

Universidad Nacional de Mar del Plata

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN ROÍMETRO
PARA UHF CON ANCHO DE BANDA
EXTENDIDO

Informe final

Autor:

Santiago Ezequiel Colusso

Directores:

Alejandro José Uriz

Ramiro Avalos Ribas

Diciembre 2024



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Universidad Nacional de Mar del Plata

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN ROÍMETRO
PARA UHF CON ANCHO DE BANDA
EXTENDIDO

Informe final

Autor:

Santiago Ezequiel Colusso

Directores:

Alejandro José Uriz

Ramiro Avalos Ribas

Diciembre 2024

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Propósito del documento	7
1.2. Alcance del proyecto	7
1.3. Personal involucrado	8
2. Anteproyecto	9
2.1. Requerimientos funcionales	9
2.2. Plan de proyecto	10
3. Proyecto	13
3.1. Desarrollo del Hardware	14
3.1.1. Placa microcontrolador-detector	14
3.1.1.1. Circuito detector	14
3.1.1.2. Microcontrolador	15
3.1.1.3. Fuente regulada	15
3.1.1.4. Diseño esquemático y PCB	16
3.1.2. Módulos complementarios	18
3.1.2.1. Generador	18
3.1.2.2. Divisor resistivo	20
3.1.2.3. Acoplador bidireccional	21
3.1.2.4. Modulo de comunicación	21
3.2. Desarrollo del Firmware	21
3.3. Desarrollo del Software	22
3.3.1. Interfaz gráfica	22
3.3.2. Lectura y procesamiento de datos	23
3.3.3. Calibración	24
3.4. Desarrollo de la estructura	25
4. Resultados	27
4.1. Pruebas	27
4.1.1. Verificación de diseño de la placa adquirida	27
4.1.2. Verificación de curva del detector	27
4.1.3. Calibración	29
4.1.4. Mediciones	30
4.1.4.1. Errores en las mediciones	31
4.1.4.2. Determinación de la fuente de error	32
4.1.4.3. Mediciones de ROE	35
5. Conclusiones	39
5.1. Conclusiones del instrumento	39
5.1.1. Mejoras a implementar	40
5.2. Conclusiones de la gestión del proyecto	40
5.3. Conocimientos aplicados y adquiridos	41
Bibliografía	41

A. Especificación de requerimientos	45
A.1. Introducción	45
A.2. Proyecto	45
A.2.1. Resumen	45
A.2.2. Definiciones, acrónimos y abreviaturas	45
A.3. Problemas de investigación	45
A.3.1. Surgimiento de la idea de investigación	45
A.3.2. Perspectiva del producto	46
A.3.3. Funciones	46
A.3.4. Diagrama del dispositivo propuesto	46
A.3.5. Preguntas de investigación	47
A.3.6. Objetivos de la investigación	47
A.3.7. Justificación y viabilidad de la investigación	47
A.3.8. Enfoque	48
A.3.9. Alcance	48
B. Especificación funcional	49
B.1. Introducción	49
B.1.1. Propósito del documento	49
B.1.2. Alcance del proyecto	49
B.1.3. Definiciones, acrónimos y abreviaturas	49
B.2. Descripción del dispositivo	50
B.2.1. Microcontrolador	51
B.2.2. Datos de entrada	51
B.2.3. Lectura de resultado	51
B.2.4. Generador de radiofrecuencias	51
B.2.5. Acoplador bidireccional	51
B.2.6. Detector de amplitud y fase	51
B.2.7. Sistema bajo prueba	51
B.3. Especificaciones funcionales	51
B.3.1. RF01: Ajuste del rango de medición	51
B.3.2. RF02: Microcontrolador	52
B.3.3. RF03: Separación de la onda reflejada	52
B.3.4. RF04: Detección, lectura y envío de datos	53
B.3.5. RF05: Procesamiento de datos	53
B.3.6. RF06: Graficar y mostrar resultados	54
B.3.7. RF07: Calibración del instrumento	55
C. Especificación técnica	57
C.1. Introducción	57
C.1.1. Propósito del documento	57
C.1.2. Alcance del proyecto	57
C.1.3. Definiciones, acrónimos y abreviaturas	58
C.2. Hardware	58
C.2.1. RT01: Módulo de comunicación	59
C.2.2. RT02: Placa microcontrolador-detector	59
C.2.2.1. Detector	59
C.2.2.2. Microcontrolador	63
C.2.2.3. Fuente	64
C.2.2.4. Diagrama esquemático y PCB	65
C.2.3. RT03: Acoplador bidireccional	67
C.2.4. RT04: Generador	69
C.2.4.1. Diagrama esquemático y PCB	69
C.3. Firmware	71
C.3.1. RT05: Control del generador ADF4351	72
C.3.2. RT06: Recepción de datos del detector	73

