral. [13]

El Kit de Demostración de RF (RF Demo Kit) es una herramienta educativa y de desarrollo diseñada para proporcionar una plataforma práctica para aprender y experimentar con conceptos de radiofrecuencia (RF) y microondas. Permite a los usuarios familiarizarse con el uso de

analizadores de redes vectoriales (VNAs), generadores de señales, medidores de potencia y otros instrumentos de RF.

Proporciona la capacidad de medir y analizar diversos componentes de RF, como filtros, antenas, atenuadores, divisores de potencia y acopladores direccionales. Proporciona herramientas para evaluar el desempeño de prototipos bajo condiciones reales de operación. Un kit de demostración de RF suele incluir una variedad de componentes para realizar diversas mediciones y experimentos en el campo de la radiofrecuencia. A continuación, se lista los componentes típicos que se pueden encontrar en un kit de este tipo:

PLACA PCB DE 18 CIRCUITOS	
Conectores UFL Hembra	
Circuito 1	RLC serie- paralelo frecuencia de inicio = 50kHz, fin= 600MHz.
Circuito 2	RL Series- paralelo frecuencia de inicio = 50kHz, fin= 600MHz.
Circuito 3	Resistencia de 33 Ohm frecuencia de inicio = 50kHz, fin= 1000MHz.
Circuito 4	Resistencia de 74 Ohm frecuencia de inicio=50 kHz, fin= 1000MHz.
Circuito 5	6.5Mhz Rechaza banda frecuencia de inicio=5.5MHz, fin= 7.5MHz.
Circuito 6	10.7 Mhz Pasa banda Ceramic filter frecuencia de inicio=9.7MHz, fin= 11.7MHz.
Circuito 7	RC serie frecuencia de inicio=50kHz, fin= 300MHz
Circuito 8	LC serie frecuencia de inicio=50kHz, fin= 600MHz.
Circuito 9	Capacitancia frecuencia de inicio=50kHz, fin= 300MHz.
Circuito 10	Inductancia frecuencia de inicio=50kHz, fin= 30MHz.

Circuito 11	Filtro Pasa Baja de 400MHz frecuencia de inicio=100kHz, fin= 600MHz, Scale= 2dB.
Circuito 12	Filtro Pasa Alto de 500MHz frecuencia de inicio=1MHz, fin= 1000MHz, Scale= 10dB.

Tabla 3 Circuitos Kit Demo Fuente: RF Demo Quick Start Guide

Componentes:

RF DEMO KIT QUICK START GUIDE



Ilustración 6 RF Demo KIT Fuente: Autor

En el demo kit está incluido una placa con 18 circuitos que permiten hacer un análisis de frecuencia en cada caso que presenta que posteriormente se analizara con detalle cada señal con la medición del VNA

Conectores UFL hembra

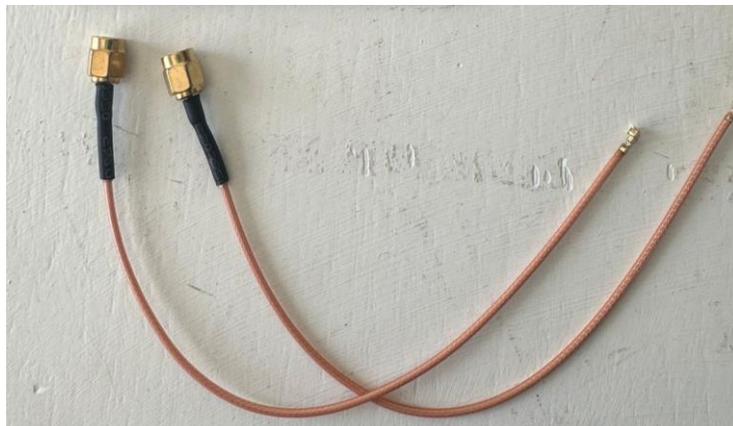


Ilustración 7 Conectores UFL Hembra Fuente: Autor

1.3.2.2 Aplicaciones de los Componentes:

Los conectores U. FL (Ultra Miniature Coax Connectors) hembra son conectores coaxiales en miniatura utilizados principalmente en aplicaciones de RF (radiofrecuencia). Estos conectores son muy comunes en dispositivos electrónicos que requieren conexiones de antena. [14]

Características de los conectores U. FL hembra:

Tamaño pequeño: Son extremadamente compactos, lo que los hace ideales para dispositivos portátiles y aplicaciones donde el espacio es limitado.

Alta frecuencia: Pueden manejar señales de alta frecuencia, típicamente hasta 6 GHz.

Fácil conexión y desconexión: Aunque son pequeños, están diseñados para facilitar la conexión y desconexión con herramientas especiales.

Impedancia característica: Normalmente tienen una impedancia de 50 ohmios, adecuada para aplicaciones de RF.

1.3.3 Software de Análisis

1.3.3.1 Instalación y Configuración:

Existen algunos softwares que son compatibles con el dispositivo libre NanoVNA dos principales:

- I. Nano VNA Saber
- II. Libre Nano VNA GUI

En este caso en particular el software que se va a utilizar es el recomendado por el manual de usuario que vino con el dispositivo el Libre Nano VNA GUI.

Pasos para instalar el software libre Nano VNA.

Para instalar este software es muy fácil ya que su archivo se lo puede encontrar con sencillez en el buscador Google se escribe Libre Nano VNA software en el cual podemos

seleccionar el primer link que aparece después de la búsqueda en el cual se lo detalla a continuación en la ilustración 8:

<https://github.com/jankae/LibreVNA/releases>

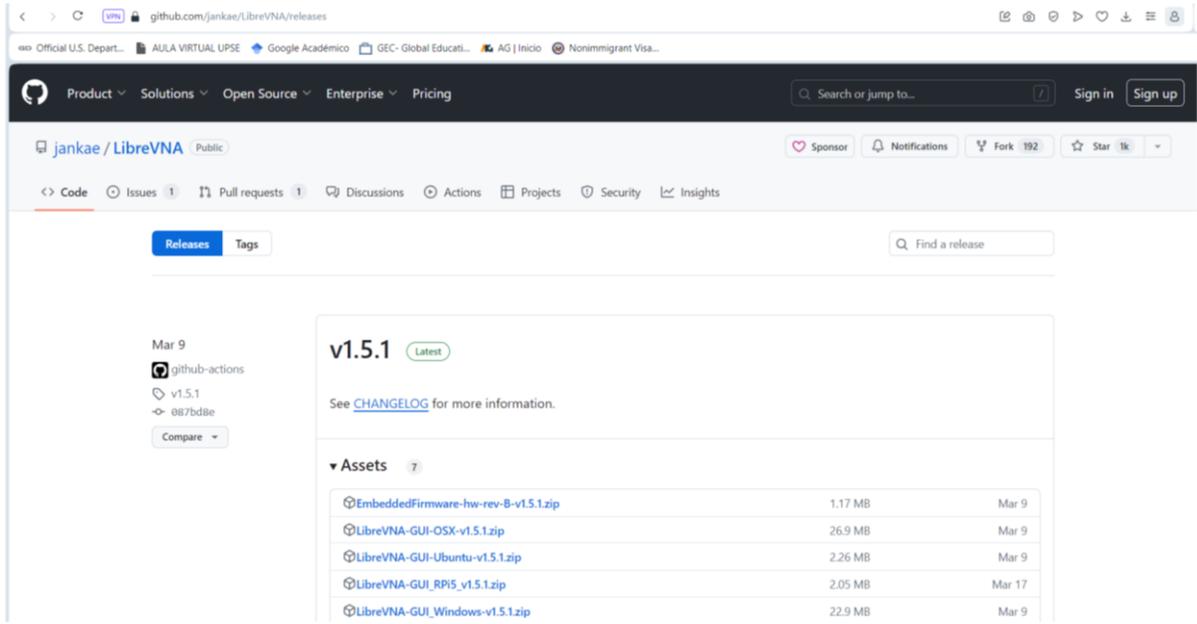


Ilustración 8 Descarga del software Fuente: Autor

Luego de descargar la carpeta de archivo según las condiciones de su PC en la cual va a trabajar se procede a descomprimir el archivo .ZIP en la carpeta de trabajo que se va a almacenar los archivos, tal como se ejemplifica en la Ilustración 9.

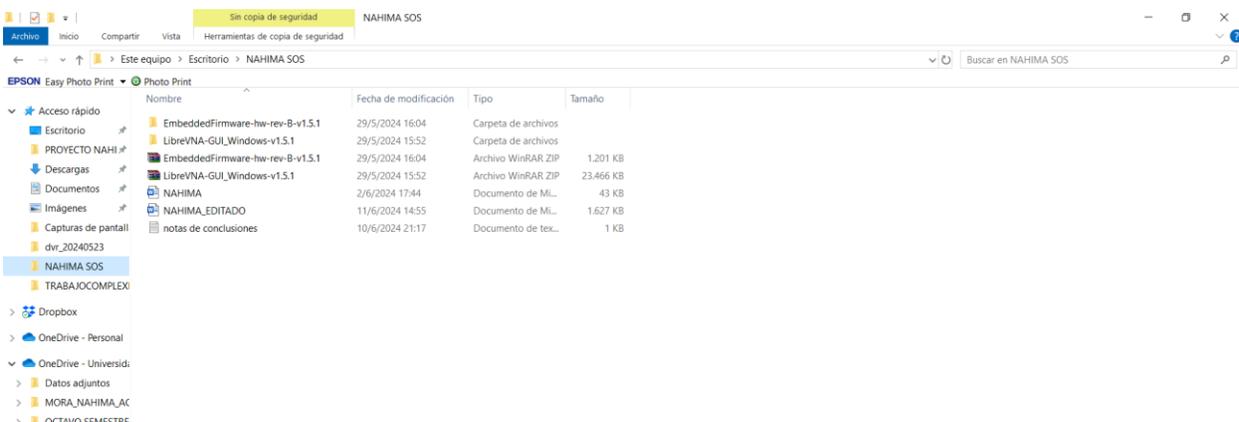


Ilustración 9 Descomprimir el archivo ZIP Fuente: Autor

Luego de descomprimir el archivo se busca en la carpeta con la denominación “LibreVNA-GUI_Windows-v1.5.1” el archivo ejecutable del software se lo selecciona con clic derecho “ejecutar” para abrir el software el cual muestra una interfaz detallada en la ilustración 10.

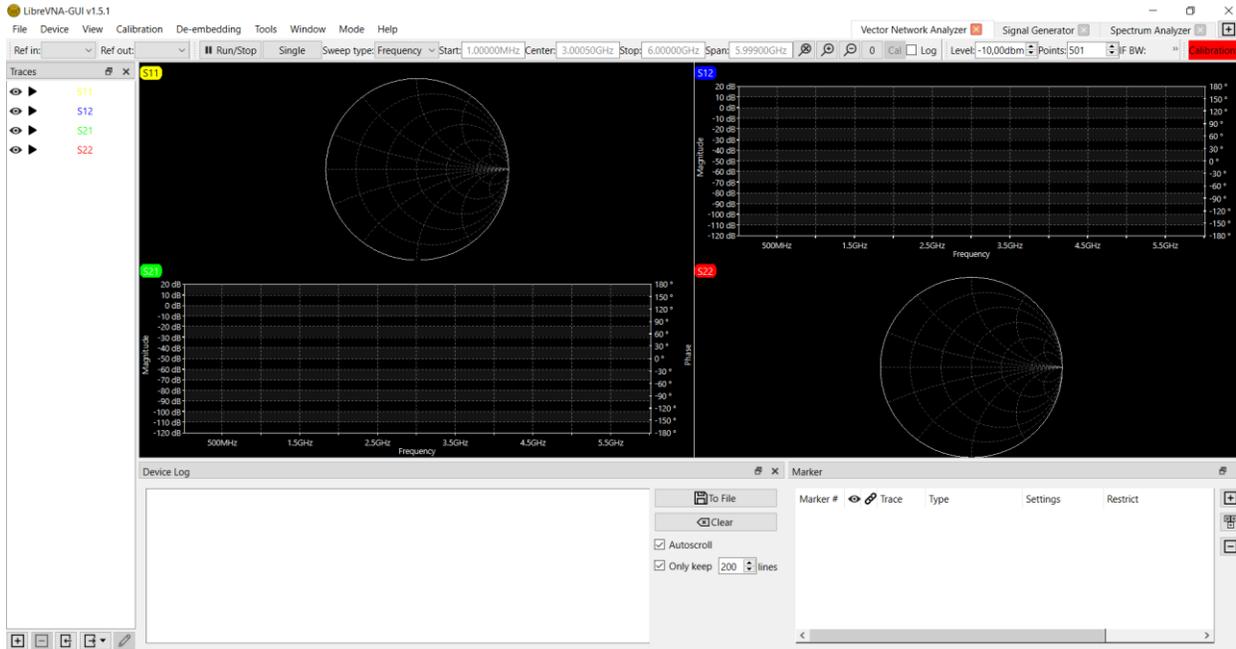


Ilustración 10 Interfaz del software Libre VNA Fuente: Autor

Una vez instalado el programa ya se puede conectar el VNA al PC como se observa en la Ilustración 11 y comenzar a utilizarlo, antes de crear archivos guardando la configuración es necesario calibrar el analizador vectorial para esto el método de calibración se lo detallará más adelante.

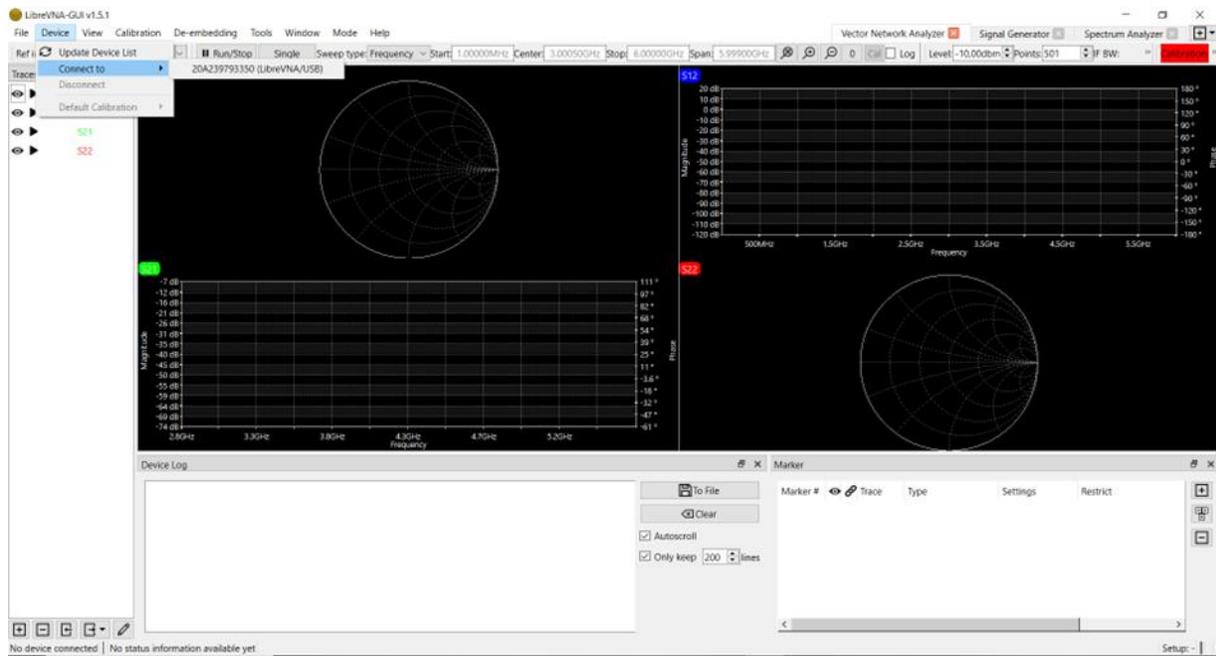


Ilustración 11 Selección del Puerto USB de la PC Fuente: Autor

1.3.3.2 Funcionalidades Principales:

El software LibreVNA es una herramienta eficiente utilizada en conjunto con analizadores de redes vectoriales (VNAs) como el NanoVNA. Este software proporciona varias funcionalidades clave que mejoran la capacidad de realizar mediciones de RF y análisis de datos.

Principales Funciones del software Libre VNA:

✓ Captura de Datos en tiempo real

Esta herramienta permite la captura de datos en tiempo real mientras se realizan las mediciones con el VNA debido a que facilita la observación inmediata de los cambios en el dispositivo. Los datos se analizan continuamente en la pantalla del software lo que proporciona una vista dinámica y en tiempo real, es útil y sencillo para su calibración.[15]

✓ Visualización de Gráficas de Parámetros S.

El software permite la representación gráfica de Smith en donde representa la impedancia y la admitancia de los parámetros S facilitando la visualización de cómo se comportan las frecuencias. Permite visualizar la magnitud de los parámetros S en una escala logarítmica por lo cual permite evaluar la atenuación y ganancia de componentes de RF, gráfica de fase muestra los parámetros S a través del rango de frecuencia es útil además para analizar la

respuesta de fase de filtros y amplificadores. Relación de Onda Estacionaria en función de la frecuencia, ayuda a determinar la calidad de la adaptación de impedancia en antenas y otros dispositivos RF.

✓ **Exportación de Datos para Análisis Posterior.**

Soporte para exportar datos en varios formatos, por lo cual los datos exportados pueden ser importados a otros programas de análisis y simulación, como Matlab, Excel y software de diseño de RF, permite un análisis más profundo y detallado de las mediciones realizadas. Posibilidad de exportar y guardar perfiles de calibración, lo que facilita la repetibilidad y la comparación de mediciones a lo largo del tiempo. [16]

✓ **Configuración y Calibración.**

Proporciona una interfaz guiada para realizar calibraciones precisas utilizando estándares Open, Short, Load y Thru por lo que facilita la configuración correcta del VNA para obtener mediciones precisas. Permite configurar y guardar perfiles de medición personalizados para diferentes tipos de aplicaciones específicas.

✓ **Análisis y Comparación de datos.**

Permite superponer múltiples gráficos de parámetros S para comparar diferentes mediciones, facilita la visualización de cambios y tendencias en el comportamiento de la frecuencia, el software da la posibilidad de agregar marcadores en las gráficas para resaltar puntos de interés específicos, permite realizar notas y comentarios a los datos medidos, mejorando la documentación y el análisis.

✓ **Interfaz de Usuario Intuitiva.**

La interfaz de usuario está diseñada para ser intuitiva y fácil de usar porque tiene menú y opciones organizados para facilitar el acceso a todas las funciones. El usuario puede personalizar la disposición de las gráficas y ventanas de los datos obtenidos según la preferencia del usuario.

1.4 Configuración del Laboratorio

1.4.1 Preparación del Área de Trabajo:

1.4.1.1 Disposición del Equipo:

Organizar el equipo de medición en el laboratorio de manera eficiente y segura es crucial para obtener resultados precisos a continuación se detallará consejos sobre cómo organizar el equipo de medición:

I. Seleccionar y preparar el área de trabajo.

Es necesario utilizar una mesa de trabajo amplio y estable que sea amplia y tenga espacio suficiente para el equipo de medición, el Demo Kit, los conectores, el kit de calibración y la Pc.

II. Disposición del Equipamiento Principal

Coloca el VNA en el centro de la mesa en la que vas a trabajar, asegurarse de que el VNA esté bien ventilado y no bloqueado por otros equipos. Conecta el generador de señales al VNA utilizando cables coaxiales y adaptadores adecuados.

III. Organización de Componentes y Accesorios

Coloca el kit demo en una caja organizadora cerca del VNA para un fácil acceso, etiqueta cada componente para una identificación rápida durante las mediciones, organiza los cables y adaptadores para evitar enredos y daños.

IV. Seguridad y Mantenimiento.

Verifica que todas las conexiones sean firmes y estén bien aseguradas para evitar conexiones sueltas que puedan causar errores en las mediciones, usa adaptadores y conectores de buena calidad para minimizar pérdidas de señal y asegurar una buena integridad de la señal, asegúrate que todos los equipos y componentes sean fácilmente accesibles, mantén una postura cómoda y segura para evitar lesiones.

V. Documentación y Registro

Mantén un registro detallado de la configuración y calibración de cada medición, incluyendo las conexiones de los equipos, documenta los resultados de cada medición de manera clara y organizada para así facilitar el análisis posterior.

VI. Etiquetado y Organización.

Esta opción es una recomendación, etiqueta los componentes y cables para una identificación rápida y precisa.

1.4.1.2 Condiciones Ambientales:

Realizar mediciones precisas de radiofrecuencia (RF) requiere un control cuidadoso del entorno para minimizar las variables que pueden afectar la precisión y la repetibilidad de las mediciones. Las siguientes condiciones son las ambientales óptimas para una adecuada medición:

1. Control de Temperatura.

Temperatura constante, mantener la temperatura constante en el laboratorio en un rango ideal, entre 20°C y 35°C ya que las variaciones de temperatura pueden afectar las características de los componentes y los equipos de medición, causando alteraciones en las mediciones, evitar fuentes de calor cercanas a los equipos de medición, permitir que los equipos de medición se calienten antes de usarlos, siguiendo las recomendaciones del fabricante para así alcanzar una temperatura de operación estable. [17]

2. Control de Humedad.

Mantener la humedad relativa del laboratorio entre el 30% y 50%, la humedad alta puede causar condensación en los equipos, es recomendable utilizar deshumidificadores en climas húmedos para reducir la humedad relativa.