C.3.3. RT07: Comunicación con la interfaz gráfica	73
C.4. Software	74
C.4.1. RT08: Interfaz gráfica	74
C.4.2. RT09: Conexión, envío y recepción de datos	75
C.4.3. RT10: Procesamiento de datos recibidos	76
C.4.3.1. Mapeo de valores del ADC	76
C.4.3.2. Calculo de ρ y ROE	77
C.4.3.3. Calibración	77
C.4.4. RT11: Gráficos	78
C.5. Estructura física	79
C.5.1. RT12: Soporte	79
D. Plan de pruebas	81
D.1. Introducción	81
D.2. Pruebas realizadas	81
D.2.1 Modulo: Controlador-Generador	81
D.2.1.1 Comprobar comunicación serie	81
D.2.1.2 Verificar de frecuencia fija	81
D.2.1.3 Verificar de barrido en frecuencia	81
D.2.1.4 Verificar de amplitud de señal en el ancho de banda especificado	81
D.2.2 Modulo: Atenuadores	81
D.2.2.1 Medición de atenuación real	81
D.2.3 Modulo: Controlador-Detector	81
D.2.3.1 Medición de magnitud de salida	81
D.2.3.2 Caracterización de la curva de repuesta	81
D.2.4 Modulo: Prototipo circuito detector	81
D.2.4.1 Caracterización de la curva de repuesta	81
D.2.5 Modulo: Interfaz gráfica	81
D.2.5.1 Comprobar comunicación serie	81
D.2.5.2 Verificar procesamiento de datos	81
D.2.5.3 Verificar procesamiento de datos con tabla de calibración	81
D.3. Resultados	83
D.3.1. Curva de respuesta del detector	83
D.3.2. Resultados interfaz gráfica	86

Capítulo 1

Introducción

La Relación de Onda Estacionaria (ROE) es una medida que refleja el grado de adaptación entre una línea de transmisión y su carga. Este parámetro es crucial para determinar la eficiencia en la transferencia de energía, ya que una mala adaptación genera reflexiones que afectan tanto la calidad de la señal como el rendimiento global del sistema. Una ROE ideal indica que toda la energía transmitida es absorbida por la carga, mientras que valores elevados revelan la existencia de pérdidas y posibles problemas en la transmisión.

En el ámbito de la electrónica, un roímetro es una herramienta esencial para medir la ROE y otros parámetros clave en líneas de transmisión. Este instrumento permite evaluar la eficiencia y la calidad de los sistemas de comunicación, identificando reflexiones que podrían comprometer su desempeño. El roímetro se utiliza ampliamente en laboratorios para diseñar y ajustar radiotransmisores, antenas y líneas de transmisión, además de caracterizar las frecuencias de óptima adaptación en sistemas de alta frecuencia.

En particular, un roímetro de UHF (Ultra Alta Frecuencia) es de vital importancia en aplicaciones que trabajan con frecuencias superiores a los 300 MHz, como las comunicaciones inalámbricas, radares y equipos de transmisión modernos. La capacidad de medir la ROE y detectar problemas de adaptación lo convierte en un instrumento indispensable para garantizar la integridad de dispositivos electrónicos, optimizar la transmisión de energía y mantener en condiciones óptimas los sistemas de radiofrecuencia.

1.1. Propósito del documento

Este documento corresponde al informe final para el proyecto titulado “Diseño y desarrollo de un Roímetro para UHF con ancho de banda extendido”. Se ha estructurado basándose en la información proporcionada en el documento “Especificación de Requerimientos [1]”, “Especificación Funcional [2]” y “Especificación Técnica [3]”.

El presente documento tiene como propósito resumir el proceso de diseño y fabricación de la solución, proporcionando información de su funcionamiento, comportamientos y construcción. Se anexan las distintas especificaciones referenciadas, que cuentan con información detallada de lo resumido en este informe. Se encuentra dirigido a los desarrolladores de este proyecto y a la mesa examinadora para su evaluación. Además, este informe puede servir de soporte a aquellas personas que en un futuro deseen realizar un dispositivo similar.

1.2. Alcance del proyecto

El proyecto abarca la definición de los requerimientos, el diseño y desarrollo de la solución y la presentación final de la misma. Los requerimientos fueron planteados junto con los directores del proyecto pertenecientes al Laboratorio de Comunicaciones (LAC) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. Es desde este laboratorio que surge la idea del proyecto, donde se llevó a cabo el desarrollo y la mayor parte del trabajo.

1.3. Personal involucrado

Nombre	Santiago Ezequiel Colusso
Rol	Desarrollador
Categoría Profesional	Estudiante
Responsabilidad	Desarrollador del proyecto
Información de contacto	secolusso@hotmail.com

Nombre	Alejandro José Uriz
Rol	Director de Proyecto
Categoría Profesional	Dr. en Ingeniería Electrónica
Responsabilidad	Supervisor técnico del Proyecto
Información de contacto	ajuriz@fi.mdp.edu.ar

Nombre	Ramiro Avalos Ribas
Rol	Co-Director de Proyecto
Categoría Profesional	Dr. en Ingeniería Electrónica
Responsabilidad	Supervisor técnico del Proyecto
Información de contacto	avalosribas@fi.mdp.edu.ar

Capítulo 2

Anteproyecto

Se propuso el diseño, desarrollo, calibración y ensayo de un dispositivo medidor de ROE que opere en el rango de frecuencias de UHF (de 1 a 2GHz). Para su desarrollo se optó por la utilización de técnicas de reflectometría para realizar la medición del coeficiente de reflexión y así determinar la ROE en el rango de operación requerido.

A continuación, se detallan los requerimientos planteados en la etapa previa al proyecto y plan de trabajo.

2.1. Requerimientos funcionales

El roímetro tiene tres requerimientos principales: permitir al usuario el ajuste de parámetros de medición, realizar la medición y calculo correspondientes e informar al usuario los resultados obtenidos. A continuación, se listan los requisitos que debe cumplir, de los cuales se trataran con mayor detalle en el Apéndice B.

- **RF01: Ajuste del rango de medición:** El usuario debe definir el rango de frecuencias en el que va a realizar la medición (dentro del rango de frecuencias de funcionamiento del dispositivo que va de 1 a 2GHz) y enviar esta información al roímetro.
- **RF02: Microcontrolador:** El microcontrolador debe ser capaz de recibir los datos desde la PC y configurar el generador con los parámetros de barrido.
- **RF03: Separación de la onda reflejada:** Se debe poder separar las señales incidente y reflejada para poder aplicar técnicas de reflectometría.
- **RF04: Detección, lectura y envío de datos:** El dispositivo debe ser capaz de detectar y medir las señales indicente y reflejada y enviar los datos a la PC para su procesamiento.
- **RF05: Procesamiento de datos:** Recibidos los datos en la PC se deben procesar para obtener el valor de ROE.
- **RF06: Graficar y mostrar resultados:** Se deben mostrar los resultados al usuario gráficamente.
- **RF07: Calibración:** El dispositivo debe poder calibrarse para adaptarse a otros bancos de medición y compensar errores propios del mismo.