3. Aislamiento de Fuentes de EMI (ElectroMagnetic Interference):

Mantener los dispositivos electrónicos que generen EMI (Interferencia Electromagnética), como motores eléctricos, transmisores de radio y microondas, todos estos dispositivos alejados de la zona de medición. Apagar dispositivos electrónicos no esenciales durante la medición. Minimizar la longitud de los cables y asegurarse de que estén correctamente conectados.

4. Reducción de Vibraciones.

Colocar el equipo de medición sobre mesas y superficies estables para evitar vibraciones que puedan afectar las lecturas. Utilizar almohadillas o plataformas de aislamiento para amortiguar las vibraciones provenientes del entorno.

5. Limpieza y Organización.

Mantener el área de trabajo limpia y ordenada para evitar la acumulación de polvo y suciedad que pueda afectar los equipos y conexiones, si al realizar la limpieza regular a los equipos usara productos adecuados que no dejen residuos conductores o abrasivos.

Mantén la temperatura y la humedad controladas para evitar variaciones que puedan afectar las mediciones de RF.

1.4.2 Conexión de los Dispositivos:

1.4.2.1 Conexión del NanoVNA al Filtro:

Primero antes de empezar hay que asegurarse de que el NanoVNA esté conectado a una fuente de alimentación, además es recomendable limpiar los conectores para evitar interferencias por suciedad o polvo. El NanoVNA tiene dos puertos “PORT1” y “PORT2”, el “PORT1” por lo general se lo usa como puerto de referencia o puerto de transmisión y el “PORT2” como puerto de recepción.

Para conectar el VNA principalmente se conecta al “PORT1” ya que esto es lo que permitirá medir la respuesta en frecuencia del filtro, si los conectores no coinciden se puede usar adaptadores de buena calidad para minimizar las pérdidas. Por último, pero no menos importante asegúrate que las conexiones sean firmes se puede usar una llave para ajustar los conectores en caso de ser necesario, pero se recomienda no apretar demasiado para evitar daños ya que los conectores UFL son demasiado delicados.

Una vez que los conectores están colocados en la posición correcta y está calibrado el VNA, configura el rango de frecuencia en el cual deseas trabajar según las especificaciones que el filtro te brinda, esto sirve para poder observar los parámetros S_{11} y S_{21} en la pantalla del software y así poder analizar el comportamiento del dispositivo a través del rango de frecuencia seleccionado.

Después de realizar la medición, verifica que las conexiones no se hayan aflojado y vuelve a medir para asegurar la precisión de los resultados para así poder utilizar los gráficos y los datos generados por NanoVNA para con los resultados obtenidos poder analizar las características que brinda el filtro.

A continuación, en la siguiente Ilustración 12 se detalla cómo debe estar conectado correctamente el VNA a la fuente de poder y al filtro a de medir respectivamente.

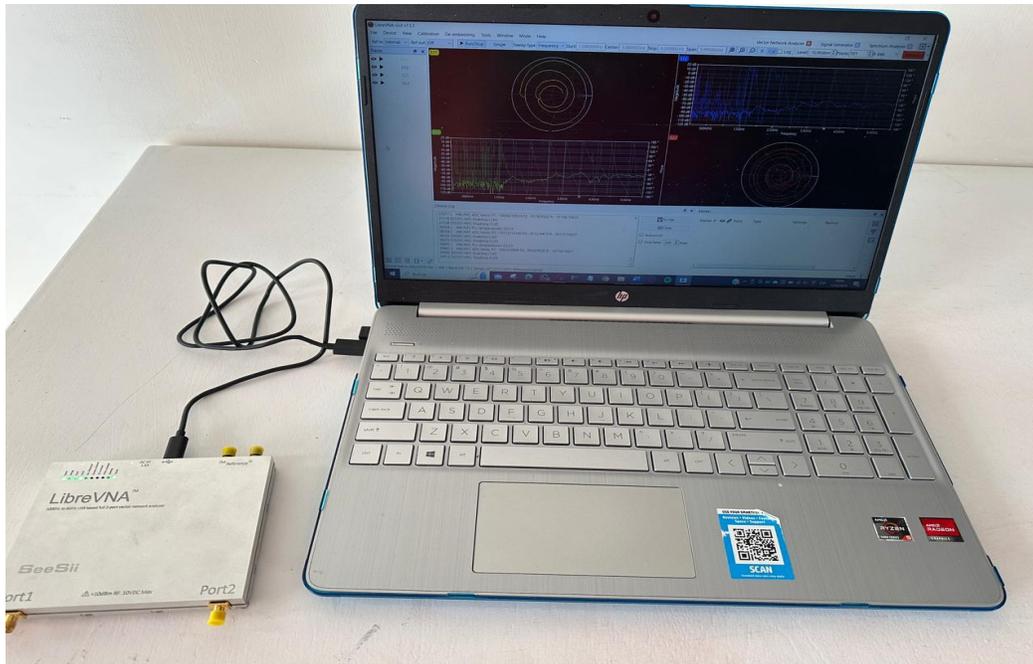


Ilustración 12 Conexión correcta del VNA a la Pc Fuente: Autor

1.4.2.2 Uso de Cables y Adaptadores:

Es recomendable utilizar cables RF con una impedancia de 50 ohmios, que es el estándar que se utiliza para la mayoría de los equipos de RF y obviamente se incluye el NanoVNA, como consejo es apropiado elegir cables de baja pérdida para minimizar la atenuación de la señal, recuerda mantener la longitud del cable lo más corta posible para reducir las pérdidas y la posibilidad de interferencias externas.

En el uso de los adaptadores asegúrate de que los conectores en los cables y los dispositivos a medir sean compatibles. Los conectores comunes incluyen SMA, BNC, N-Type y TNC. En este caso en particular se va a utilizar conectores RF Coaxial SMA y UFL como se puede observar en la Ilustración 13.

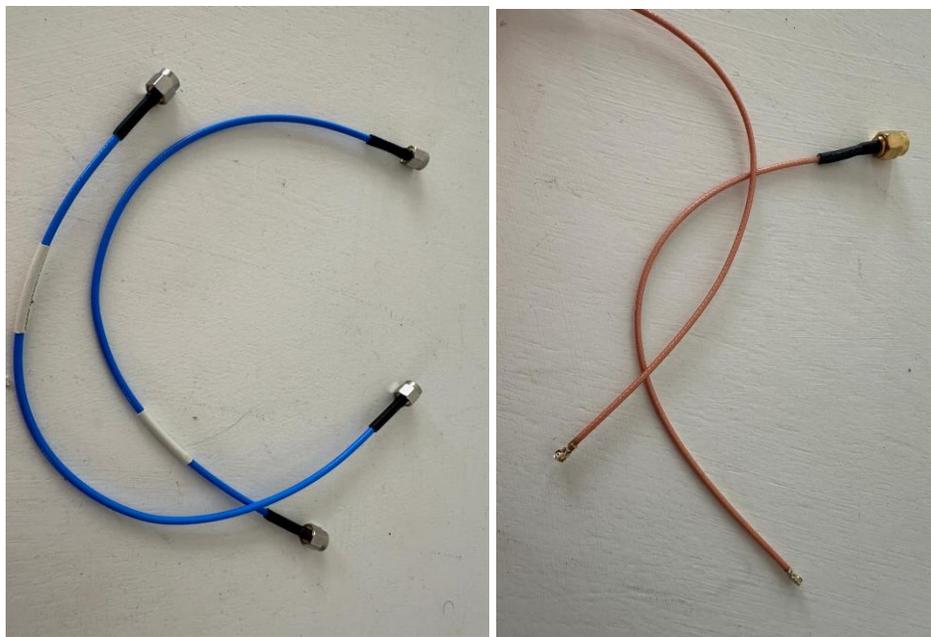


Ilustración 13 Conectores SMA y UFL respectivamente Fuente: Autor

1.5 Calibración del VNA

1.5.1 Importancia de la Calibración:

Antes de realizar cualquier medición, calibra el NanoVNA usando los estándares de calibración open, short, load en las frecuencias que se desea medir, esto es crucial para obtener mediciones precisas. Para lograr esta calibración es recomendable seguir las instrucciones del NanoVNA para realizar la calibración al “PORT1” y “PORT2” respectivamente y seguir los pasos que se muestran en la pantalla de calibración del software.

Los VNAs como cualquier otro equipo de medición están sujetos a errores ajenos al sistema, por lo cual la calibración ayuda a eliminar o minimizar estos errores, al ajustar el VNA se ajustan los parámetros S para reflejar con precisión que pueden distorsionar las mediciones ya que la calibración corrige estas pérdidas lo que permite mediciones más precisas, los adaptadores y cables pueden introducir desajustes de impedancias que afectan las mediciones por lo que la calibración ayuda a compensar estos desajustes. [18]

La calibración asegura que las mediciones se puedan repetir, es decir que se obtendrá los mismos resultados si se repite la medición al medir el mismo equipo varias veces bajo las mismas condiciones. Permite que el VNA sea preciso en un amplio rango de frecuencias esto es importante

en aplicaciones que involucran mediciones de alta frecuencia donde las pérdidas y desajustes son más evidentes. La calibración ayuda a mantener la estabilidad de las mediciones en todo el rango de la frecuencia de interés que se esté realizando la medición.

A continuación, en la siguiente imagen 14 se detalla la conexión del VNA con un filtro RLC en serie-paralelo, pero sin calibrar el VNA.

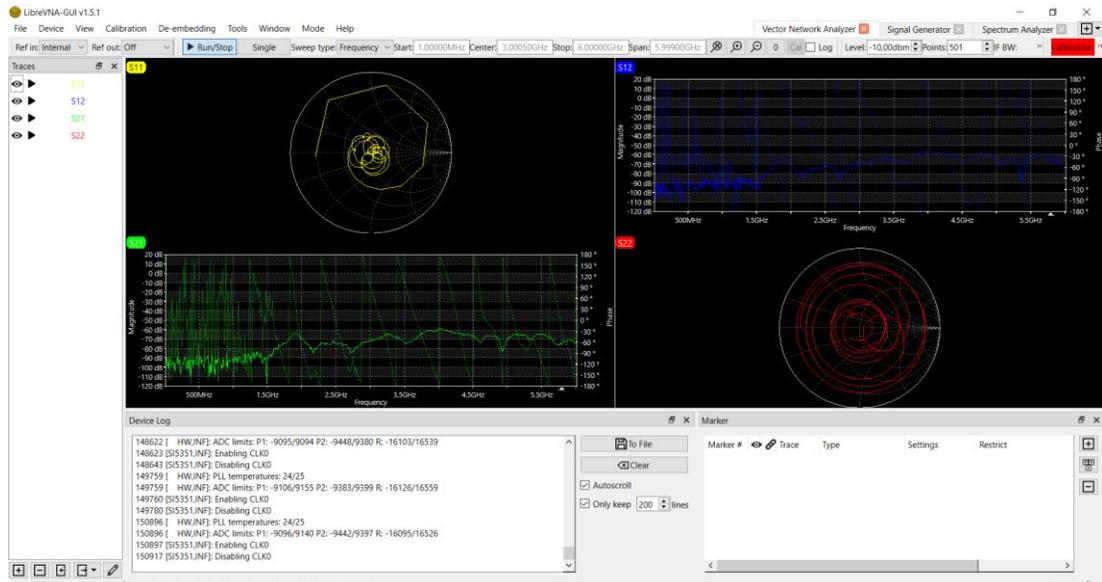


Ilustración 14 Resultados sin Calibración Fuente: Autor

La ilustración 15 detalla la conexión física entre el medidor de frecuencia (VNA), el filtro RLC en serie-paralelo y la PC que es muestra la interfaz del software.

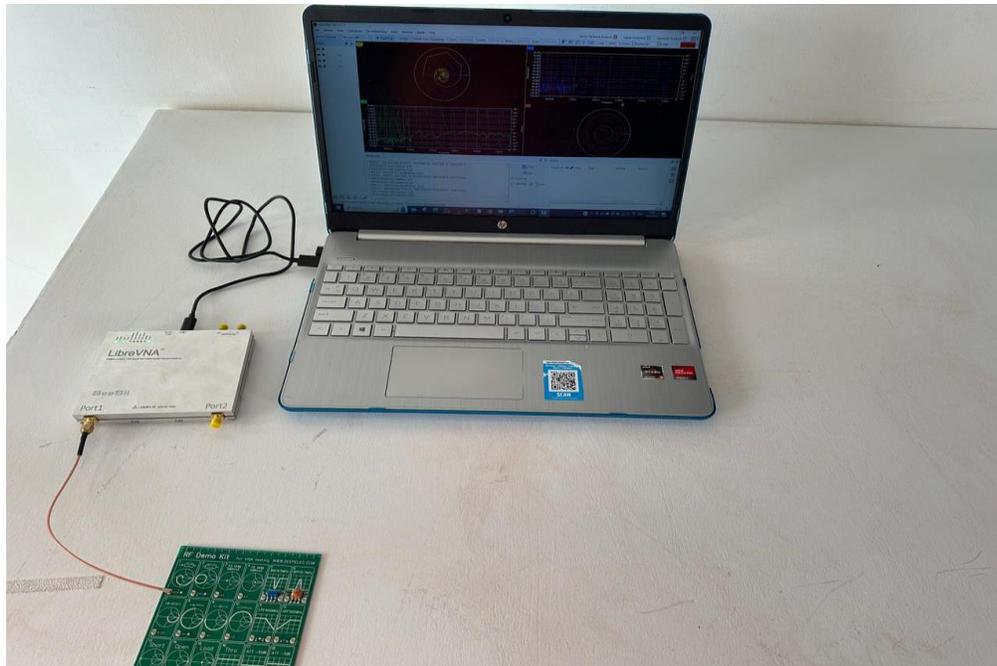


Ilustración 15 Conexión Física Fuente: Autor

1.5.2 Procedimiento de Calibración SOLT:

El procedimiento de calibración SOLT (Short, Open, Load, Thru) es un método estándar utilizado para calibrar un Analizador de Redes Vectorial (VNA). Este procedimiento corrige los errores sistemáticos del VNA y mejora la precisión de las mediciones. A continuación, se detalla el procedimiento de calibración SOLT paso a paso, utilizando el kit de calibración que se muestra en la Ilustración 16.

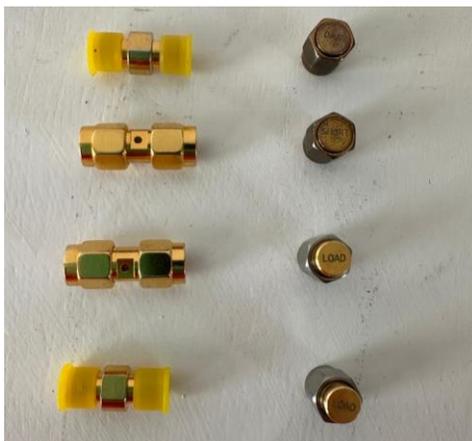


Ilustración 16 Kit De Calibración Fuente: Autor

- I. Enciende el VNA y permite que se establezca durante unos minutos para asegurar la precisión de las mediciones.

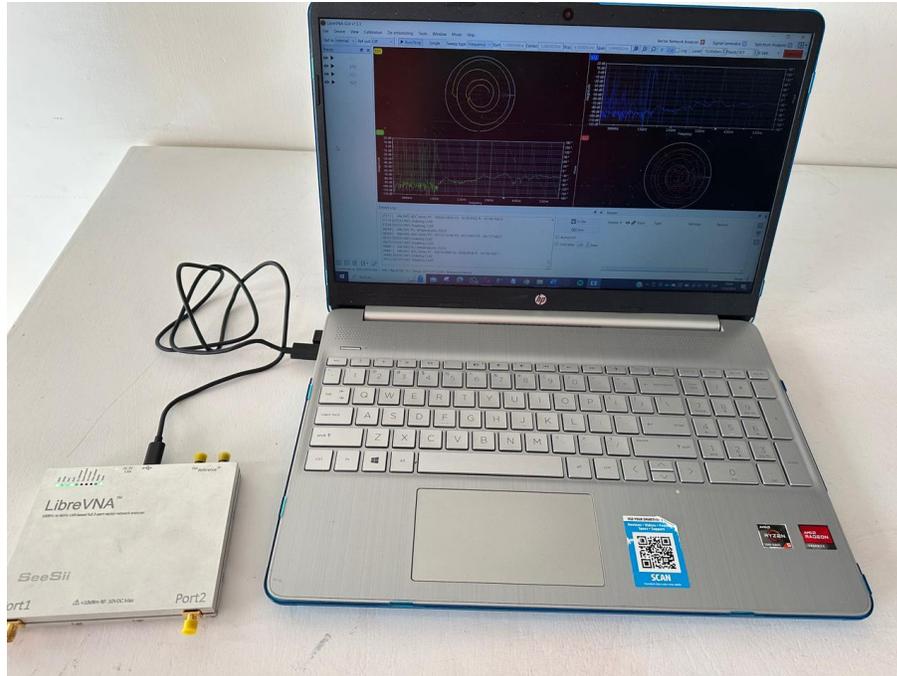


Ilustración 17 Encendido de VNA Fuente: Autor.

- II. En el menú del software VNA selecciona la opción calibración y luego “Calibration Measurements” para ingresar al kit de calibración que no tiene configuraciones añadidas en el software, tal como se ejemplifica en la ilustración 18.

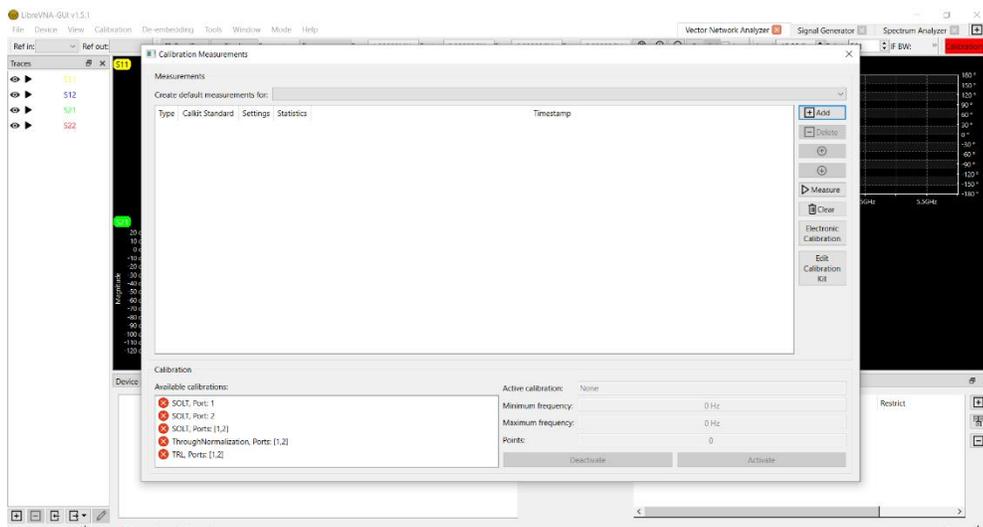


Ilustración 18 Ajustes de Calibración en el VNA Fuente: Autor

1.5.2.1 Estándar de Circuito Abierto (Open):

En el menú del software LibreVNA selecciona el tipo de calibración SOLT y se añade Open tanto para el “PORT1” como para el “PORT2”, luego en el equipo de medición en el puerto 1 se conecta el “OPEN” que vino incluido en el kit de calibración lo cual la conexión queda de la siguiente manera como se puede observar en la ilustración 19.

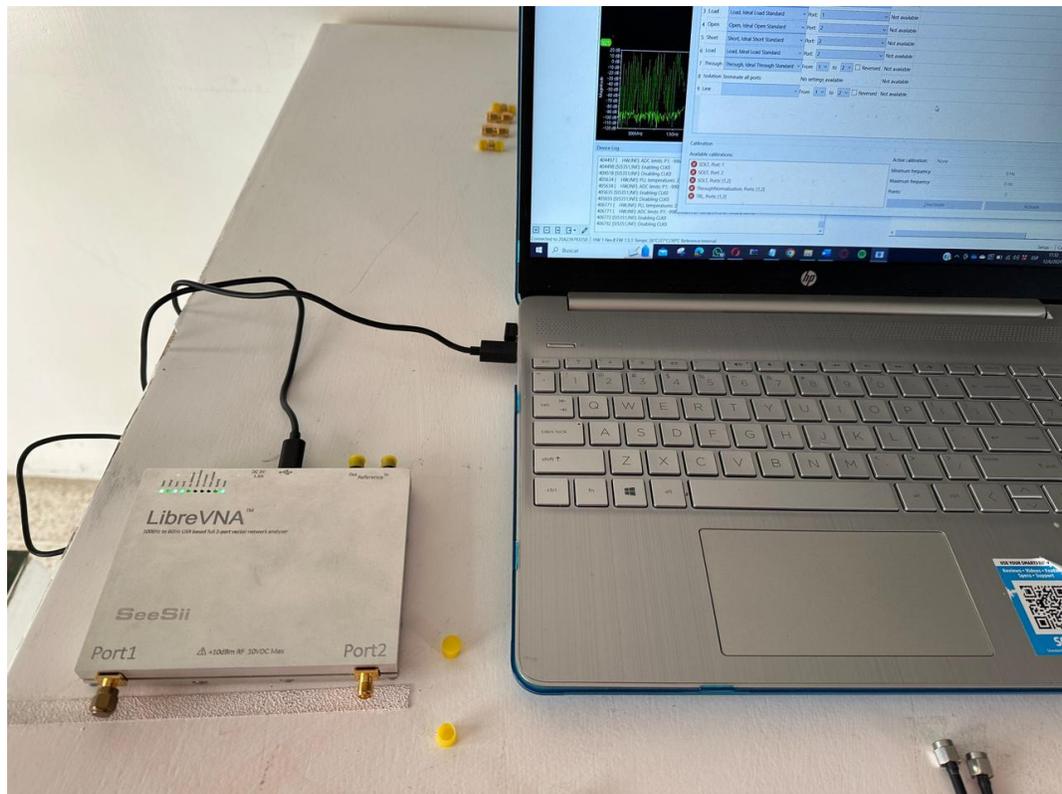


Ilustración 19 Conexión de circuito abierto en el Puerto 1 Fuente: Autor

Luego de conectar el circuito abierto al VNA se selecciona la opción en el software para después dar clic en el “Measure” y así recopilar las medidas que se requiere por lo cual los valores quedan como la siguiente imagen 20.