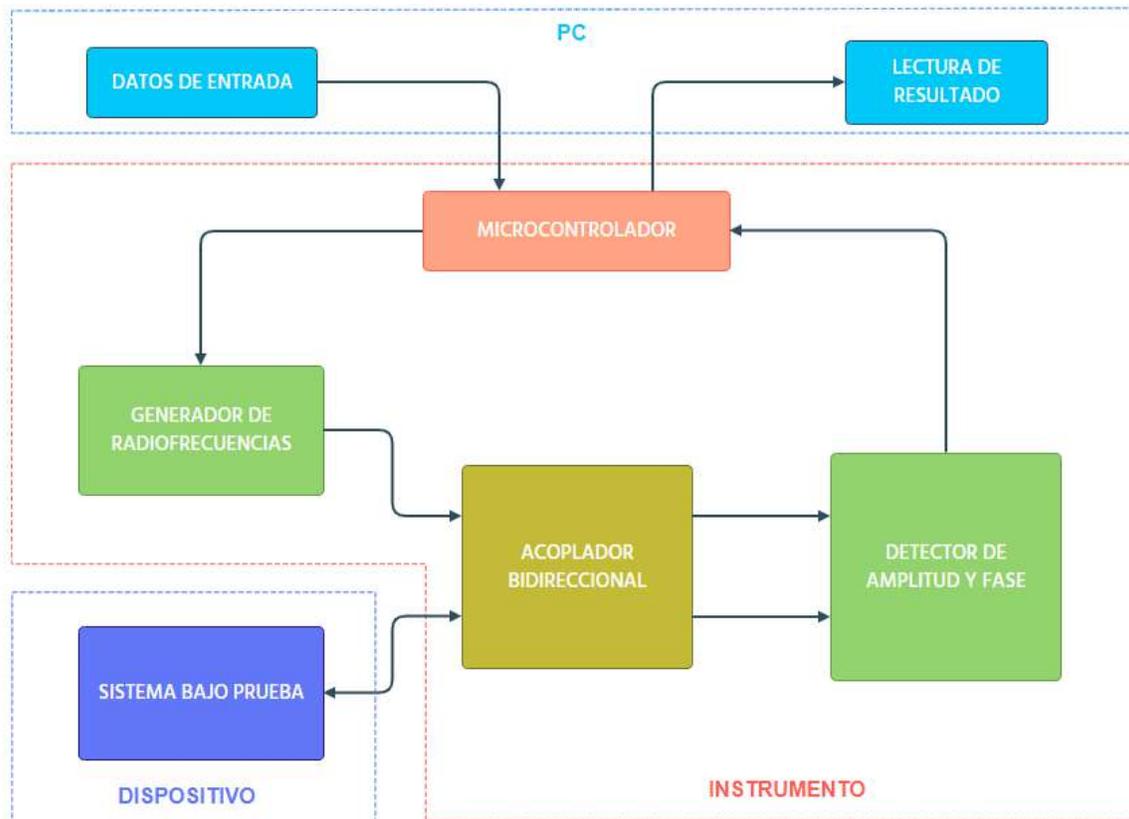


Figura 2.1: Diagrama en bloques del roímetro.

2.2. Plan de proyecto

Durante el cursado la asignatura Trabajo Final y mientras se realizaban las tareas de investigación, se realizó la planificación del proyecto mediante un diagrama de Gantt. Se desarrolló el plan del proyecto dividiéndolo en tareas y asignando tiempo y responsabilidades en cada etapa. El diagrama se realizó con el software libre Gantt Project [4] dividiendo todo el proyecto en 7 etapas principales, cada una con sus subtarefas asignadas.

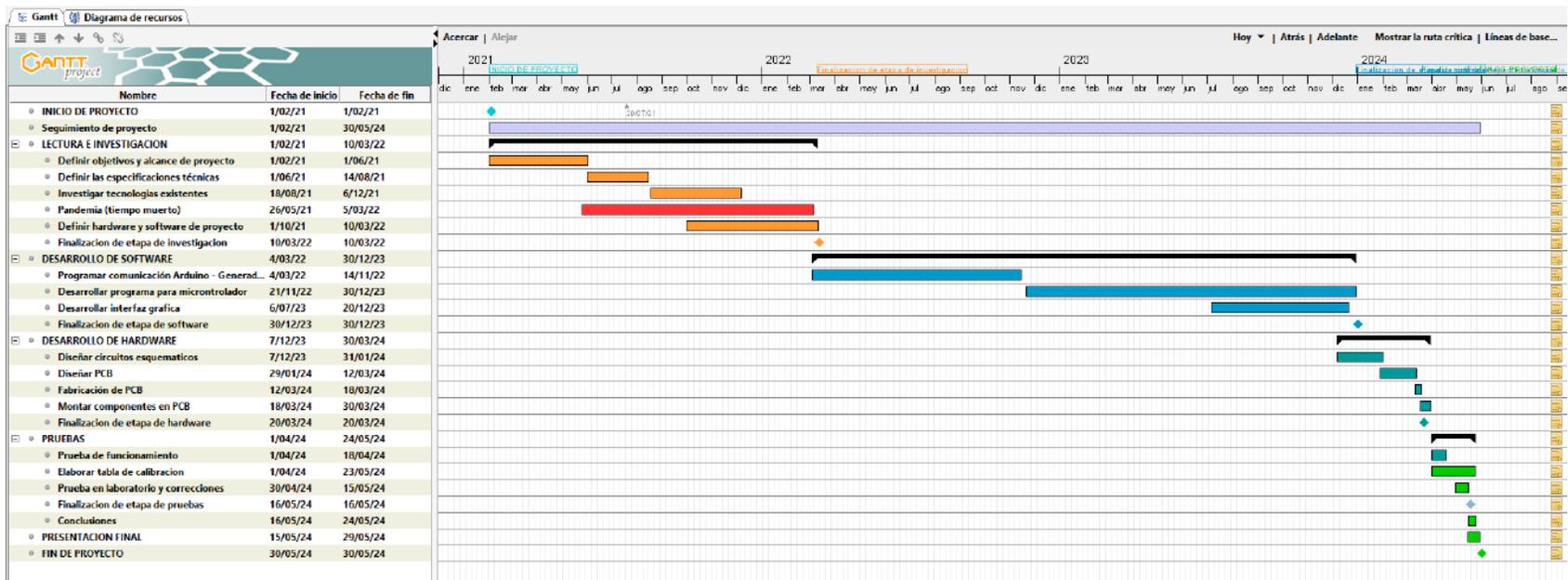


Figura 2.2: Diagrama de Gantt.

Capítulo 3

Proyecto

En este capítulo se presenta un resumen conciso de los componentes más relevantes que constituyen este proyecto. Cada uno de los bloques se analizará en detalle en la Especificación Funcional y la Especificación Técnica, las cuales se encuentran en los Apéndices B y C, respectivamente. El proyecto se dividió en cuatro etapas para su desarrollo: Hardware, Firmware, Software y Estructura Física. En la Figura 3.1 se puede ver el diagrama en bloques completo del dispositivo desarrollado.