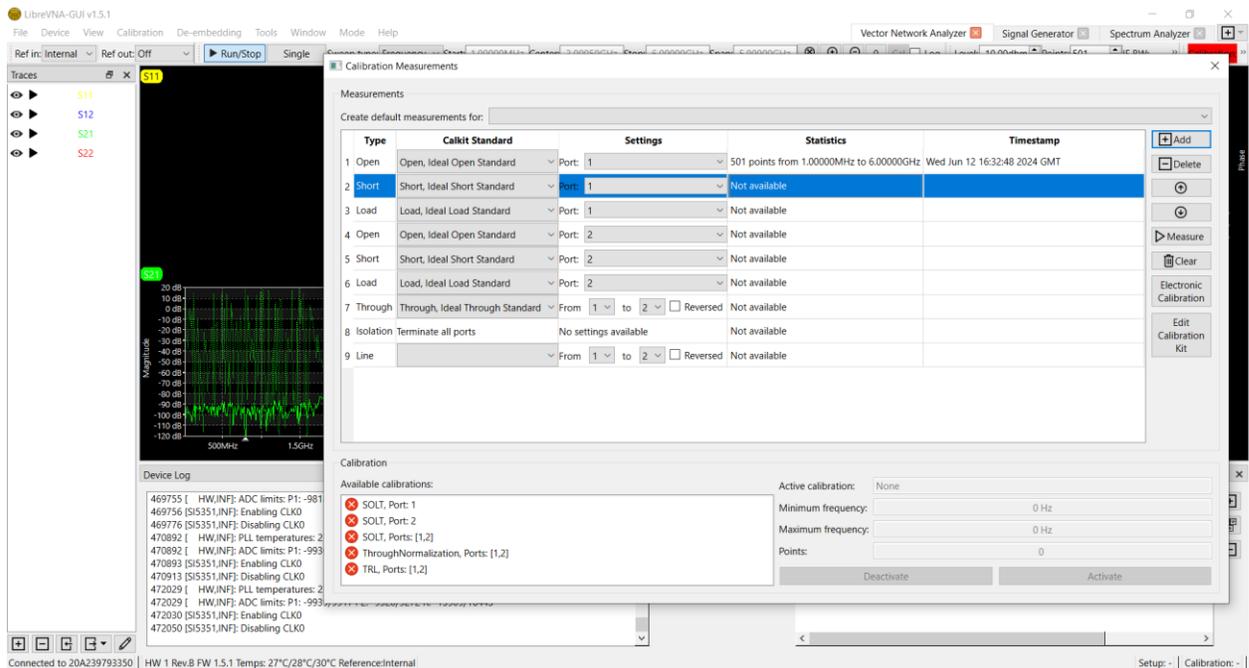


Ilustración 20 Medidas para el circuito abierto

○ **1.5.2.2 Estándar de Cortocircuito (Short):**

La calibración con el estándar de cortocircuito (short) en un VNA (Vector Network Analyzer) es un paso crucial para asegurar mediciones precisas.

Se conecta el SMA Macho-Corto al puerto correspondiente que se desea calibrar en este caso se comienza por el “PORT1” sin olvidar que el mismo procedimiento se hace para el siguiente puerto que se va a calibrar, en la ventana de calibración dentro de esta se elige “Short” y luego se da clic en “Measure” para guardar las medidas en la calibración al conectar el estándar este es típicamente una terminación que produce una impedancia de 0 ohmios, es decir un cortocircuito, un paso importante es asegurarse que la conexión sea firme y que el SMA este bien ajustado al puerto, la configuración de queda medido en el VNA es la siguiente que se ejemplifica en la ilustración 21.

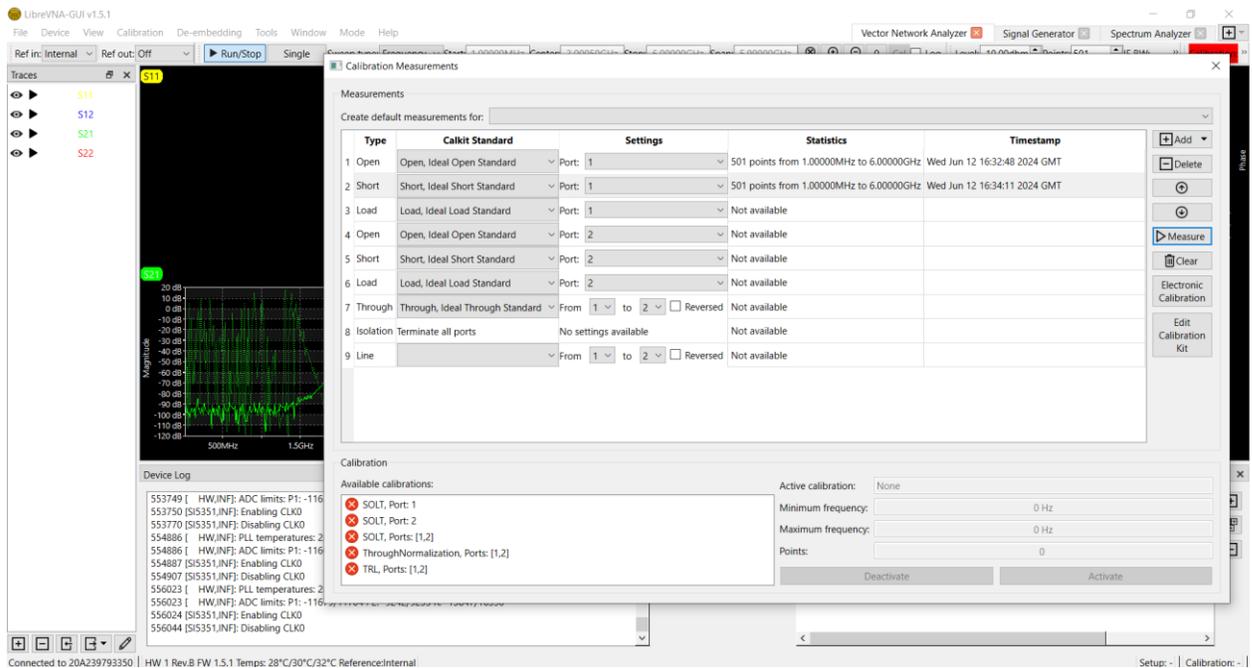


Ilustración 21 Calibración Puerto 1 Corto Fuente: Autor

o 1.5.2.3 Estándar de Carga (Load):

La calibración con el estándar de Carga en el VNA se realiza de la misma manera que se realizó en los pasos anteriores de conectar el SMA, pero en este caso es de carga de 50 ohms en el puerto 1 que se está calibrando las medidas quedan de la siguiente manera como se muestra en la imagen 22.

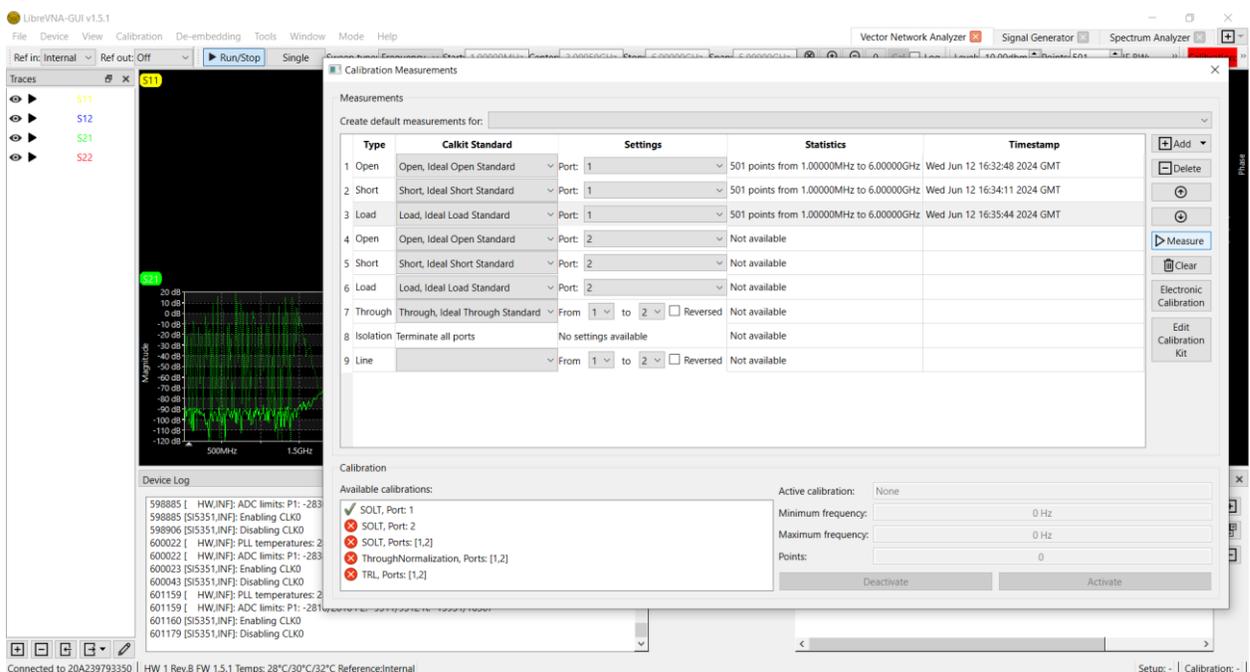


Ilustración 22 Calibración de Carga Fuente: Autor.

○ **1.5.2.4 Conexión de Paso Directo (Thru):**

Para la calibración de paso directo se da una manera más peculiar ya que entran en función el conector doble SMA-Hembra con los dos cables de línea estándar la conexión se especifica de la siguiente manera en la imagen 23.

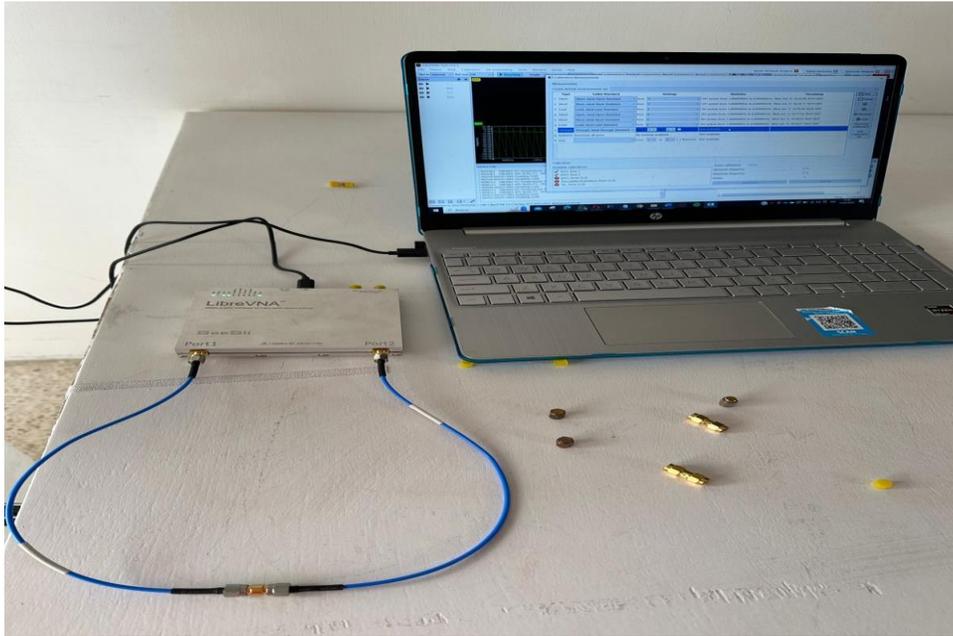


Ilustración 23 Conexión correcta para calibración THRU Fuente: Autor

Una vez conectado la calibración a los dos puertos del VNA y luego de repetir los pasos que se realizó para el puerto 1 en el puerto 2 la tabla de referencia del kit de calibración queda de la siguiente manera cabe recalcar que se debe calibrar para la frecuencia de trabajo que se necesita medir entonces, la siguiente tabla de calibración la podemos guardar para no estar calibrando de nuevo en la ilustración 24 se muestra las medidas guardadas.

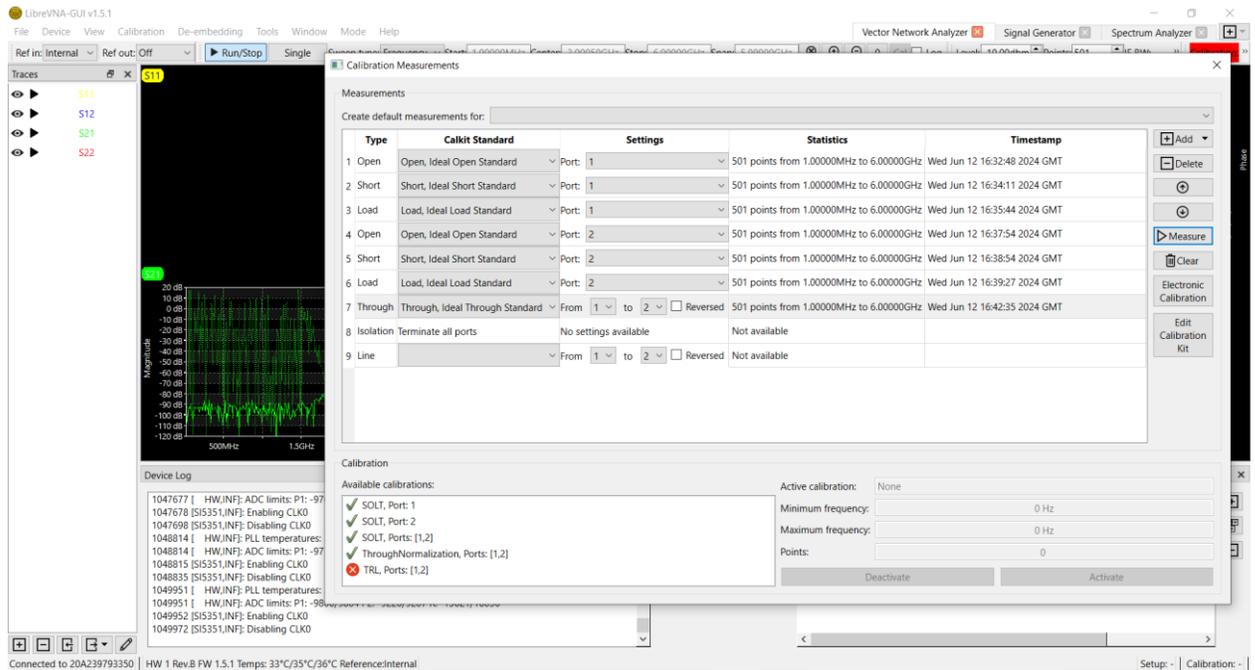


Ilustración 24 Ventana de Calibración Fuente: Autor

1.5.3 Verificación de la Calibración:

1.5.3.1 Pruebas Iniciales de Medición:

Realizar pruebas iniciales de medición para verificar la exactitud de la calibración realizada.

1.5.3.2 Ajustes y Correcciones:

Para realizar ajustes y correcciones de calibración es esencial para mantener la precisión de las mediciones con el VNA, a continuación, se detallará una serie de pasos en el cual se podrá identificar y solucionar los problemas que son comunes para poder así asegurar las mediciones confiables y precisas.

- I. Preparación. - Hay que asegurarse que el VNA esté encendido y que haya pasado el tiempo suficiente para poder estabilizarse, además de conectar el dispositivo de calibración en este caso el SMA-Hembra al puerto que se está calibrando.
- II. Acceso al Menú. – Una vez que este seleccionado el puerto de VNA ya en la PC se navega hasta la sección de calibración, selecciona el tipo de calibración que se va a

incluir en este caso el tipo de calibración es SOLT (Short, Open, Load, Thru) y en ese orden se conectan los estándares de calibración en cada puerto deseado a calibrar.

III. Guarda los datos de Calibración. - Una vez que la medición se realizó adecuadamente es necesario guardar los datos de calibración el software ayuda con esta opción de guardar lo que es muy útil ya que después de reiniciar el programa no será necesario repetir este procedimiento salvo el caso de que se necesite trabajar con otra frecuencia.

IV. Verificación de calibración. – Luego de guardar la calibración es bueno verificarla, esto se puede hacer conectando de nuevo el estándar que se utilizó para calibrar el cortocircuito, se conecta nuevamente y se observa si el VNA muestra los resultados esperados que como bien se sabe un corto es 0 ohmios.

1.6 Procedimiento de Medición de Parámetros S

1.6.1 Selección del Rango de Frecuencia:

Para poder explicar cómo seleccionar el rango de frecuencia adecuado en el VNA para las mediciones específicas de cada componente, primero se debe identificar las especificaciones del componente que se va a medir esto debe incluir la frecuencia de operación, ancho de banda, frecuencias de corte y la banda de paso del filtro además el objetivo de medición influirá en la selección del rango de frecuencia.

Luego de iniciar el VNA se debe de especificar las frecuencias de inicio y final basándose en las especificaciones de cada componente, por ejemplo, para un filtro que trabaje en un rango de frecuencia entre 1GHz y 3GHz es recomendable que seleccionar un rango de frecuencia de 0.5 GHz a 3.5GHz para poder capturar los bordes de la banda de paso y poder observar las características fuera de banda.

Es importante seleccionar el número de puntos de frecuencia para medir dentro de este rango porque mientras más puntos se proporciona equivale a una mayor resolución, pero la única desventaja es que mientras más puntos se demora más la medición. Una configuración típica puede ser de 201,401 o 801 puntos dependiendo de la precisión requerida. Evita frecuencias espurias debes asegurarte de que el rango seleccionado no incluya interferencias conocidas, ajusta el ancho

de banda de medición para optimizar la relación señal-ruido ya que un ancho de banda estrecho proporciona una mejor resolución aumentando el tiempo de barrido.

1.6.2 Medición de Componentes Pasivos:

1.6.2.1 Filtros Pasa-Bajas:

Medir y analizar los parámetros S11 y S21 de filtros pasa-bajas utilizando un Vector Network Analyzer (VNA) implica una serie de pasos detallados para asegurar mediciones precisas. A continuación, los pasos para medir y analizar el filtro son básicamente casi los mismos que se requiere para cualquier medición que se necesite.

- ✓ Preparación del VNA y del filtro hay que asegurarse que tanto el filtro como los conectores estén limpios y en buen estado.
- ✓ Para todo tipo de medición es muy importante realizar una calibración del VNA en el rango de frecuencia que cubrirá tanto la banda de paso como la de rechazo del filtro es importante de utilizar los estándares de calibración SOLT para asegurar precisión y no olvidar que guardar los datos de calibración.
- ✓ Selecciona un rango de frecuencia que incluya frecuencias por debajo y encima de la frecuencia de corte del filtro.
- ✓ Conexión del filtro al VNA. - se conecta el puerto de entrada del filtro al puerto de salida del VNA (“PORT1”). Conecta el puerto de salida del filtro al puerto de entrada del VNA (“PORT2”).
- ✓ Medición del Parámetro S11 este parámetro representa la cantidad de señal reflejada de vuelta al puerto de entrada del filtro, se mide en dB y un valor cercano a 0dB indica una mala adaptación, mientras que un valor negativo indica buena adaptación.
- ✓ Medición del Parámetro S21, representa la cantidad de señal transmitida a través del filtro desde el puerto de entrada al puerto de salida S21 se mide en db y un valor cercano a 0 dB indica una alta transmisión, mientras que un valor negativo indica una pérdida.
- ✓ Al analizar los resultados observa que la gráfica S11 en la banda de paso, S11 debe ser lo más negativo posible esto es lo que indica que tiene una buena adaptación y reflexión. En la banda de rechazo, S11 puede variar dependiendo del diseño del filtro.

- ✓ En la gráfica de transmisión se debe observar que, en la banda de paso, el S_{21} debe ser cercano a 0 dB indicando que la señal pasa sin mucha atenuación y en la banda de rechazo debe ser lo más negativo posible, indicando que la señal es atenuada por el filtro.