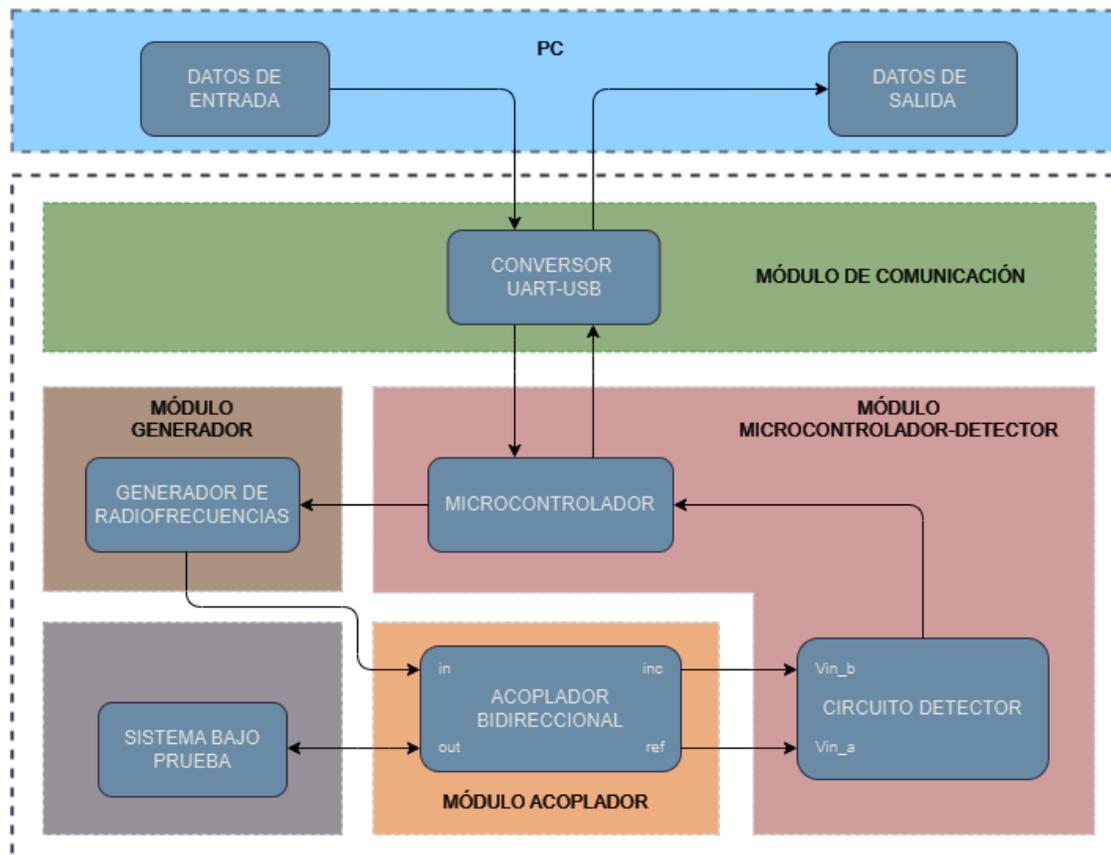


Figura 3.1: Diagrama en bloques del roímetro.

3.1. Desarrollo del Hardware

En la Figura 3.1 se presenta el bloque principal que constituye el hardware del instrumento, agrupando todos los módulos que lo integran. Además, se incluye la PC, la cual actúa como interfaz para la introducción de parámetros, su procesamiento y la visualización de los resultados.

3.1.1. Placa microcontrolador-detector

Para poder desarrollar el dispositivo se decide implementar en una única placa los siguientes bloques:

- **Circuito detector:** Encargado de la medición de las señales incidente y reflejada provenientes del acoplador bidireccional.
- **Microcontrolador:** Para enviar los parámetros de barrido ingresados por el usuario al generador, procesar los datos recibidos y enviarlos a la PC, para su posterior procesamiento y visualización.
- **Fuente regulada:** Para proveer una tensión regulada y estable tanto para este módulo como para la del circuito generador que se encuentra en una placa separada.

3.1.1.1. Circuito detector

Para obtener una medición de ROE mediante técnicas de reflectometría era necesario diseñar y fabricar una placa de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés) que sea capaz de medir las amplitudes de las señales incidente y reflejada provenientes del acoplador bidireccional. Para su implementación se utilizó el circuito integrado AD8302 [12] que es un detector de amplitud y fase que opera en un amplio rango de frecuencias y tiene un rango dinámico que se ajusta a los requerimientos de diseño. Este circuito detector cuenta con un rango dinámico de 60dB y una frecuencia de trabajo que alcanza los 2,7GHz, resultando de especial interés en este proyecto cuya frecuencia de operación está en el rango de 1 a 2GHz.

El AD8302 permite la medición de señales de entradas, acopladas en CA, que varíen entre 0 y 60dBm. Esto le permite una medición precisa de la relación de amplitud de ± 30 dB. Para este proyecto, solo se utilizó en el rango de -30 a 0dBm, ya que los sistemas a probar son dispositivos pasivos por lo que la amplitud de la señal reflejada no podría ser mayor que la amplitud de la señal incidente.

Para poder realizar la medición de amplitud de las señales incidente y reflejada, se usa la configuración del modo medición. En esta configuración la curva de respuesta del detector, brindada por el fabricante, para la relación de amplitud de las señales de entrada se observa en la Figura 3.2.

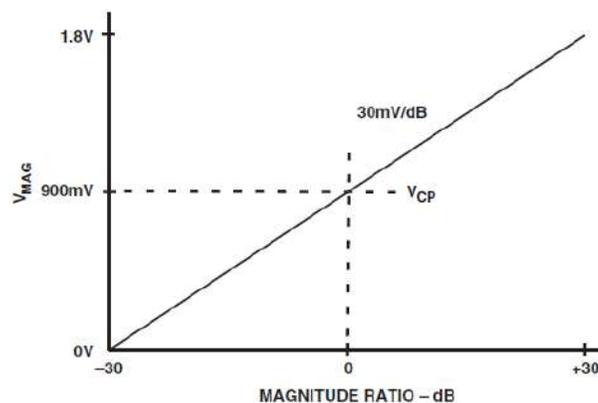


Figura 3.2: Curva característica ideal del detector para la medición de amplitud relativa.

El circuito detector genera una tensión interna VCP de 900mV que sirve para establecer el punto central de referencia, y que en este caso se corresponde con señales de entrada de igual amplitud. De esta forma, amplitudes inferiores a la tensión de referencia se sitúan debajo de la curva y las amplitudes superiores por encima. En este proyecto, el sistema bajo prueba consta de elementos pasivos, por lo cual se trabajó únicamente sobre la curva inferior, teniendo una excursión total de -30dB. En esta configuración, se pueden medir señales de entrada cuyas amplitudes varían como máximo 30dB, parámetro que será de utilidad para conocer las limitaciones técnicas del dispositivo a construir.

3.1.1.2. Microcontrolador

Se optó por el uso del microcontrolador ATmega328P [13] debido a que sus especificaciones técnicas cumplen con los requerimientos necesarios para gestionar los bloques interconectados de manera eficiente y sin restricciones significativas. Asimismo, se eligió este dispositivo debido a la disponibilidad de una placa de desarrollo previamente adquirida, lo que facilitó la realización de pruebas iniciales para la programación y configuración del generador.

En la Figura 3.3 se observa el diagrama de interconexión entre los diferentes módulos de la placa.

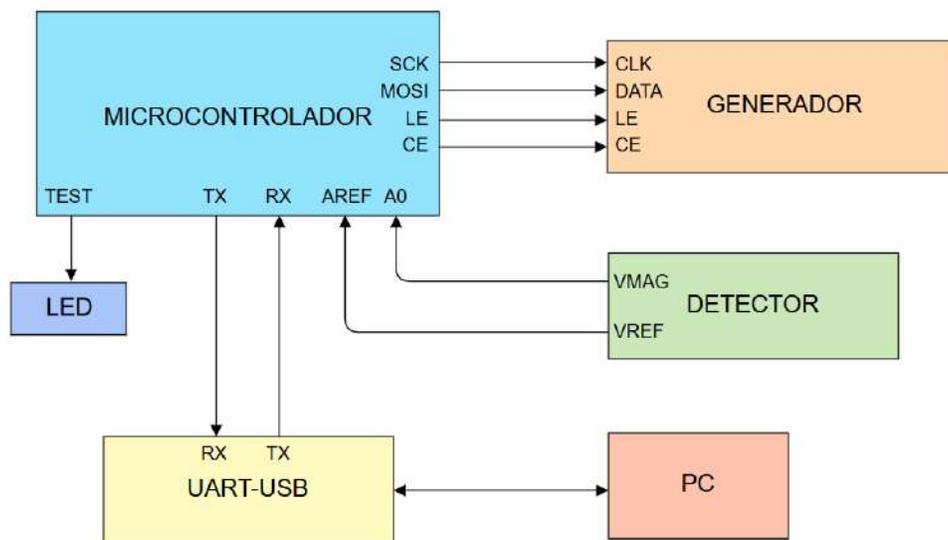


Figura 3.3: Diagrama de interconexión de los módulos del roímetro.