1.6.2.2 Filtros Pasa-Altas:

Para medir y analizar los parámetros S en de un filtro básicamente los pasos son los mismos de los que se utiliza para medir circuitos, filtros, antenas, atenuadores entre otros lo que podría cambiar es el proceso de las gráficas y la interpretación de los resultados por eso los pasos a seguir se resumen en:

- ✓ Encender y estabilizar el VNA, asegurarse que el filtro este limpio y que sus conectores en buen estado.
- ✓ Realizar una calibración completa del VNA según el rango de frecuencia que cubra la banda de paso y la de rechazo del filtro utilizando lo estándares SOLT y muy importante no olvidar guardar la calibración.
- ✓ Conexión del filtro es la misma en todas conectar el puerto de entrada del filtro al de salida del VNA y conectar el puerto de salida del filtro a la entrada del VNA.
- ✓ En la banda de rechazo, S_{11} puede variar dependiendo del diseño del filtro, pero generalmente se espera que sea menos negativo. En la banda de paso, S_{21} debe ser cercano a 0 dB, indicando que la señal pasa sin mucha atenuación. Si los resultados no son los esperados, verifica las conexiones y calibración del VNA.

1.6.2.3 Filtros Pasa-Banda:

Los parámetros de dispersión ayudan a caracterizar el comportamiento de un dispositivo de radiofrecuencia, como un filtro pasa-banda por cual el parámetro S_{11} y S_{21} proporcionan información sobre la reflexión y transmisión de la señal a través del filtro, por lo que conlleva los siguientes pasos:

- ✓ Conectar el filtro pasa-banda a los puertos correspondientes del VNA empleando cables coaxiales, seleccionar el rango de frecuencias de interés que abarca la banda de paso del filtro, ajustar la resolución de frecuencia y el número de puntos de muestreo para obtener la precisión deseada. Calibrar el VNA con los estándares de calibración apropiados para evitar errores.

- ✓ Observar la curva de magnitud de S11 para identificar la frecuencia de corte inferior en donde la reflexión comienza a aumentar significativamente, dentro de la banda pasante el valor ideal es 0 dB indicando máxima transmisión, en las bandas de rechazo S21 debería presentar valores bajos.

1.6.2.4 Atenuadores:

Medir y analizar los parámetros S11 y S21 de atenuadores utilizando un Vector Network Analyzer (VNA) es esencial para evaluar su desempeño en términos de reflexión y transmisión de señales.

- ✓ Preparar el VNA y el atenuador encender el VNA y dejar que se estabilice así mismo asegurarse que el atenuador este limpio y con los conectores en buen estado.
- ✓ Realiza la calibración completa del VNA en el rango de frecuencias que se desea medir, sin olvidar que es importante utilizar los estándares de calibración SOLT y guardar la calibración.
- ✓ Conecta el puerto de entrada al puerto de salida del VNA y luego conecta el puerto de salida del atenuador al puerto de entrada del VNA, selecciona los parámetros S11 en el VNA ya que este parámetro de dispersión representa la cantidad de señal reflejada de vuelta al puerto de entrada del atenuador, en cambio el parámetro S21 representa la cantidad de señal transmitida se mide en dB y el valor esperado será negativo lo que indica la atenuación, por ejemplo un atenuador de 20 dB debería mostrar -20dB aproximadamente en el parámetro S21.

1.6.2.5 Antenas:

Los parámetros S11 y S21 de antenas utilizando un Vector Network Analyzer (VNA) es crucial para evaluar la eficiencia de radiación y la adaptación de impedancia de la antena, por lo cual hay que tener más precaución al medir los parámetros de dispersión de una antena.

- ✓ Encender el VNA y dejar que se estabilice, no olvidar de asegurarse que la antena este limpia y los conectores en buen estado, coloca la antena en un entorno libre de obstrucciones para evitar reflexiones y ruido externo.
- ✓ Realizar una calibración del VNA según las frecuencias y estándares a trabajar para asegurar una precisión sin dejar de guardar los datos de calibración, selecciona un rango de frecuencia de interés que abarca la banda de operación de la antena

- ✓ Configurar el VNA para medir S_{11} lo que sería excitar el puerto 1 y medir la señal reflejada en el puerto, el mismo procedimiento se realiza para el puerto 2 obteniendo magnitud y fase que sería la representación de transmisión entre los puertos.
- ✓ La magnitud S_{21} cercano a 0dB en la banda de operación de la antena indica una buena eficiencia de radiación esta magnitud también representa la potencia radiada por la antena en la dirección de máxima radiación.
- ✓ La fase S_{11} y S_{21} es útil para analizar fenómenos como el retardo y la reactancia de la antena, la precisión de las mediciones depende eso si de la calibración del VNA si el valor es cercano a 0dB indica una alta reflexión es decir una mala adaptación, en la banda de operación de la antena debe ser lo más negativo posible ya que indicara una buena adaptación y baja reflexión el buen valor típico de S_{11} para antenas es menor a -10dB en la banda de operación.

1.6 Conclusiones del Capítulo

- El objetivo de configurar y calibrar correctamente el VNA libre ha sido alcanzado exitosamente. La correcta configuración y calibración del VNA es fundamental para asegurar la precisión y fiabilidad de las mediciones. A través de este proceso, los estudiantes han aprendido a utilizar estándares de calibración (Open, Short, Load, Thru) para eliminar errores sistemáticos y obtener datos de alta precisión.
- La precisión de las mediciones de los parámetros \underline{S} es crucial para el diseño, análisis y optimización de sistemas de RF.
- El análisis e interpretación de los datos obtenidos ha permitido a los estudiantes evaluar de manera efectiva el rendimiento de los componentes de RF.

1.6.1 Resumen de la Implementación:

El software LibreVNA proporciona una amplia gama de funcionalidades que mejoran significativamente la capacidad de realizar mediciones de RF y analizar datos. Desde la captura de datos en tiempo real hasta la visualización avanzada de gráficos y la exportación de datos para análisis posterior, LibreVNA es una herramienta esencial para ingenieros, técnicos y estudiantes que trabajan en el campo de la radiofrecuencia.

Organizar adecuadamente el equipo de medición en el laboratorio es esencial para asegurar un entorno de trabajo eficiente y seguro. Siguiendo estas instrucciones, se puede maximizar la precisión de las mediciones, minimizar el riesgo de daños a los equipos y componentes, y mantener un entorno de trabajo seguro y productivo.

1.6.2 Logros y Resultados Obtenidos:

- Durante la implementación del Vector Network Analyzer (VNA) en el análisis de filtros, se alcanzaron varios logros significativos y se obtuvieron resultados importantes que destacan el éxito del proceso.
- Se logró una calibración precisa del VNA utilizando estándares de calibración (Open, Short, Load, Thru) lo que garantizó la exactitud de las mediciones realizadas. La calibración correcta permitió reducir significativamente los errores sistemáticos, mejorando la fiabilidad de los datos obtenidos.
- Se documentaron detalladamente todos los procedimientos de calibración, medición y análisis, facilitando la replicabilidad del proceso.

1.6.3 Perspectivas para Trabajos Futuros:

- Las mejoras y las futuras líneas de investigación basadas en el trabajo realizado con el VNA y la calibración tienen el potencial de avanzar significativamente en la precisión y eficiencia de las mediciones de RF. Al automatizar procesos, mejorar la resolución, estudiar efectos ambientales y expandir el rango de aplicaciones, se pueden lograr avances importantes que beneficiarán a múltiples industrias y campos de investigación.
- Para trabajos a futuro sería muy útil crear o mejorar software que automatice el proceso de calibración y medición del VNA, reduciendo el tiempo de configuración y minimizando errores humanos, además integrar el VNA con sistemas de control automatizados que ajusten dinámicamente los parámetros de medición en función de los resultados obtenidos en tiempo real.

CAPÍTULO II

2.1 Aplicación de Filtros del Kit de Demostración de RF

2.1.1 Objetivo del Capítulo:

- Proporcionar una guía completa para la medición y análisis de filtros de RF utilizando el NanoVNA y el Kit de Demostración de RF.
- Explicar cómo analizar las gráficas de S11 y S21 para evaluar la efectividad de los filtros en diversas aplicaciones de RF.
- Guiar al estudiante a través del proceso de conexión de los filtros al NanoVNA y la obtención de datos de medición.

2.1.2 Importancia de los Filtros en Sistemas de RF:

- Los filtros en sistemas de radiofrecuencia (RF) juegan un papel crucial en la selección de señales y la supresión de interferencias. Los filtros RF permiten la selección de señales específicas dentro de un rango de frecuencias, bloqueando las frecuencias no deseadas, en sistemas de comunicación, es esencial separar las señales útiles de las interferencias y el ruido.
- En un entorno de RF, las interferencias pueden provenir de diversas fuentes, como otras transmisiones, dispositivos electrónicos y ruido ambiental. Los filtros permiten que el sistema se enfoque únicamente en las señales deseadas, mejorando la calidad de la comunicación y reduciendo el riesgo de errores de transmisión.

2.1.3 Descripción de los Filtros Utilizados:

En este capítulo se medirán y analizarán los siguientes tipos de filtros de RF: pasa-bajas, pasa-altas, pasa-banda y rechaza-banda. Cada tipo de filtro tiene una función específica en el manejo de señales de radiofrecuencia.

Filtros Pasa-Bajas: Los filtros pasa-bajas permiten el paso de señales con frecuencias por debajo de una frecuencia de corte específica y atenúan las señales con frecuencias por encima de esa frecuencia. Son utilizados para eliminar componentes de alta frecuencia no deseados y ruido, dejando pasar solo las señales de baja frecuencia. Comúnmente se

encuentran en sistemas de audio y comunicación para suavizar señales y eliminar interferencias de alta frecuencia.

Filtros Pasa-Altas: Los filtros pasa-altas permiten el paso de señales con frecuencias por encima de una frecuencia de corte específica y atenúan las señales con frecuencias por debajo de esa frecuencia. Se emplean para eliminar componentes de baja frecuencia, incluyendo ruido de baja frecuencia y señales no deseadas. Son esenciales en sistemas de comunicación y procesamiento de señales para limpiar el espectro de señales de baja frecuencia.

Filtros Pasa-Banda: Los filtros pasa-banda permiten el paso de señales dentro de un rango específico de frecuencias y atenúan las señales fuera de ese rango. Son utilizados en aplicaciones donde es necesario aislar una banda de frecuencia específica. Esto incluye receptores de radio y televisión, donde se necesita seleccionar una estación particular sin interferencia de otras estaciones.

Filtros Rechaza-Banda: Los filtros rechaza-banda atenúan señales dentro de un rango específico de frecuencias y permiten el paso de señales fuera de ese rango. Se utilizan para eliminar señales no deseadas o interferencias en un rango estrecho de frecuencias, mientras permiten el paso del resto del espectro. Son útiles en sistemas de audio y comunicación para eliminar interferencias específicas como ruido de línea eléctrica o señales interferentes específicas.

2.2 Procedimiento Experimental

2.2.1 Configuración del Sistema de Medición:

Para realizar mediciones precisas de los filtros de RF utilizando el NanoVNA y el Kit de Demostración de RF, sigue estos pasos detallados para la configuración y el proceso de medición:

- ✓ Preparación del Equipamiento: asegúrate que el nano VNA esté conectado a una fuente de alimentación estable en el caso del kit de demostración de Rf se debe revisar que todos los componentes del kit estén en buen estado tanto la placa como los conectores.

- ✓ Calibración del VNA: no olvidar los estándares de calibración proporcionados por el NanoVNA con el SOLT (Open, Short, Load, Thru) sin olvidar de guardar la calibración para usarla posteriormente.
- ✓ Configuración del rango de Frecuencia: este paso es muy importante ya que va a definir el resultado de las gráficas y depende también del tipo según sus especificaciones.
- ✓ Conexión del filtro al NanoVNA hay que tener en cuenta que siempre que se conecta el puerto de entrada del filtro al puerto de salida del NanoVNA y asegúrate que todas las conexiones estén firmes y bien ajustadas para evitar pérdidas adicionales o mediciones inexactas.

2.2.1.1 Selección del Rango de Frecuencia:

La correcta selección del rango de frecuencia es esencial para obtener mediciones precisas y útiles con el NanoVNA, basándose en las especificaciones nominales de cada tipo de filtro, es importante configurar un rango que cubra tanto las bandas de paso como las de rechazo, permitiendo una evaluación completa del desempeño del filtro.

En el demo kit cada filtro o circuito viene con las frecuencias de inicio, central y final el cual se debe modificar en el VNA, por ejemplo, si el filtro Pasa-bajas es de 1 GHz es recomendable que la frecuencia de inicio sea de 500 MHz y la final de 2GHz.

2.2.1.2 Conexión de los Filtros al NanoVNA:

Proveer instrucciones detalladas sobre cómo conectar cada filtro al NanoVNA utilizando cables y adaptadores adecuados, no hay que olvidar que hay que revisar que las conexiones sean seguras y de baja pérdida.

2.2.1.3 Calibración del Sistema:

El procedimiento de calibración del NanoVNA antes de realizar las mediciones es importante para obtener mediciones precisas y los materiales necesarios son:

- A. NanoVNA.
- B. Kit de Demostración de RF con filtros.

- C. Cables Coaxiales de Baja Pérdida, preferiblemente con conectores SMA.
- D. Adaptadores SMA-F/SMA-M.
- E. Conectores de Calibración (Open, Short, Load, Thru).

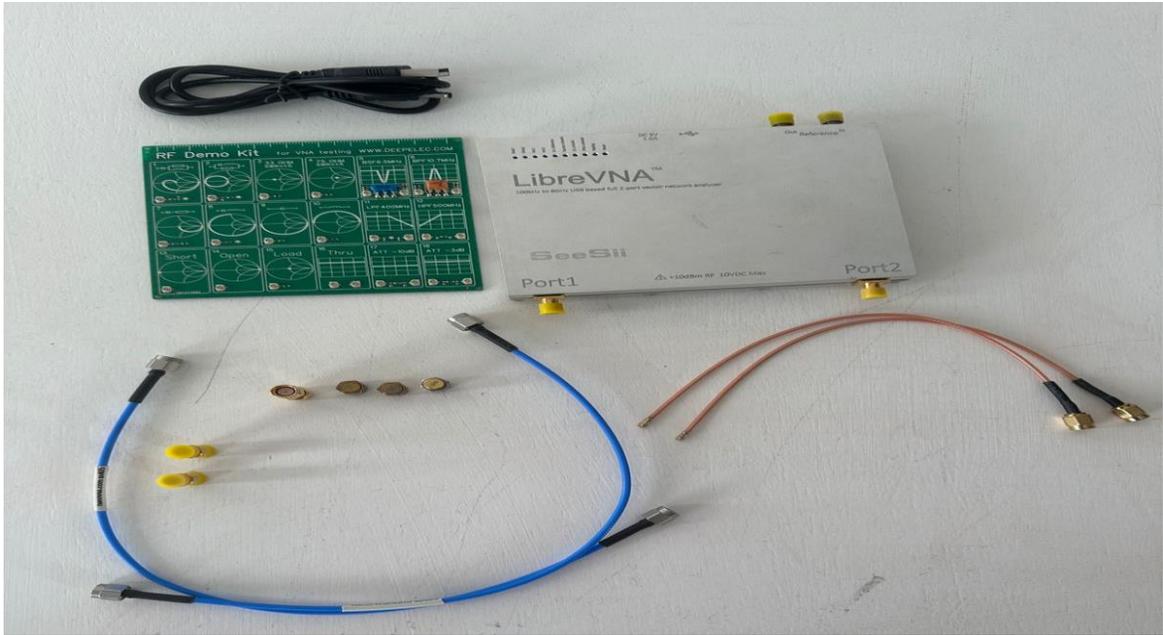


Ilustración 25 Kit de Calibración Fuente: Autor.

2.3 Medición y Análisis de Filtros Pasa-Bajas

2.3.1 Descripción del Filtro Pasa-Bajas:

Un filtro pasa-bajas es un tipo de filtro que permite el paso de señales con frecuencias por debajo de una frecuencia de corte específica y atenúa las señales con frecuencias por encima de esa frecuencia. Este comportamiento se debe a la respuesta en frecuencia del filtro, que está diseñada para dejar pasar señales de baja frecuencia mientras reduce la amplitud de las señales de alta frecuencia.

Los filtros pasa-bajas se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones prácticas debido a su capacidad para eliminar señales no deseadas de alta frecuencia y ruido.

Aplicación: En sistemas de audio, los filtros pasa-bajas se utilizan para eliminar el ruido de alta frecuencia que puede afectar la calidad del sonido.

Ejemplo: Un altavoz puede incorporar un filtro pasa-bajas para asegurar que solo las frecuencias audibles y adecuadas lleguen al oído humano, eliminando ruidos no deseados y mejorando la calidad del sonido.

2.4 Medición y Análisis de Filtros Pasa-Altas

2.4.1 Descripción del Filtro Pasa-Altas:

Un filtro pasa-altas es un tipo de filtro que permite el paso de señales con frecuencias por encima de una frecuencia de corte específica y atenúa las señales con frecuencias por debajo de esa frecuencia. Este comportamiento se debe a la respuesta en frecuencia del filtro, que está diseñada para dejar pasar señales de alta frecuencia mientras reduce la amplitud de las señales de baja frecuencia. [19]

Los filtros pasa-altas se utilizan en una variedad de aplicaciones prácticas debido a su capacidad para eliminar señales no deseadas de baja frecuencia y ruido.

Aplicación: En sistemas de comunicación, los filtros pasa-altas se utilizan para eliminar el ruido de baja frecuencia y las interferencias, permitiendo que solo las señales de alta frecuencia necesarias pasen a través del sistema.

Ejemplo: En un transmisor de radio, un filtro pasa-altas puede eliminar las componentes de baja frecuencia no deseadas que podrían interferir con otras señales de radio, mejorando así la calidad de la transmisión.

2.5 Medición y Análisis de Filtros Pasa-Banda

2.5.1 Descripción del Filtro Pasa-Banda:

Un filtro pasa-banda es un tipo de filtro que permite el paso de señales dentro de un rango específico de frecuencias, conocido como la banda de paso, y atenúa las señales fuera de ese rango, en las bandas de rechazo superior e inferior. Este comportamiento se debe a la respuesta en frecuencia del filtro, que está diseñada para seleccionar un rango estrecho de frecuencias y bloquear las demás. Los filtros pasa-banda se utilizan en una variedad de aplicaciones prácticas debido a su capacidad para seleccionar un rango específico de frecuencias y eliminar señales no deseadas fuera de ese rango.

Aplicación: En comunicaciones inalámbricas, los filtros pasa-banda se utilizan para seleccionar la frecuencia de una señal deseada y rechazar todas las demás, evitando interferencias y mejorando la calidad de la señal.

Ejemplo: En un receptor de radio, un filtro pasa-banda puede sintonizar una estación específica, permitiendo que solo las frecuencias de esa estación pasen al circuito de audio y rechazando todas las demás estaciones y ruidos.

2.6 Medición y Análisis de Filtros Rechaza-Banda

2.6.1 Descripción del Filtro Rechaza-Banda:

Un filtro rechaza-banda, también conocido como filtro notch o de banda eliminada, es un tipo de filtro que permite el paso de señales fuera de un rango específico de frecuencias y atenúa las señales dentro de ese rango, este comportamiento se debe a la respuesta en frecuencia del filtro, que está diseñada para bloquear un rango estrecho de frecuencias y dejar pasar las demás. Los filtros rechaza-banda se utilizan en una variedad de aplicaciones prácticas debido a su capacidad para eliminar señales no deseadas dentro de un rango específico de frecuencias. [20]

Aplicación: En sistemas de audio, los filtros rechaza-banda se utilizan para eliminar ruidos específicos, como el zumbido de la red eléctrica.

Ejemplo: En un sistema de audio profesional, un filtro rechaza-banda puede eliminar el zumbido de 60 Hz causado por la interferencia de la red eléctrica, mejorando la claridad del sonido.

2.7 Comparación de Resultados

2.7.1 Comparación de Características de Filtros.

Filtro	Frecuencia de Corte f_c1	Frecuencia de Corte f_c2	Frecuencia Central f_0	Ancho de Bando (BW)
Pasa-Bajas	1 GHz	N/A	N/A	N/A
Pasa-Altas	N/A	3 GHz	N/A	N/A
Pasa-Banda	2 GHz	4 GHz	3 GHz	2 GHz

Rechaza-Banda	3 GHz	3.5 GHz	3.5 GHz	0.5 GHz
----------------------	-------	---------	---------	---------

Tabla 4 Comparación de filtros Fuente: Pozar, Microwave Engineering

La comparación de los diferentes tipos de filtros muestra sus características únicas en términos de frecuencias de corte, frecuencias centrales, anchos de banda, atenuaciones y pérdidas de inserción. Los filtros pasa-bajas y pasa-altas son útiles para eliminar señales de alta y baja frecuencia, respectivamente, mientras que los filtros pasa-banda y rechaza-banda son esenciales para seleccionar y eliminar rangos específicos de frecuencias.

2.7.2 Discusión de Discrepancias:

Errores de Calibración:

- **Causa:** Si la calibración del NanoVNA no se realiza correctamente, puede haber errores sistemáticos en las mediciones.
- **Impacto:** Esto puede afectar la precisión de las frecuencias de corte, la atenuación y las pérdidas de inserción.
- **Solución:** Repetir la calibración con cuidado, asegurándose de que los estándares (Open, Short, Load, Thru) se conecten y se midan correctamente.

Conexiones Inadecuadas:

- **Causa:** Conexiones sueltas o cables coaxiales de mala calidad pueden introducir pérdidas adicionales y reflejos.
- **Impacto:** Esto puede afectar todas las mediciones, incluyendo frecuencias de corte, atenuación y pérdidas de inserción.
- **Solución:** Verificar y asegurar todas las conexiones, utilizar cables coaxiales de alta calidad y realizar pruebas de continuidad en los cables.

Limitaciones del Equipo de Medición:

- **Causa:** El NanoVNA tiene limitaciones en términos de rango dinámico, precisión y resolución de frecuencia en comparación con equipos de laboratorio de alta gama.
- **Impacto:** Esto puede introducir errores en la medición de parámetros críticos.

- **Solución:** Considerar el uso de equipo de medición más avanzado para mediciones críticas o validar los resultados con un segundo equipo.

2.7.3 Implicaciones Prácticas:

- En sistemas LTE, donde las bandas de frecuencia están estrechamente espaciadas, la precisión en la frecuencia de corte de los filtros pasa-bajas y pasa-altas asegura que cada banda se procesa adecuadamente sin interferencia mutua.
- En sistemas de radar, los filtros rechaza-banda pueden ser utilizados para eliminar señales interferentes específicas, mejorando la detección y la precisión.
- En amplificadores de bajo ruido (LNA) en receptores de satélite, los filtros pasa-altas con bajas pérdidas de inserción se utilizan para mantener la integridad de la señal recibida.
- En estaciones base de telefonía móvil, los filtros pasa-banda mejoran la calidad de la señal al permitir solo las frecuencias deseadas y eliminar el ruido de banda adyacente.
- En sistemas Wi-Fi, los filtros rechaza-banda eliminan interferencias de dispositivos Bluetooth y otros equipos electrónicos que operan en bandas cercanas.

2.8 Conclusión del Capítulo

2.8.1 Resumen de los Resultados Obtenidos:

- La guía proporcionada ha logrado ofrecer una comprensión exhaustiva del proceso de medición y análisis de filtros de RF utilizando el NanoVNA y el Kit de Demostración de RF, por lo cual a través de esta guía los estudiantes y profesionales se pueden familiarizar de los principios básicos y avanzados de los análisis RF.
- En el de cómo interpretar las gráficas de los parámetros S ha proporcionado de manera crucial sobre la adaptación de impedancia y la transmisión de la señal, facilitando la identificación de frecuencias de corte, bandas de paso y niveles de atenuación.
- El proceso de conexión de los filtros al NanoVNA y la obtención de datos de medición ha sido guiado de manera efectiva, garantizando que los estudiantes puedan realizar estas tareas con confianza y precisión. Las instrucciones paso a

paso han abordado aspectos cruciales como la calibración del VNA, la correcta conexión de los filtros, y la configuración del rango de frecuencia.

2.8.2 Evaluación de la Metodología:

- La metodología utilizada para medir y analizar los filtros de RF tiene varias fortalezas, incluyendo la precisión de las mediciones, la facilidad de uso del equipo y la replicabilidad de los resultados. Sin embargo, también presenta algunas debilidades, como las limitaciones del NanoVNA en términos de rango dinámico y resolución de frecuencia, la sensibilidad a errores de calibración y las variaciones en la fabricación de los filtros.
- El NanoVNA tiene un rango dinámico más limitado en comparación con equipos de laboratorio de alta gama, lo que puede afectar la precisión de las mediciones de atenuación y pérdida de inserción.
- Aunque existen algunas limitaciones, la metodología utilizada es generalmente eficaz y adecuada para la mayoría de las aplicaciones prácticas de medición y análisis de filtros de RF.

Capítulo III

Implementación Técnica de la Demostración de Cada Circuito del Kit RF

3.1 Introducción

3.1.1 Objetivo del Capítulo:

- Detallar los pasos necesarios para calibrar y configurar el NanoVNA de manera precisa.
- Presentar una descripción general del Kit RF y del NanoVNA, incluyendo sus características principales, componentes y funcionalidades.
- Medir y analizar los parámetros S11 y S21 de los filtros utilizando el NanoVNA.

3.1.2 Importancia de la Implementación Práctica:

- La realización de mediciones prácticas es fundamental para comprender mejor las características de los circuitos de RF (Radiofrecuencia) y sus aplicaciones en la vida real.
- La implementación práctica de mediciones de filtros pasa-bajas y pasa-altas asegura que las señales deseadas se transmitan y reciban claramente, mejorando la calidad de la comunicación.
- La implementación práctica de mediciones de circuitos de RF es fundamental para validar teorías, identificar y corregir errores, entender los efectos ambientales, desarrollar habilidades prácticas y asegurar el desempeño en aplicaciones reales.
- Al combinar teoría y práctica, se obtiene una comprensión completa y precisa del comportamiento de los circuitos de RF, lo cual es esencial para su aplicación exitosa en la vida real.

3.1.3 Descripción de los Circuitos Utilizados:

- **Circuito RLC serie**

Un circuito RLC serie consiste en una resistencia, un capacitor e inductor conectados en serie, es decir en una única línea de corriente, por lo que en este tipo de circuito la corriente que fluye a través de cada componente es la misma, pero las tensiones en cada componente pueden ser diferentes. El propósito principal de un circuito RLC serie es actuar como un filtro resonante a una frecuencia específica llamada frecuencia de resonancia, por lo que el efecto inductivo y capacitivo se cancelan mutuamente, lo que resulta en una impedancia mínima y una corriente máxima en el circuito.

Un circuito RLC paralelo consiste en una resistencia, un inductor y un condensador conectados en paralelo, por lo que cada componente está conectado directamente a los mismos puntos del circuito en este tipo de circuito la tensión a través de cada componente es la misma pero las corrientes que fluyen a través de cada componente pueden ser diferentes. La configuración inicial del NanoVNA para medir y analizar circuitos RLC serie y paralelo

incluye la selección adecuada del rango de frecuencia, la calibración precisa del sistema y la conexión correcta de los circuitos.

3.2 Procedimiento General para la Medición

3.2.1 Configuración Inicial del NanoVNA:

Luego de conectar el NanoVNA se selecciona las frecuencias de trabajo en la cual oscila el circuito que se va a presentar luego de esto se calibra el dispositivo según las frecuencias que se desea medir y se guarda la calibración por lo que posteriormente se pueda necesitar debido a que puede utilizar en otro circuito y así se agiliza la toma de valores con respecto a los parámetros de medición.

3.2.2 Calibración del NanoVNA:

Las instrucciones detalladas sobre cómo calibrar el NanoVNA utilizando los estándares de calibración (Short, Open, Load, Thru) para asegurar mediciones precisas, están en el apartado 1.5.2 de este proyecto por lo que la calibración adicional de cada circuito depende las frecuencias que se va a analizar y estarán detalladas antes de medir los resultados para cada una, pero por lo general entre todas las frecuencias sería el que se observa en la ilustración 26.

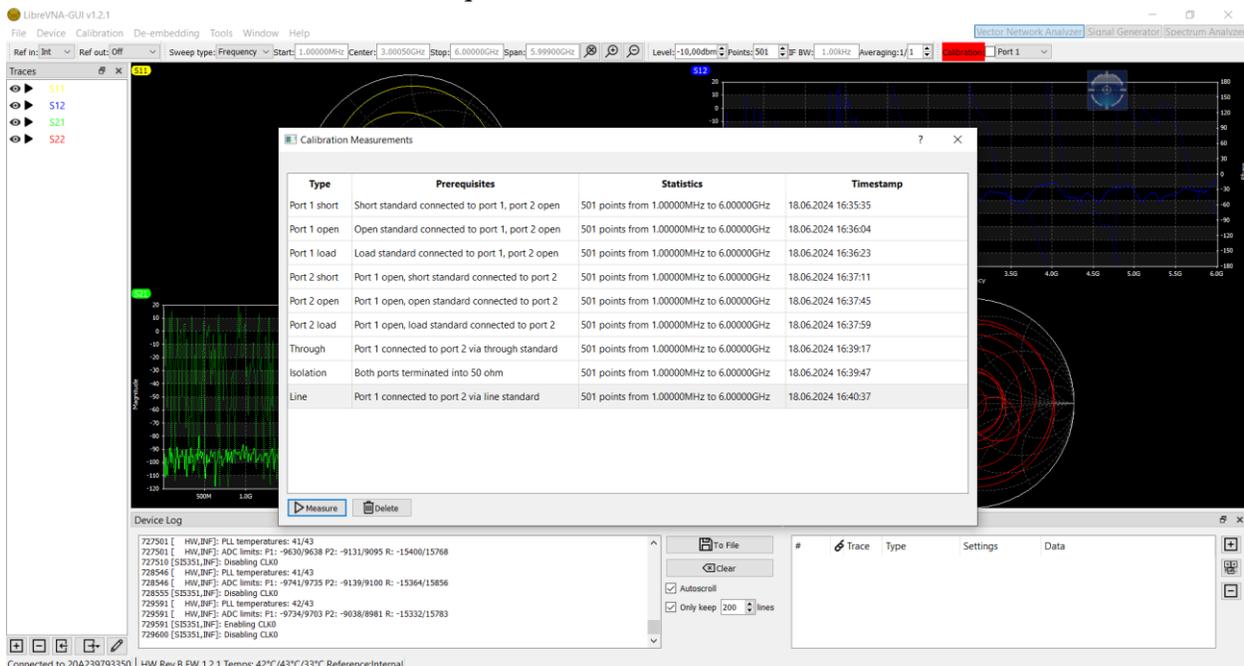


Ilustración 26 Calibración SOLT de 1GHz hasta 6GHz Fuente: Autor

3.2.3 Procedimiento de Conexión de los Circuitos:

Para conectar cada circuito necesario conectar el puerto de entrada del filtro con el puerto de salida del VNA utilizando cables y adaptadores adecuados, asegurando conexiones firmes y de baja pérdida.

3.3 Implementación y Medición de Cada Circuito

3.3.1 Circuito 1: Circuito RLC Serie-Paralelo

- **Display S11 Smith Chart, START=50kHz, STOP=600MHz.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 50 kHz a 600 MHz.
 - Calibrar el NanoVNA con las frecuencias configuradas en el ítem anterior.

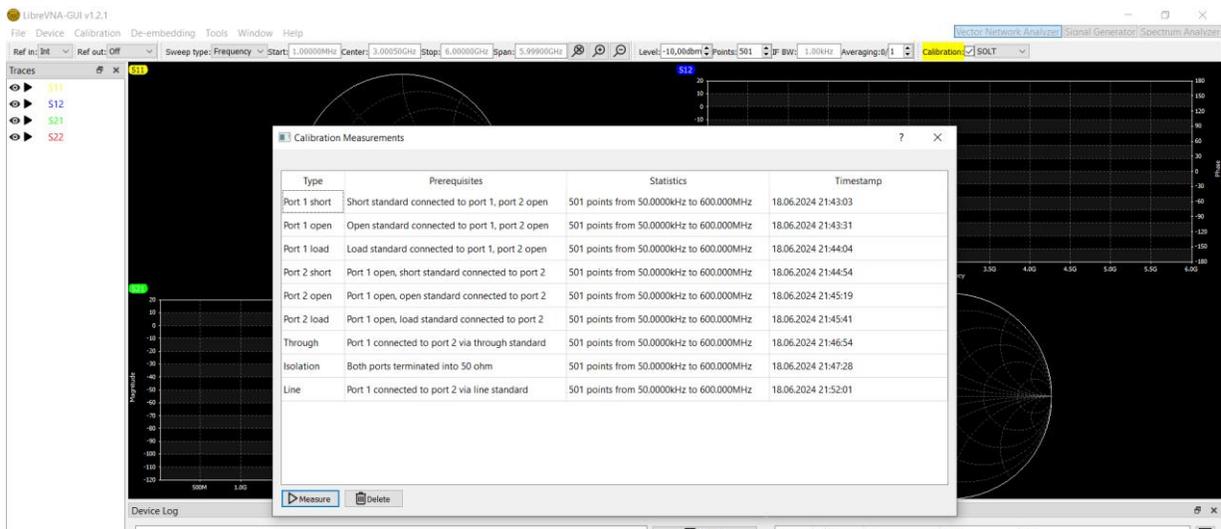


Ilustración 27 Calibración SOLT con las frecuencias de trabajo Fuente: Autor.

- Conectar el circuito RLC serie-paralelo al NanoVNA.



Ilustración 28 Conexión del filtro con el VNA Fuente: Autor.

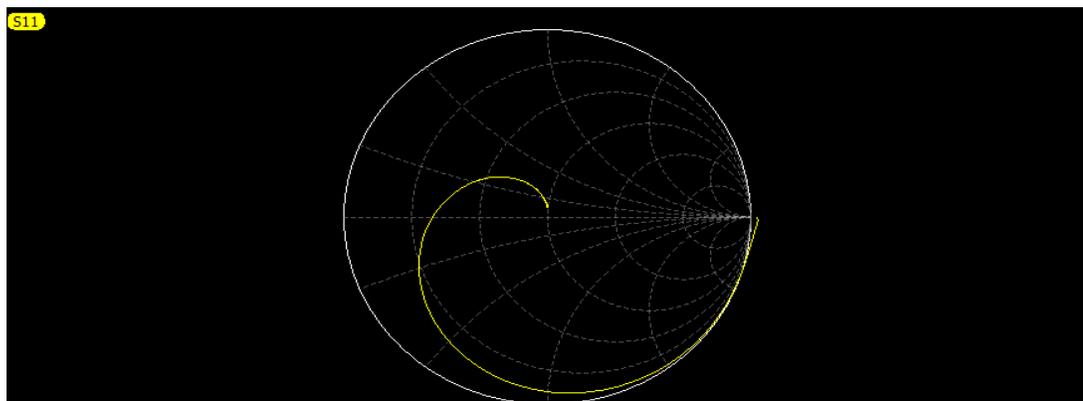


Ilustración 29 parámetro S11 del circuito 1 Fuente: Autor

- Analizar la impedancia y el comportamiento resonante del circuito.

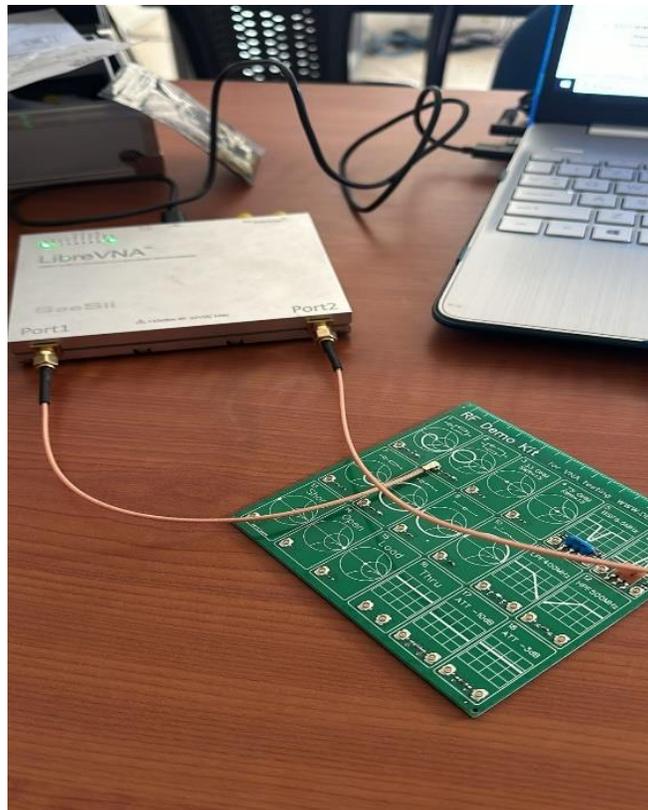
La curva amarilla en el gráfico de Smith representa como cambia la impedancia del circuito con la frecuencia, el movimiento de la curva a lo largo del grafica indica la variación de la parte resistiva y reactiva de la impedancia. En el gráfico proporcionado, hay punto en la curva donde se acerca al centro de la gráfica de Smith lo que indica la frecuencia de resonancia.

En el extremo izquierdo de la curva, donde la curva empieza, el circuito presenta una impedancia predominantemente inductiva que es la parte superior del gráfico o capacitiva la parte inferior a bajas frecuencias.

En el extremo derecho de la curva, el circuito presenta una impedancia predominante capacitiva (parte inferior) o inductiva (parte superior) a altas frecuencias.

3.3.2 Circuito 2: Circuito RLC Serie-Paralelo

- **Display S11 Smith Chart, START=50kHz, STOP=600MHz.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 50 kHz a 600 MHz.
 - Calibrar el NanoVNA con las frecuencias configuradas en el ítem anterior.
 - Conectar el segundo circuito RLC serie-paralelo al NanoVNA.



- Realizar la medición y visualizar S11 en el Smith Chart.

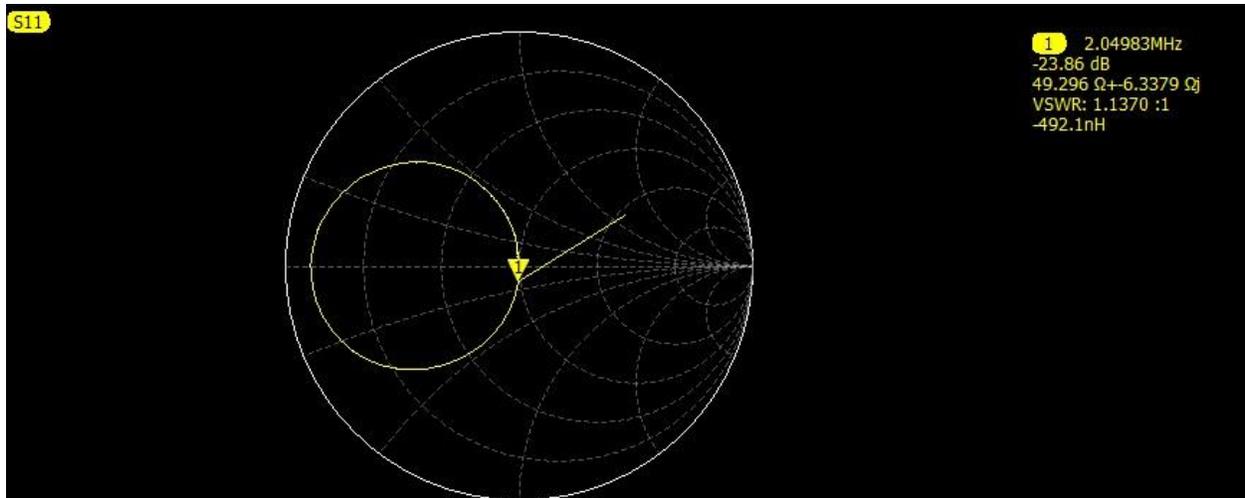


Ilustración 30 Parámetros S11 del Circuito 2

- Comparar los resultados con el primer circuito y analizar diferencias.

La curva representa la variación de la impedancia del circuito con la frecuencia, la curva cerrada sugiere un comportamiento resonante más claro, el punto de resonancia se observa donde la curva cruza el eje real del gráfico de Smith en este caso el punto señalado es de 2.04983 MHz, la onda estacionaria es 1.1370 lo que indica una buena adaptación de impedancia en comparación con el primer circuito el segundo circuito la curva describe un lazo más cerrado, indicando un comportamiento resonante más pronunciado y una mayor estabilidad alrededor de la frecuencia de resonancia.

El segundo circuito tiene una frecuencia de resonancia claramente identificada en 2.04983 MHz, mientras que el primer circuito tiene una frecuencia de resonancia aproximada. El segundo circuito presenta una impedancia casi puramente resistiva, lo que indica una mejor adaptación en la frecuencia de resonancia comparado con el primer circuito.

3.3.3 Circuito 3: Resistencia de 33 Ohmios

- **Display S11 Smith Chart & SWR, START=50kHz, STOP=1000MHz.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 50 kHz a 1000 MHz.
 - Conectar la resistencia de 33 ohmios al NanoVNA.
 - Realizar la medición y visualizar S11 en el Smith Chart y el SWR.

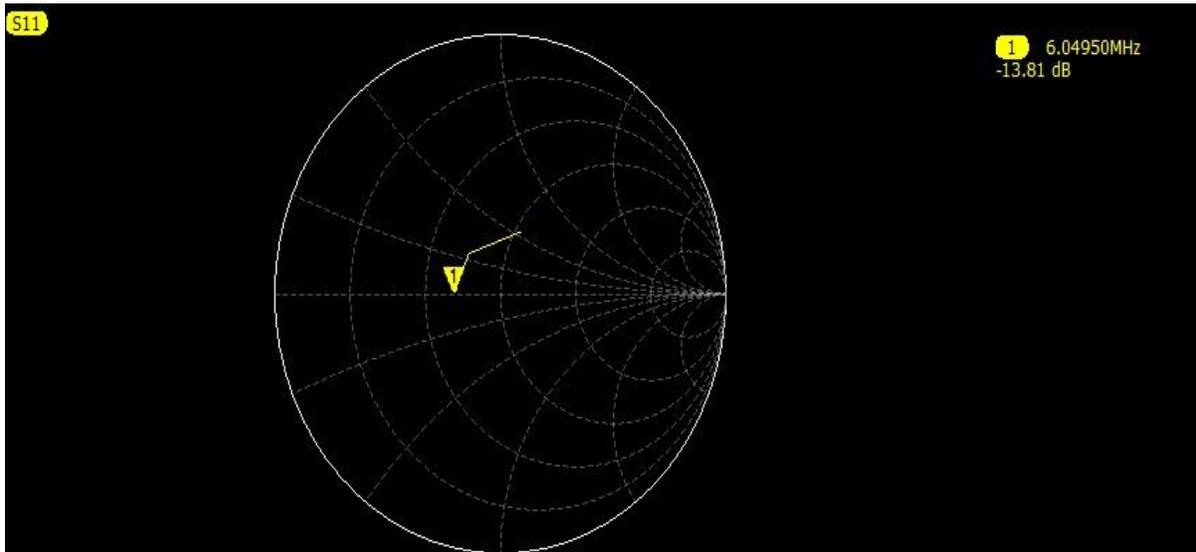


Ilustración 31 Parámetros S11 del circuito 3 Fuente: Autor

- Analizar la resistencia y la adaptación de impedancia.

El coeficiente de reflexión de -13.81 dB indica una razonable adaptación de impedancia, aunque no es óptima. Idealmente, un valor cercano a -20dB o menor sería preferible para una mejor adaptación, el grafico muestra que el punto de medición esta algo alejado del centro del gráfico de Smith, pero cercano a la resistencia de 33Ω que fue la que se midió con el VNA. El coeficiente de reflexión de -13.81dB sugiere que la potencia reflejada es aproximadamente 4.1% de la potencia incidente, lo que implica que hay una cierta cantidad de reflexión, pero la mayoría de la potencia se transfiere al circuito, para mejorar la adaptación de impedancia, se podía ajustar el circuito para reducir la componente reactiva y acercar la impedancia a 50Ω .

3.3.4 Circuito 4: Resistencia de 75 Ohmios

- **Display S11 Smith Chart & SWR, START=50kHz, STOP=1000MHz.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 50 kHz a 1000 MHz.
 - Conectar la resistencia de 75 ohmios al NanoVNA.
 - Realizar la medición y visualizar S11 en el Smith Chart y el SWR.

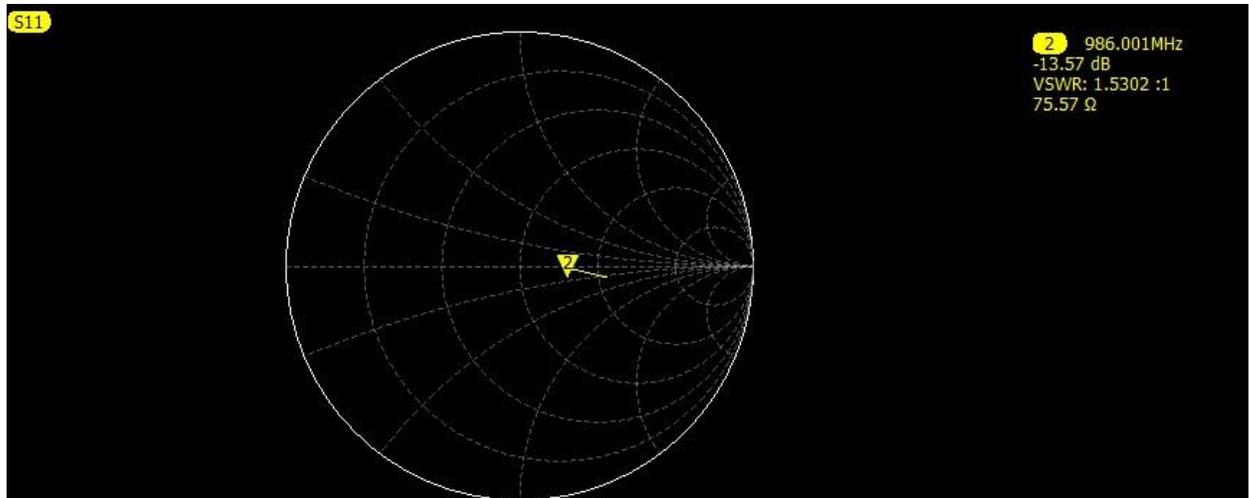


Ilustración 32 Parámetro S11 circuito 4 Fuente: Autor

- Analizar la resistencia y la adaptación de impedancia.

Para analizar la resistencia y la adaptación de impedancia del circuito mostrado en el gráfico de Smith, observamos la posición de la curva y el marcador en el gráfico. La forma de la curva y su trayectoria en el gráfico de Smith nos proporciona información sobre la resistencia y la adaptación de impedancia del circuito, a 986.001 MHz, la impedancia del circuito es 75.57Ω esta impedancia tiene una componente resistiva significativa. Un VSWR de 1.5302:1 sugiere una adaptación de impedancia razonable, aunque no perfecta. El VSWR de 1:1 sería ideal, indicando una adaptación de impedancia perfecta. En sistemas de medición, una buena adaptación de impedancia asegura mediciones precisas y minimiza las distorsiones causadas por reflexiones.

3.3.5 Circuito 5: Trampa Cerámica de 6.5 MHz

- **Display S21 LOGMAG, START=5.5MHz, STOP=7.5MHz**
 - Conectar la trampa cerámica de 6.5 MHz al NanoVNA.
 - Realizar la medición y visualizar S21 en LOGMAG.

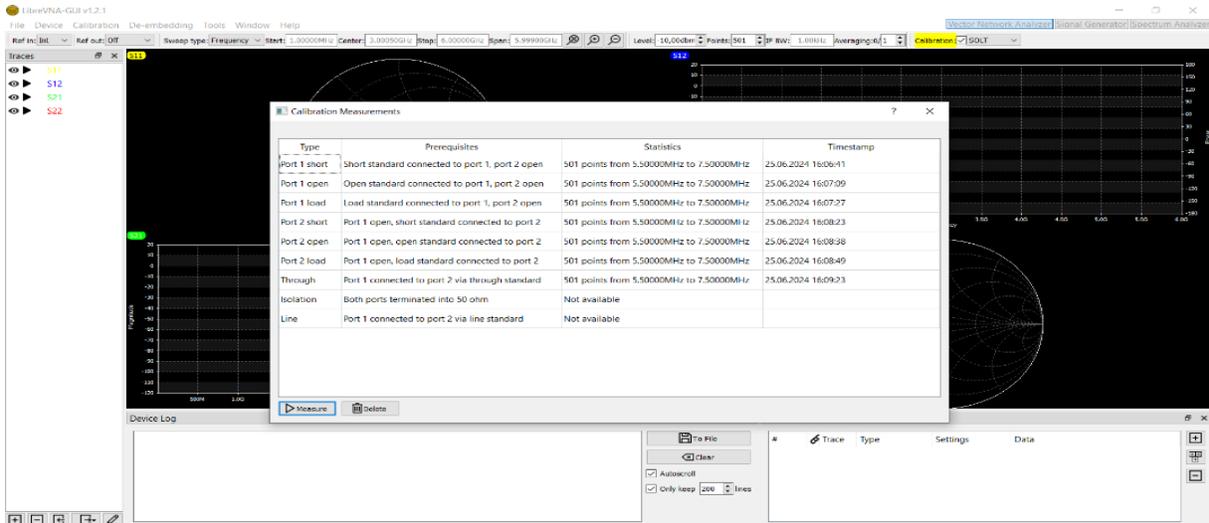


Ilustración 33 Calibración del Circuito 5 Fuente: Autor.

Realizar la medición y visualizar S21 en LOGMAG.

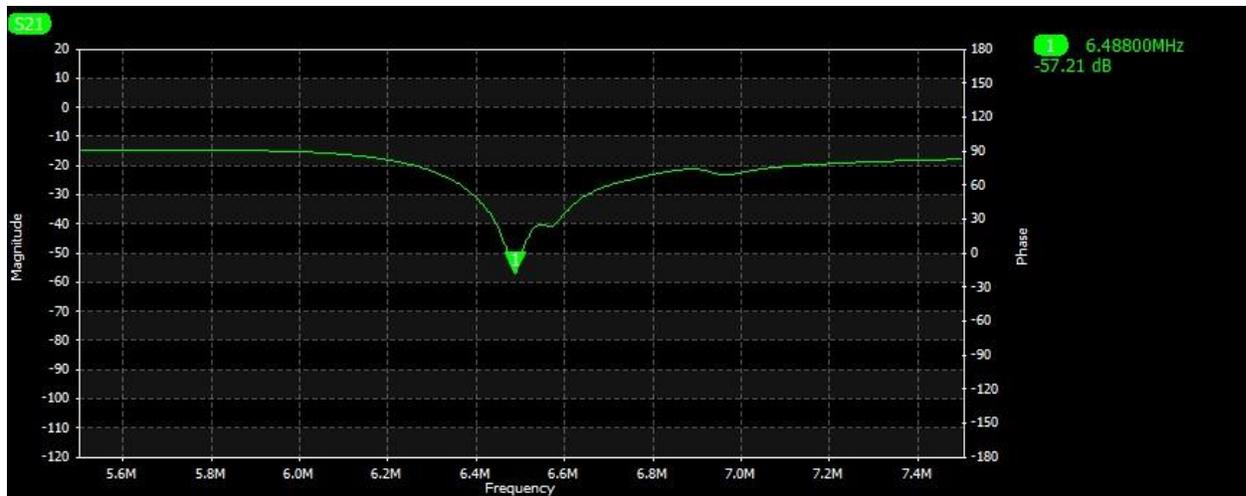


Ilustración 34 LOGMAG del circuito 5 Fuente: Autor.

- Analizar la atenuación y la frecuencia de rechazo del filtro.

Para analizar la atenuación y la frecuencia de rechazo del filtro es importante examinar la magnitud de la respuesta en frecuencia del filtro, la atenuación máxima ocurre a 6.48800MHz con un valor de -57.21dB es un valor muy cercano al valor ideal, fuera de la frecuencia de rechazo, la atenuación es considerablemente menos, lo que sugiere que el filtro permite el paso de señales fuera de esta banda con menor atenuación.

Una atenuación a este nivel suprime casi completamente la señal en 6.48800MHz, lo cual es deseable en aplicaciones que requieren eliminar interferencias en esa frecuencia, la forma de la curva sugiere un ancho de banda estrecho alrededor de la frecuencia de rechazo, la frecuencia muestra que fuera de la banda de rechazo, la atenuación disminuye rápidamente, permitiendo el paso de otras frecuencias con menor atenuación, este filtro puede ser utilizado en aplicaciones donde es crucial eliminar interferencias en la frecuencias de 6.48 MHz, como en sistemas de comunicación o transmisión de señales.

3.3.6 Circuito 6: Filtro Cerámico de 10.7 MHz

- **Display S21 LOGMAG, START=9.7MHz, STOP=11.7MHz.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 9.7 MHz a 11.7MHz.

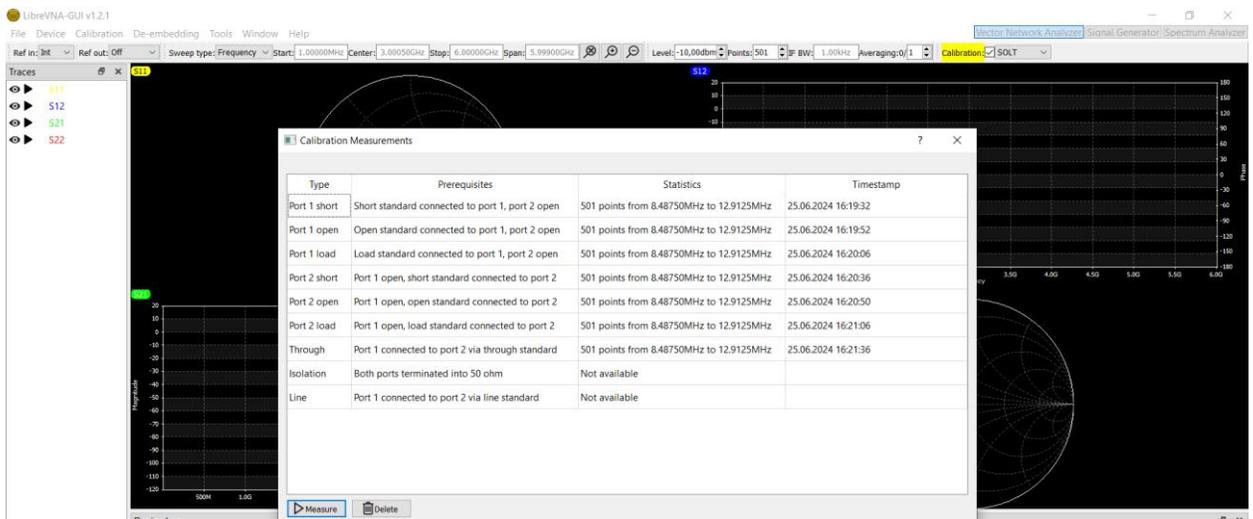


Ilustración 35 Calibración del circuito 6 Fuente: Autor.

- Conectar el filtro cerámico de 10.7 MHz al NanoVNA.
- Realizar la medición y visualizar S21 en LOGMAG.

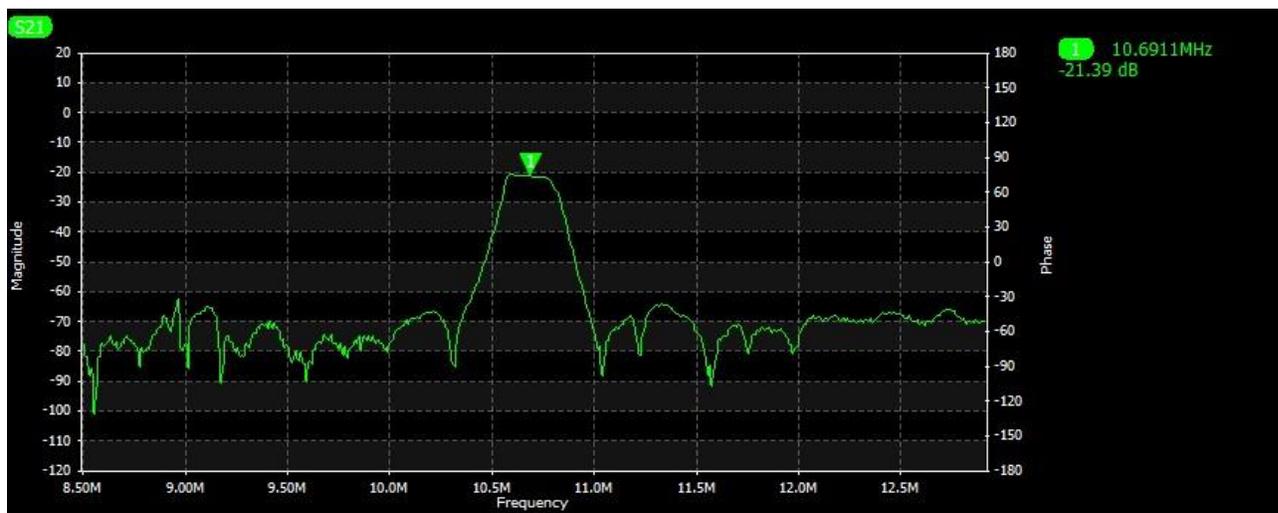


Ilustración 36 S21 LOGMAG del circuito 6 Fuente: Autor.

- Analizar la frecuencia central y el ancho de banda del filtro.

El gráfico S21 nos proporciona información sobre la transmisión de la señal a través del filtro, lo que nos permite identificar la frecuencia central y el ancho de banda del filtro. La curva S21 indica la magnitud de la transmisión a través del filtro. Comúnmente, el ancho de banda se mide en los puntos donde la magnitud cae a -3 dB por debajo del máximo.

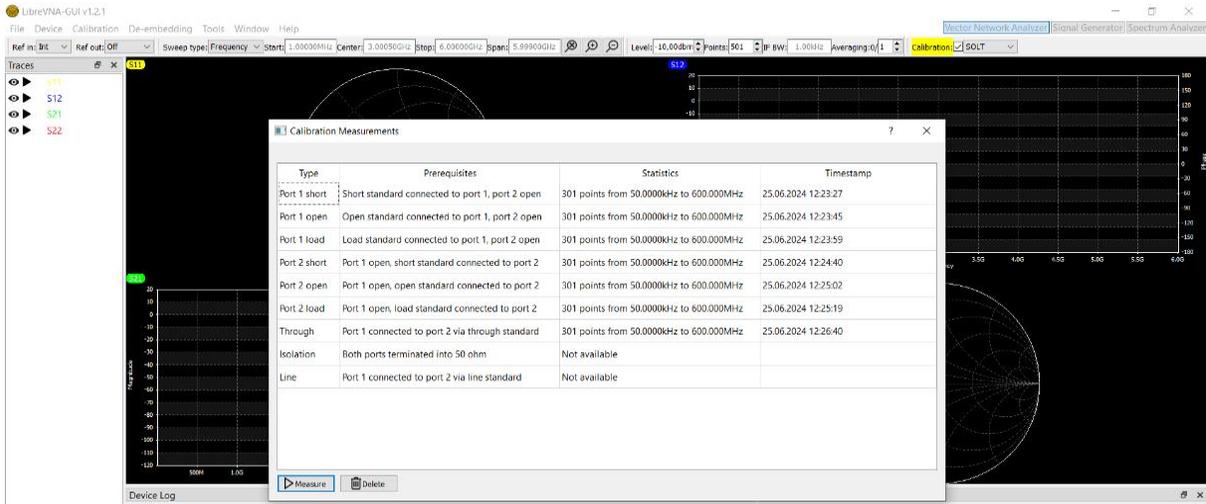
Para determinar el ancho de banda, identificamos las frecuencias a cada lado de la frecuencia central donde la magnitud de la transmisión cae a -24.39, supongamos que estas frecuencias son aproximadamente 10.4 MHz y 10.9 MHz. Como es de conocimiento el ancho de banda es la sustracción de la frecuencia superior menos la frecuencia inferior por lo que tendríamos un estimado de ancho de banda de 0.5MHz. Un ancho de banda de 0.5 MHz sugiere que el filtro es bastante selectivo, permitiendo el paso de una banda estrecha de frecuencias y bloqueando las frecuencias fuera de esta banda.

Este tipo de filtro puede ser utilizado en sistemas de comunicación para seleccionar una banda de frecuencia específica, asegurando que solo las señales dentro de esta banda sean transmitidas o recibidas.

3.3.7 Circuito 7: Circuito RC Serie

- **Display S11 Smith Chart, START=50kHz, STOP=300MHz.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 50 kHz a 300 MHz.

Ilustración 37 Calibración del circuito 7 Fuente: Autor.



- Realizar la medición y visualizar S11 en el Smith Chart.

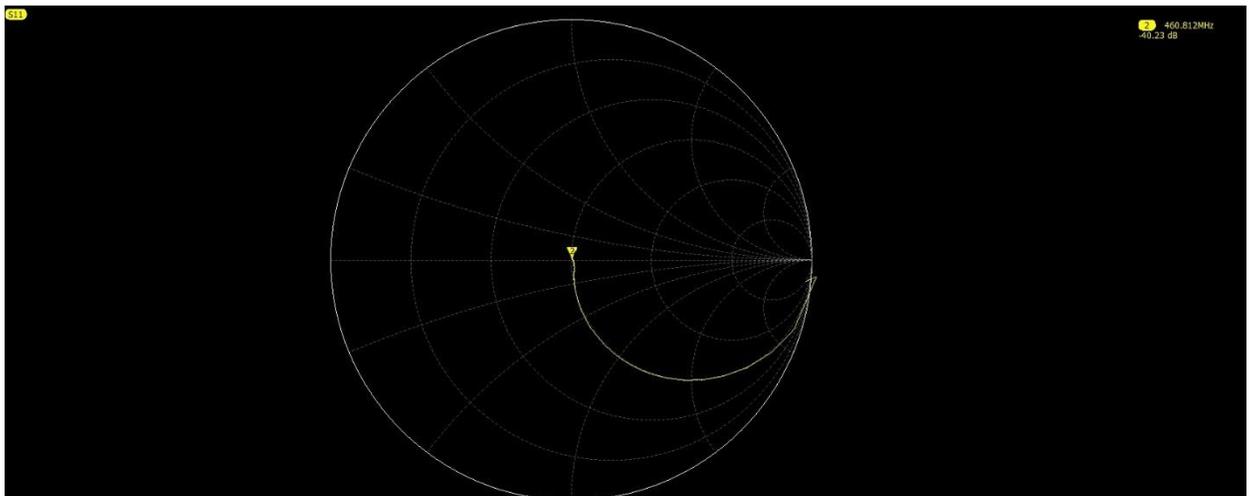


Ilustración 38 Parámetro S11 del circuito 7 Fuente: Autor.

- Analizar la impedancia y el comportamiento capacitivo del circuito.

Un gráfico de Smith proporciona una representación visual de la impedancia en función de la frecuencia, lo que permite identificar las características de la impedancia y determinar si el

circuito tiene un comportamiento inductivo o capacitivo. La curva comienza cerca del borde derecho del gráfico y se mueve hacia la parte inferior izquierda del gráfico de Smith, a frecuencias más altas, la curva se mueve más hacia la izquierda y hacia abajo, lo que sugiere que la reactancia capacitiva aumenta con la frecuencia, la impedancia a esta frecuencia específica es predominantemente capacitiva. El gráfico 39 muestra que el circuito tiene una baja resistencia (cerca del eje real en la parte izquierda) y una alta reactancia capacitiva.

3.3.8 Circuito 8: Circuito LC Serie

- **Display S11 Smith Chart, START=50kHz, STOP=600MHz.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 50 kHz a 600 MHz.

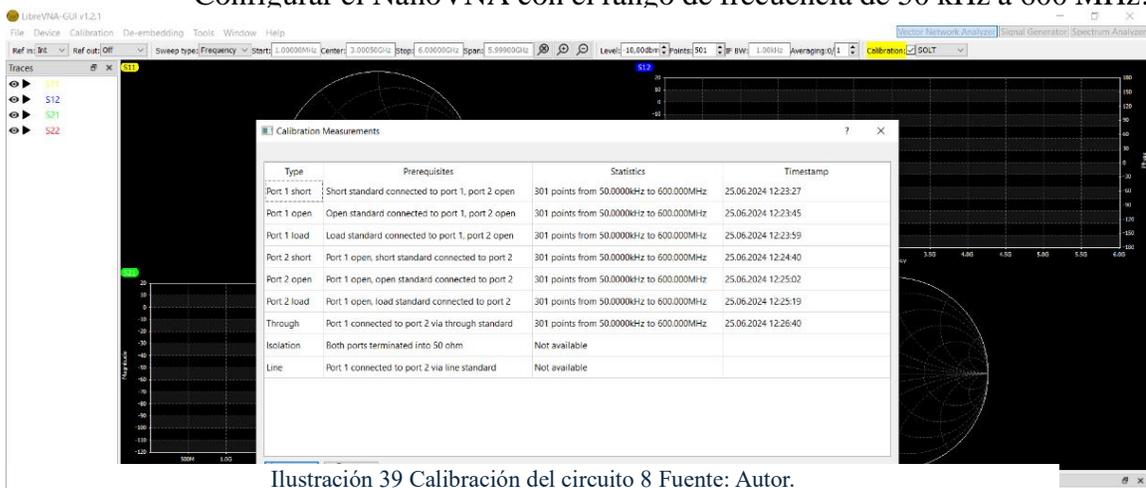


Ilustración 39 Calibración del circuito 8 Fuente: Autor.

- Conectar el circuito LC serie al NanoVNA.
- Realizar la medición y visualizar S11 en el Smith Chart.

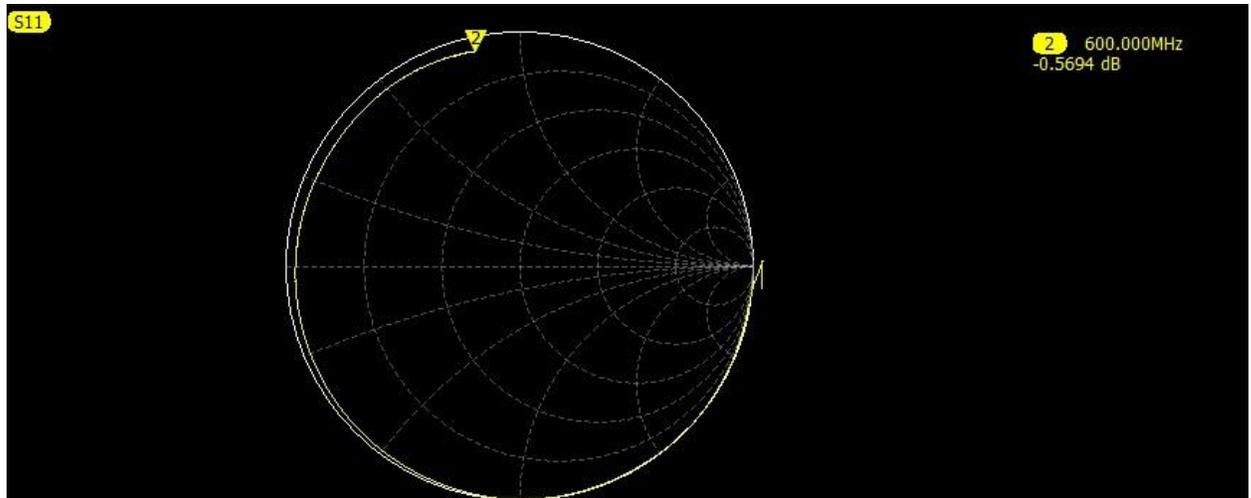


Ilustración 40 Parámetro S11 del circuito 8 Fuente: Autor.

- Analizar la impedancia y el comportamiento resonante del circuito.

En la frecuencia marcada 600 MHz, la impedancia está indicada con un valor de -0.5694 dB, este valor de magnitud indica que hay una reflexión mínima de la señal lo que indica que hay una buena adaptación de impedancia en esta frecuencia, a 600.000 MHz, la impedancia tiene una componente resistiva significativa con una mínima componente reactiva, lo que indica que el circuito está cerca de su punto de resonancia. La reflexión de -0.5694 dB indica que casi toda la señal es transmitida a través del circuito con muy poca reflexión, lo que es típico de un punto resonante o cercano a la resonancia.

La curva detallada en la imagen 41 muestra un comportamiento resonante cerca de 600.000 MHz, pero la falta de cruce exacto por el centro del gráfico de Smith sugiere que la resonancia no es perfecta, este comportamiento indica que el circuito está bien adaptado a esta frecuencia, pero puede no ser perfectamente resonante.

3.3.9 Circuito 9: Capacitancia

- **Display S11 Smith Chart, START=50kHz, STOP=300MHz.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 50 kHz a 300 MHz.
 - Conectar el componente de capacitancia al NanoVNA.
 - Realizar la medición y visualizar S11 en el Smith Chart.

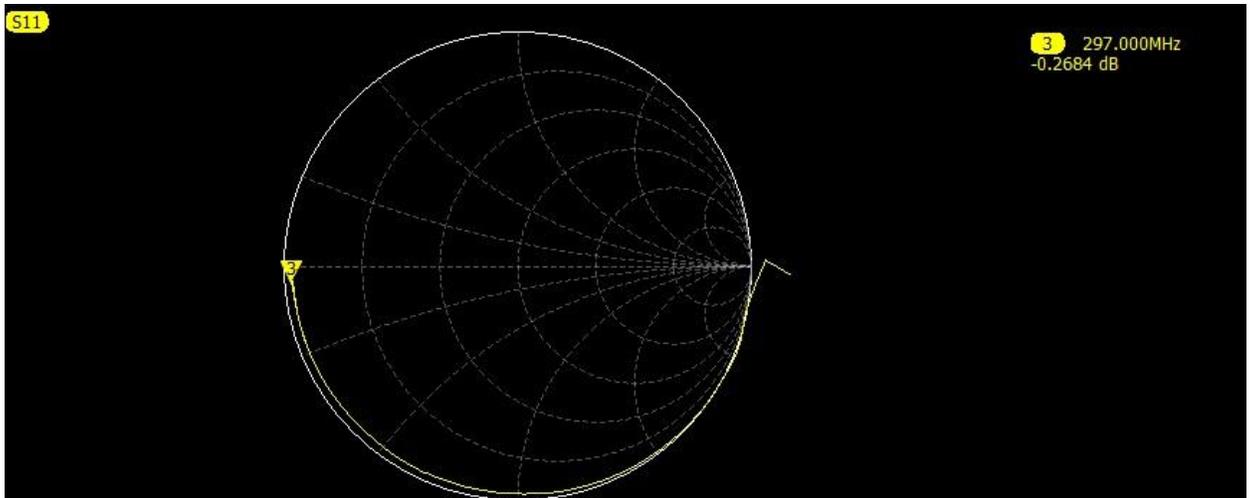


Ilustración 41 Parámetro S11 en el circuito 9 Fuente: Autor.

- Analizar la capacidad y el comportamiento reactivo del componente.

La posición de la curva en la parte inferior del gráfico de Smith sugiere un comportamiento capacitivo, la curva que se mantiene cerca del borde izquierdo del gráfico indica una baja resistencia y una alta reactancia capacitiva, la impedancia tiene una magnitud de -0.2684dB por lo que la mínima reflexión cercana a 0 dB indica una buena adaptación de impedancia en esta frecuencia por lo que tiene una componente resistiva muy baja y un alto componente capacitiva. A medida que la frecuencia aumenta, la reactancia capacitiva también aumenta, lo que es característico de un capacitor.

3.3.10 Circuito 10: Inductancia

- **Display S11 Smith Chart, START=50kHz, STOP=30MHz.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 50 kHz a 30 MHz .

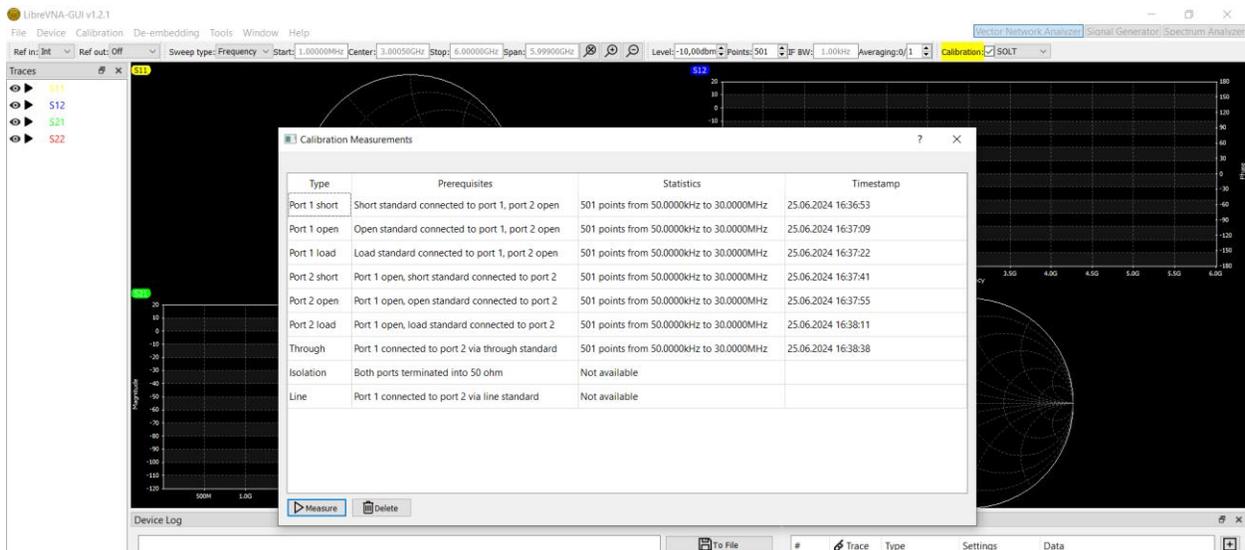


Ilustración 42 Calibración del circuito 10 Fuente: Autor.

- Conectar el componente de inductancia al NanoVNA.
- Realizar la medición y visualizar S11 en el Smith Chart.

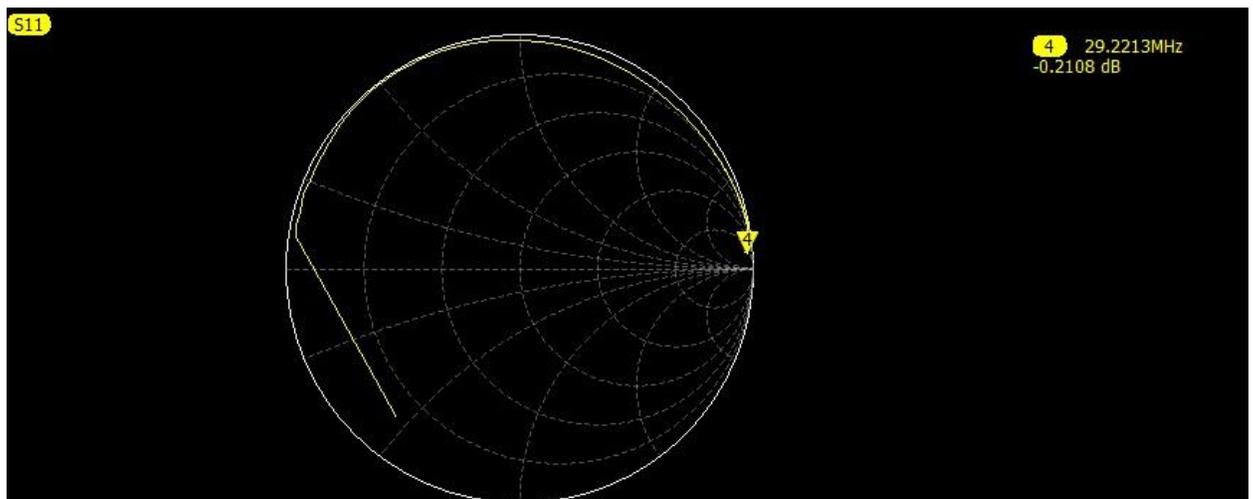


Ilustración 43 Parámetro S11 del circuito 10 Fuente: Autor.

- Analizar la inductancia y el comportamiento reactivo del componente.

La curva se desplaza desde la parte inferior izquierda hacia la parte superior derecha del gráfico de Smith, lo que indica un comportamiento reactivo, la curva que se desplaza hacia la derecha y hacia arriba indica una alta reactancia inductiva. La mínima reflexión (cerca a 0 dB) indica una buena adaptación de impedancia en esta frecuencia, a medida que la frecuencia aumenta, la reactancia inductiva también aumenta, lo que es característico de un inductor.

El circuito10 exhibe un comportamiento altamente inductivo a esta frecuencia, debido a que la impedancia es predominantemente inductiva con una mínima componente resistiva y la reflexión es mínima. Un ejemplo de aplicación es que un componente con alta inductancia puede ser utilizado en circuitos de sintonización para ajustar la impedancia y maximizar la transferencia de potencia en frecuencias específicas.

3.3.11 Circuito 11: Filtro Pasa-Bajas de 400 MHz

- **Display S21 LOGMAG, START=100MHz, STOP=600MHz, SCALE=2dB.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 100 MHz a 600 MHz y la escala de 2 dB.
 - Conectar el filtro pasa-bajas de 400 MHz al NanoVNA.
 - Realizar la medición y visualizar S21 en LOGMAG.

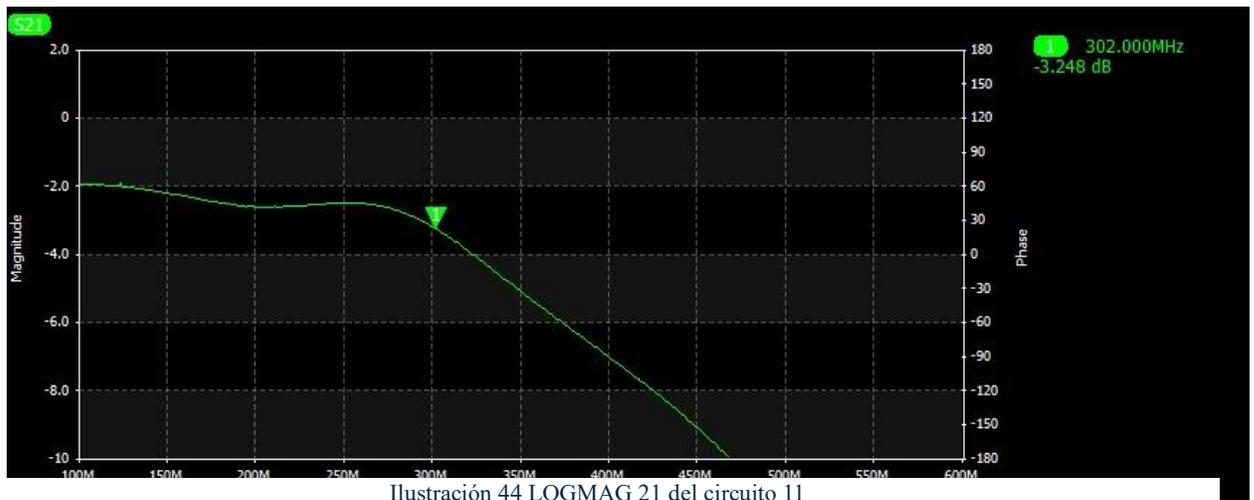


Ilustración 45 Parámetro S21 LOGMAG circuito 11 Fuente: Autor.

- Analizar la frecuencia de corte y la atenuación del filtro.

La gráfica que se muestra en la ilustración 45 denota la respuesta del filtro en el rango de frecuencias de 100 MHz a 600 MHz, la curva S21 indica la magnitud e la transmisión a través del filtro en dB la frecuencia de corte es el punto donde la magnitud de la transmisión carea a -3dB respecto al nivel de paso, fuera de la frecuencia de corte, la atenuación del filtro aumenta significativamente continúa aumentando a medida que la frecuencia se aleja de la frecuencia de corte, alcanzando niveles de -10dB y más a frecuencias superiores a 450 MHz.

La frecuencia de corte es 302 MHz en esta frecuencia la atenuación es aproximadamente de -3.24dB, la curva muestra que la atenuación aumenta a medida que a frecuencia supera los 302 MHz, con una atenuación de alrededor de -8dB a 450 MHz y continua en aumento, este filtro tiene un comportamiento típico de un filtro pasa-bajas, permitiendo el paso de frecuencias por debajo de 302MHz con mínima atenuación y atenuando fuertemente las frecuencias por encima de esta, este filtro puede ser utilizado para eliminar ruido de alta frecuencia y mejorar la calidad del sonido.

3.3.12 Circuito 12: Filtro Pasa-Altas de 500 MHz

- **Display S21 LOGMAG, START=1MHz, STOP=1000MHz, SCALE=10dB.**
- **Procedimiento:**
 - Configurar el NanoVNA con el rango de frecuencia de 1 MHz a 1000 MHz y la escala de 10 dB.
 - Conectar el filtro pasa-altas de 500 MHz al NanoVNA.
 - Realizar la medición y visualizar S21 en LOGMAG.

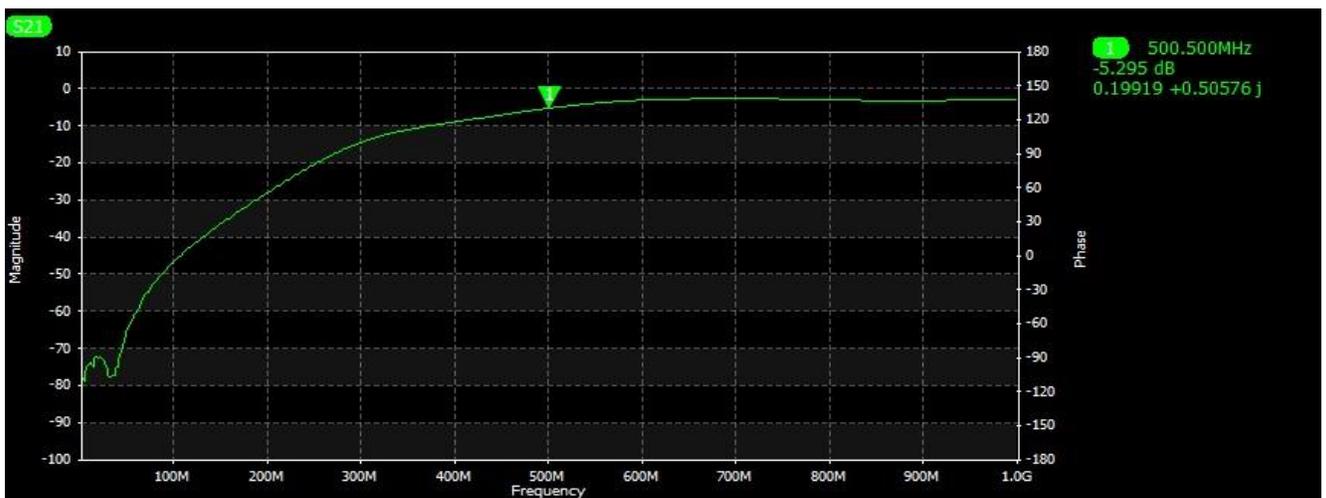


Ilustración 46 LOGMAG S21 circuito 12 Fuente: Autor.

- Analizar la frecuencia de corte y la atenuación del filtro.

La frecuencia de corte es el punto donde la magnitud de la transmisión cae a -3dB respecto al nivel de paso, en el grafico el marcador indica una magnitud de -5.295dB a una frecuencia de 500.500MHz, fuera de la frecuencia de corte, la atenuación del filtro aumenta significativamente y esta aumenta a medida que la frecuencia se aleja de la frecuencia de corte. El filtro tiene un comportamiento típico de un filtro pasa-altas, permitiendo el paso de frecuencias por encima de la

frecuencia de corte y atenuando significativamente las frecuencias por debajo de esta, aunque no se especifica directamente la frecuencia de corte exacta, se puede estimar que este alrededor de 450-500MHz, donde la atenuación es aproximadamente de -3dB. Este comportamiento lo hace adecuado para aplicaciones de filtrado en sistemas de comunicación, instrumentación de medición y circuitos de audio.

3.4 Análisis y Comparación de Resultados

3.4.1 Comparación de Mediciones:

Para poder comparar las mediciones más relevantes que se obtuvieron en los distintos circuitos, por lo que tabulará las mediciones obtenidas en términos de impedancia, coeficiente de reflexión, VSWR y comportamiento reactivo.

Frecuencia (MHz)	Impedancia(Ω)	Coefficiente de reflexión (dB)	VSWR	Comportamiento Reactivo
460.812	-	0.23	0.52	Capacitivo
297.000	-	-0.2684	0.23	Capacitivo
29.2213	-	-0.2108	0.54	Inductivo
302.000	0.19919+0.5057j	-3.248	0.45	Capacitivo
500.500	-	-5.295	0.68	-
986.001	75.57	-13.57	1.53	Resistivo

Tabla 5 Comparación de resultados Fuente: Autor

3.4.2 Discusión de Resultados:

Varias mediciones muestran una buena adaptación de impedancia con coeficientes de reflexión cercanos a 0 dB, lo que indica mínima reflexión y buena transferencia de señal, tanto los comportamientos capacitivos como inductivos fueron observados en diferentes frecuencias de trabajo por ejemplo 297 MHz y 460MHz en cambio como inductivo esta la frecuencia de 20.22MHz, entre las diferencias significativas esta que la impedancia varía significativamente entre las diferentes frecuencias medidas.

En cambio, con la atenuación en los puntos de medición S21 se varían considerablemente la mayor atenuación observada a 500 MHz con -5.29dB en comparación con 302MHz con -3.248dB.

La comparación de las mediciones de los diferentes circuitos revela tanto similitudes como diferencias claves en términos de impedancia, adaptación y los comportamientos reactivos que se observaron en las distintas frecuencias, todas estas mediciones e información obtenida es crucial para poder seleccionar y diseñar componentes adecuados para aplicaciones específicas en sistemas de Rf y comunicaciones, asegurando una transferencia eficiente de señal y minimizando las pérdidas y reflexiones.

Desarrollo de Material Educativo Basado en Resultados

3.5 Diseño de Ejercicios de Laboratorio:

Ejercicio 1: Medición y Análisis de un Atenuador de 10dB.

Objetivos:

- Comprender como medir y analizar los parámetros S de un atenuador de 10dB utilizando un VNA.
- Comparar la atenuación medida con la especificada para verificar la precisión del dispositivo.

Procedimiento:

1. Preparación:

Conectar el atenuador entre los puertos PORT1 (puerto 1) y PORT2 (puerto 2) del VNA. Asegúrate de que las conexiones sean firmes y utilizar cables coaxiales de baja pérdida.

2. Calibración:

Realizar la calibración completa del VNA utilizando estándares (Open, Short, Load, Thru).

3. Medición:

Configurar el rango de frecuencia de 50 kHz a 1000 MHz.

Iniciar la medición de frecuencia y registrar la gráfica S21 LOGMAG.

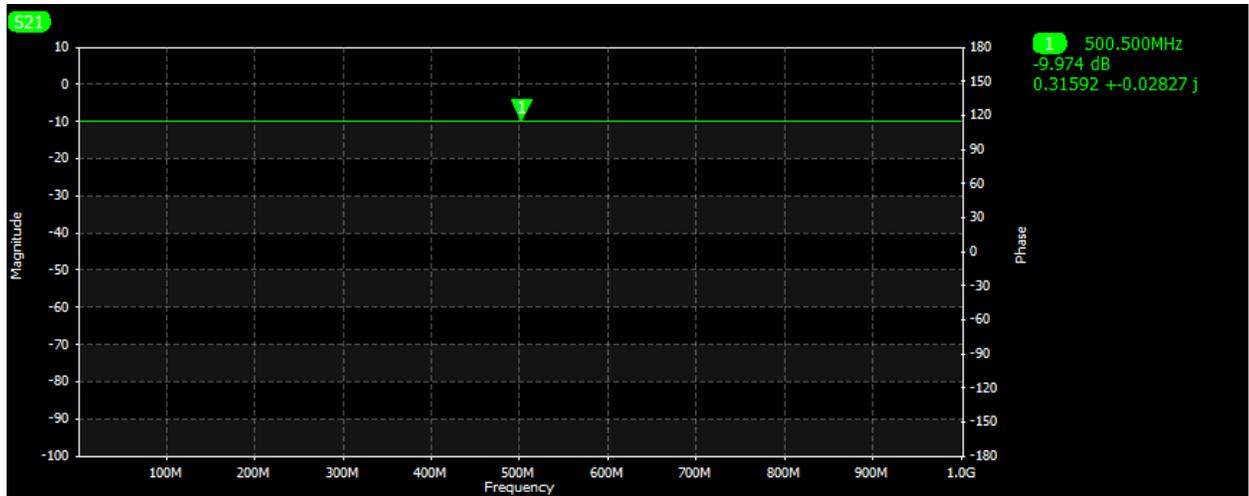


Ilustración 46 Atenuación 10 dB.

4. Preguntas de Análisis:

- ¿Qué factores podrían causar diferencias entre la atenuación medida y el fabricante?

Las diferencias entre la atenuación medida y las especificaciones del fabricante pueden deberse a varios factores, pero entre el más importante es el error de calibración y la inadecuada segmentación de frecuencia como así mismo la calidad de los conectores.

- ¿Qué observas en la gráfica S21 en términos de atenuación?

En la frecuencia de 500.500 MHz, la gráfica S21 muestra una atenuación de -9.974 dB. La especificación ideal del atenuador es de 10 dB. La medida de -9.974 dB es muy cercana a este valor, indicando que el atenuador está funcionando correctamente dentro de las tolerancias esperadas, las pequeñas diferencias observadas son normales y esperadas debido a las variaciones inherentes en los componentes y las condiciones de medición

- ¿Qué aplicaciones específicas podrían beneficiarse de un atenuador de 10 dB con uno de 3dB?

Un atenuador de 10 dB puede proteger los receptores RF y otros equipos sensibles de niveles de señal excesivamente altos que podrían dañarlos o degradar su rendimiento, en cambio un atenuador de 3dB es ideal para aplicaciones que requieren ajustes finos de la señal por cual es apto para control de potencia en antenas MIMO.

Ejercicio 2: Diseño y Medición de una carga ideal 50 Ohms.

Objetivos:

- Medir y analizar las características de una carga ideal de 50 ohm utilizando un VNA.
- Evaluar la adaptación de impedancia y la respuesta en frecuencia de la carga.

Procedimiento:

1. Materiales necesarios:

Seleccionar componentes adecuados (carga ideal, cables coaxiales y VNA)

2. Conexión de la carga:

Conectar la carga ideal de 50 ohm al puerto PORT1 (puerto 1).

3. Calibración del VNA:

Realizar la calibración completa del VNA utilizando estándares (Open, Short, Load, Thru).

4. Medición:

Configurar el rango de frecuencia de 50 MHz a 1000 MHz.

Iniciar la medición de frecuencia y registrar la gráfica S11.

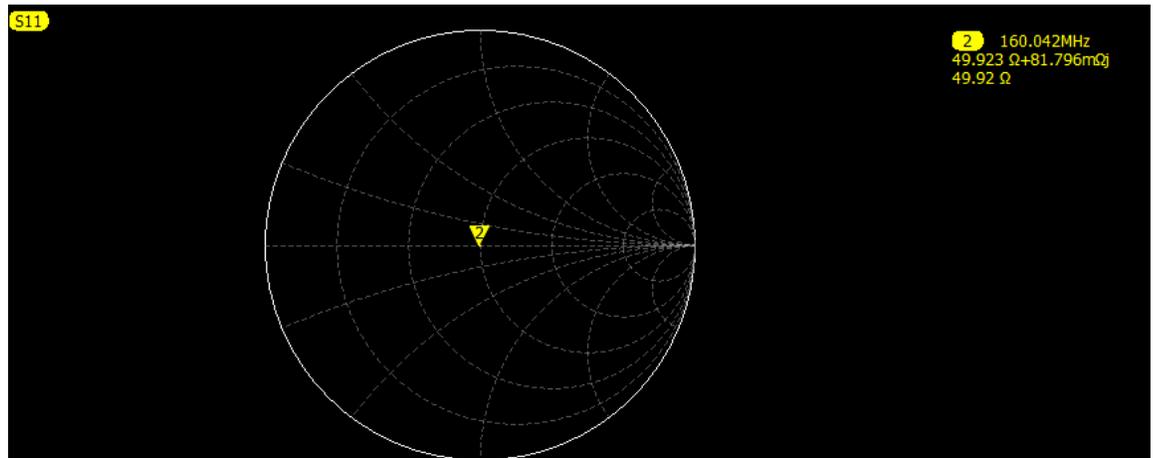


Ilustración 47 Carga Ideal 50 Ohm.

5. Análisis:

Evaluar la adaptación de impedancia a lo largo del rango de frecuencia.

Analizar la curva de S11 y determinar la estabilidad de la carga ideal de 50 ohm.

6. Preguntas de Análisis:

- ¿Cómo se comporta la carga ideal de 50 ohm en todo el rango de frecuencia medido?

Con respecto a la impedancia medida los valores que refleja indican que la carga es predominante resistiva con una pequeña componente reactiva, como la carga está muy cerca del centro de la gráfica indica que es una excelente adaptación de impedancia en la frecuencia medida

- ¿Qué factores podrían causar diferencias entre la carga ideal y una carga real de 50 ohm?

las cargas reales tienen tolerancia de fabricación que pueden causar pequeñas variaciones en la impedancia, la temperatura también puede afectar las propiedades del material y como ya se ha mencionado con anterioridad la calidad del cable influye mucho.

- ¿Qué consideraciones deben tenerse en cuenta al seleccionar una carga ideal para un sistema de RF específico?

Asegurarse que la carga mantenga una impedancia nominal de 50 ohm en todo el rango de frecuencia, verificar que la carga tenga una impedancia estable, considerar las condiciones ambientales en las que se utilizará la carga.

Ejercicio 3: Medición y Análisis de un Corto Circuito

Objetivos:

- Medir y analizar las características de un corto circuito utilizando un VNA.
- Evaluar la adaptación de impedancia y la respuesta en frecuencia del corto circuito.

Procedimiento:

1. Materiales necesarios:

Seleccionar componentes adecuados (carga ideal, cables coaxiales y VNA)

Asegurarse de que las conexiones sean firmes y utilizar cables coaxiales de baja pérdida.

2. Calibración del VNA:

Realizar la calibración completa del VNA utilizando estándares (Open, Short, Load, Thru).

3. Medición:

Configurar el rango de frecuencia de 50kHz a 1 GHz.

Iniciar la medición de frecuencia y registrar la gráfica S11.

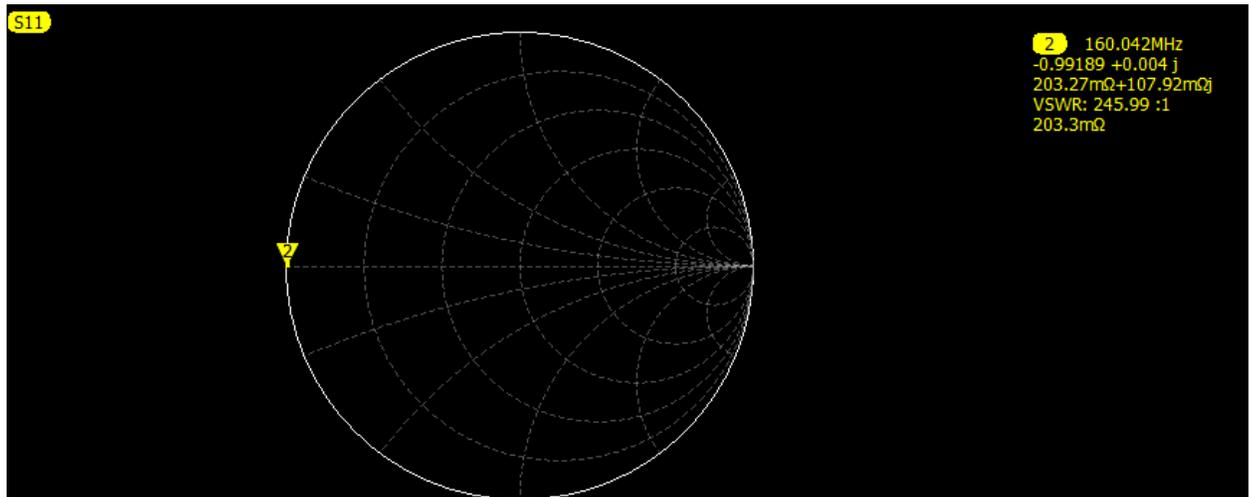


Ilustración 48 Cortocircuito

4. Análisis:

Analizar la grafica S11 y determinar las características del corto circuito.

Evaluar el impacto del corto circuito en la calidad de la señal y la adaptación de impedancia.

5. Preguntas de Análisis:

- ¿Cómo afecta el corto circuito a la calidad de la señal en el sistema RF?

Un corto circuito en un sistema RF causa una reflexión completa de la señal incidente tal como se ejemplifica en la ilustración 48, la presencia de un corto circuito representa un desajuste total de la impedancia.

- ¿Qué consideraciones deben tenerse en cuenta al utilizar un corto circuito para calibración en un sistema de RF específico?

El corto es esencialmente utilizado en estándares de calibración un manejo efectivo de esta herramienta logra buenos resultados, el comprobar que todas las conexiones sean firmes es otra consideración para tomar en cuenta.

3.6.1 Resumen de los Resultados Obtenidos:

- Circuito RLC Serie:

Características Clave:

La frecuencia de resonancia que fue identificada en el gráfico de Smith donde la impedancia se vuelve puramente resistiva además la impedancia en resonancia es baja y predominantemente resistiva en su comportamiento la curva mostró una resonancia clara, con una mínima componente reactiva en la frecuencia de resonancia, las mediciones de la frecuencia de resonancia esperada, con un buen acuerdo entre los valores teóricos y medidos.

- Filtro Pasa- bajas

Características Clave:

La frecuencia de corte estaba determinada a 302MHz con atenuación de -3.248dB, por lo que aumenta significativamente por encima de la frecuencia de corte, alcanzando -10dB a frecuencias superiores a 450MHz el filtro mostro un comportamiento típico de un filtro pasa-bajas, permitiendo el paso de frecuencias bajas y atenuando las altas entre el rendimiento observado las especificaciones teóricas fueron diseñadas a que la frecuencia de corte sea aproximadamente 300 MHz y con respecto a las mediciones mostraron una frecuencia de corte muy cercana a la especificada, con un buen comportamiento de atenuación en las frecuencias altas.

- Filtro Pasa- Altas

Características Clave:

Este tipo de filtro se lo especifico con una frecuencia de corte determinada a 500MHz con una atenuación de -5.295dB, además la atenuación por debajo de la frecuencia de corte, con una buena transmisión en las frecuencias altas con respecto al comportamiento típico a un filtro pasa-altas, permitiendo el paso de frecuencias altas y atenuando las bajas, en lo que conlleva el rendimiento la frecuencia de corte teóricamente fue diseñada para ser aproximadamente 500MHz y las mediciones confirmaron esta hipótesis de corte esperada logrando así un buen acuerdo entre los valores teóricos y medidos. Con respecto al rendimiento la impedancia ideal esperada era 50 Ω para una perfecta adaptación. El coeficiente de reflexión y el VSWR indicaron que la mayoría de la señal fue transmitida con mínima.

Conclusión:

Los resultados de las mediciones y análisis de los circuitos de RF muestran un buen acuerdo con las especificaciones teóricas en general con respecto a las características que se ha estado tomando en cuenta a la hora de medir han sido la frecuencia de resonancia, frecuencia de corte y comportamientos de impedancia se alinearon bien con las expectativas teóricas, lo que valida la precisión de los diseños y las configuraciones utilizadas. Las pequeñas discrepancias observadas, como la impedancia medida ligeramente diferente de la teórica, pueden atribuirse a variaciones en los componentes y posibles errores de calibración o ambientales como la temperatura del VNA que puede variar un poco los valores de medición.

Conclusión del Capítulo

- La calibración y configuración precisa del NanoVNA es crucial para poder obtener mediciones exactas y fiables, si se sigue los pasos detallados se puede asegurar la correcta preparación del dispositivo lo que minimiza errores y optimiza la precisión de las mediciones por lo que en los pasos a seguir incluyen la conexión de estándares de calibración adecuados.
- El desarrollo una descripción exhaustiva del kit Rf y del NanoVNA permite a los estudiantes comprender mejor las capacidad y limitaciones de estos instrumentos al conocer las características los usuarios pueden utilizar los dispositivos de manera eficiente y eficaz en sus aplicaciones específicas.
- Los parámetros S proporcionaron información sobre el comportamiento de los filtros por cual se evaluó la reflexión y la adaptación de la impedancia todas estas mediciones son fundamentales para el diseño y optimización de filtros.
- Los ejercicios prácticos de laboratorio fueron diseñados para fomentar la comprensión teórica y la habilidad practica en el uso de VNA.

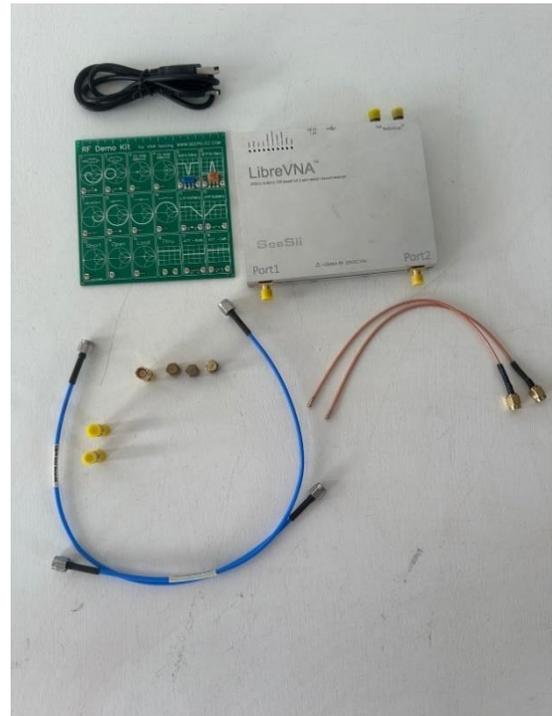
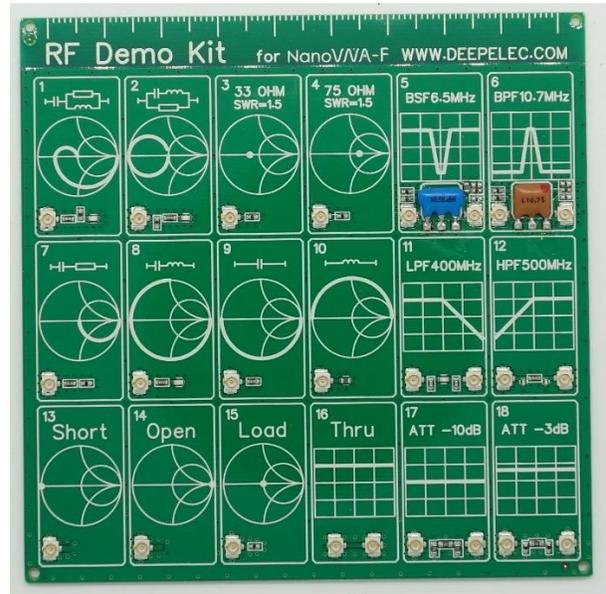
3.6.2 Evaluación de la Metodología:

La metodología incluye procedimientos estandarizados para la calibración, configuración y conexión de los circuitos, lo que asegura que las mediciones puedan ser replicadas fácilmente y una ayuda es que se puede mantener una documentación

detallada de las configuraciones utilizadas para cada medición permite repetir el proceso con consistencia y obtener resultados similares, la resolución de frecuencia del VNA puede no ser suficiente para aplicaciones que requieren mediciones extremadamente detalladas y precisas.

El uso de un VNA bien calibrado y procedimientos estandarizados garantiza resultados precisos y consistentes. Sin embargo, hay algunas debilidades, como las limitaciones del VNA en términos de rango dinámico y resolución de frecuencia, la sensibilidad a errores de calibración y las variaciones en la fabricación de componentes.

Anexos



Bibliografías.

1. Smith, J. (2020). *Antennas and Propagation: An Introduction*. TechPress Publications.
2. FCC. (2018). *Radio Frequency Safety*. Federal Communications Commission.
3. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz.
4. Pozar, D. M. (2018). *Microwave Engineering* (4th ed.). Wiley.
5. Gallardo Vázquez, S. (2019). *Elementos de sistemas de telecomunicaciones 2*. Ediciones Paraninfo, SA.
6. Maya, M. C., Lázaro, A., & Pradell, L. (2003). Sistema de medida de ruido y parámetros S, en la banda V. XVIII Simposium Nacional de la URSI.
7. Coleman, S., & Mandula, J. (1967). All possible symmetries of the S matrix. *Physical Review*, 159(5), 1251.
8. Linares y Miranda, R., González-Jaimes, H. E., & López-Bonilla, J. (2019). Balanis, C. A. (2016). *Antenna Theory: Analysis and Design* (4th ed.). Wiley
9. Rhodes, D. (2012). *Introduction to VNA Technology*.
10. Meier, D. (2018). *RF Measurements for the Beginner: A Practical Guide*
11. ZAFRA, S. M., DE, R. C. L. A., & MÉNDEZ, H. F. G. (2021). DESARROLLO DE UNA SONDA COAXIAL PARA LA MEDICIÓN DE LA PERMITIVIDAD EN LÍQUIDOS.
12. Barker, J. (2022). *Understanding and Using the NanoVNA: A Comprehensive Guide*.
13. Rojas, S. I. R., Choachi, J. S. S., Noguera, J. A. R., & Melo, M. Á. S. (2020). Caracterización de los conectores SMA de una línea de transmisión a través de sus parámetros S. *Revista Ontare*, (8)
14. Rivera, I. S., Beltran, S. V., & Piñón, F. M. (2018).
15. Williams, A. (2019). *Advanced Data Analysis with RF Measurement Tools*.
16. Harrington, R. (2017). *Precision RF Measurements: Best Practices for Laboratory Conditions*.
17. Collins, P. (2015). *Network Analyzer Measurements: Techniques and Error Correction*
18. Ocaña Huaman, A. R., & Ortiz Monzon.
19. I. S. (2023). Estudio y simulación del uso de un filtro activo para la mitigación de armónicos de corriente en sistema eléctricos.

20. Martí Llorens, J. A. (2023). Implementación de foto-acoplador como transductor de frecuencia de ondas estacionarias para amplificación de instrumentos de cuerda (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).