El led de test tiene como finalidad realizar pruebas de depuración del firmware utilizado para programarlo. Para este proyecto se utiliza en conjunto con el led de enganche del PLL del módulo generador, para tener una indicación visual del tiempo de procesamiento de microcontrolador por cada barrido.

3.1.1.3. Fuente regulada

Para alimentar el dispositivo conformado por la placa microcontrolador-detector y el generador se integra al diseño de la placa de una fuente regulada del tipo Buck, por su eficiencia energética y simplicidad. Inicialmente se contempló la utilización de una fuente lineal, pero las exigencias de corriente del dispositivo hacían necesaria la disipación térmica y expandían las dimensiones del diseño previsto más de lo esperado, motivo por el cual se decidió optar por una fuente conmutada para este proyecto.

Para el diseño de la fuente conmutada se utilizó el circuito integrado LM2596-5.0 [5], que es la versión de salida con tensión fija de Texas Instrument. Para el diseño se implementó el siguiente circuito que se encuentra en la hoja de datos del integrado:

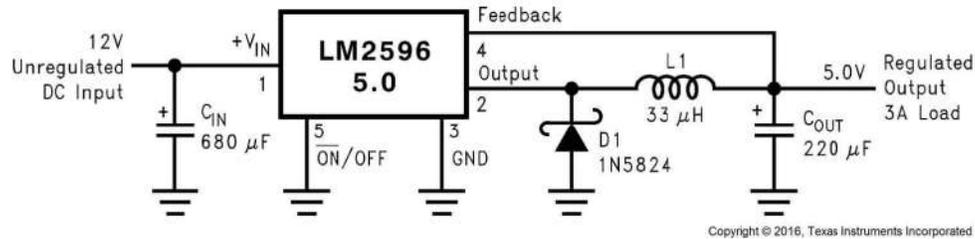


Figura 3.4: Circuito esquemático para la fuente regulada de 5V fijos.

Los valores de diseño utilizados para la bobina y condensadores no fueron del valor exacto que está indicado en el diagrama, ya que se reutilizaron componentes de un módulo funcional con el que ya se contaba, pero que utilizaba la versión ajustable del mismo regulador. Las diferencias respecto al diagrama sugerido por el fabricante son las siguientes:

- $C_{in} = 100\mu F$
- $L1 = 470\mu H$

En relación con el condensador C_{in} , el principal desafío es el filtrado de la señal de entrada en caso de utilizar una fuente no regulada. Sin embargo, al emplearse una fuente de alimentación AC/DC de 12V como alimentación principal, con una salida altamente estable y un nivel de ripple bajo, la selección del condensador de entrada no representó una limitación significativa para el diseño ni afectó el desempeño de la fuente. En lo que respecta al inductor L_1 , para fuentes de alimentación del tipo Buck, el valor seleccionado corresponde a un diseño sobredimensionado. Esto representa una ventaja desde el punto de vista del rendimiento, ya que el componente opera por debajo de sus límites máximos especificados. Consecuentemente, se mejora la capacidad de manejo de corriente en la salida.

3.1.1.4. Diseño esquemático y PCB

Para el diseño del PCB se tuvieron en cuenta las recomendaciones de diseño del fabricante.

- Plano de tierra para reducir el ruido y asegurar un retorno de corriente adecuado.
- Pistas cortas y directas para minimizar pérdidas y desadaptaciones.
- Impedancia controlada para evitar reflexiones.
- Condensadores de desacoplo cerca de la fuente de alimentación y de las entradas de alimentación de los circuitos integrados.
- Condensadores de acoplo en las entradas RF para evitar cualquier componente de continua
- Terminación adecuada de impedancias.

Los trazos de entrada de la señal de RF se diseñaron para tener una impedancia característica $Z_0=50\Omega$. Para el cálculo de los mismos se utilizarán las ecuaciones de diseño de guía de onda coplanar con plano de masa [6].

Una vez definidos los parámetros de fabricación, se realizó el diseño esquemático de la placa empleando la versión académica del software de diseño Altium Designer, como se ilustra en la Figura 3.5. Cabe destacar el agradecimiento a Altium por proporcionar acceso a esta herramienta, la cual facilitó significativamente el desarrollo de este proyecto.

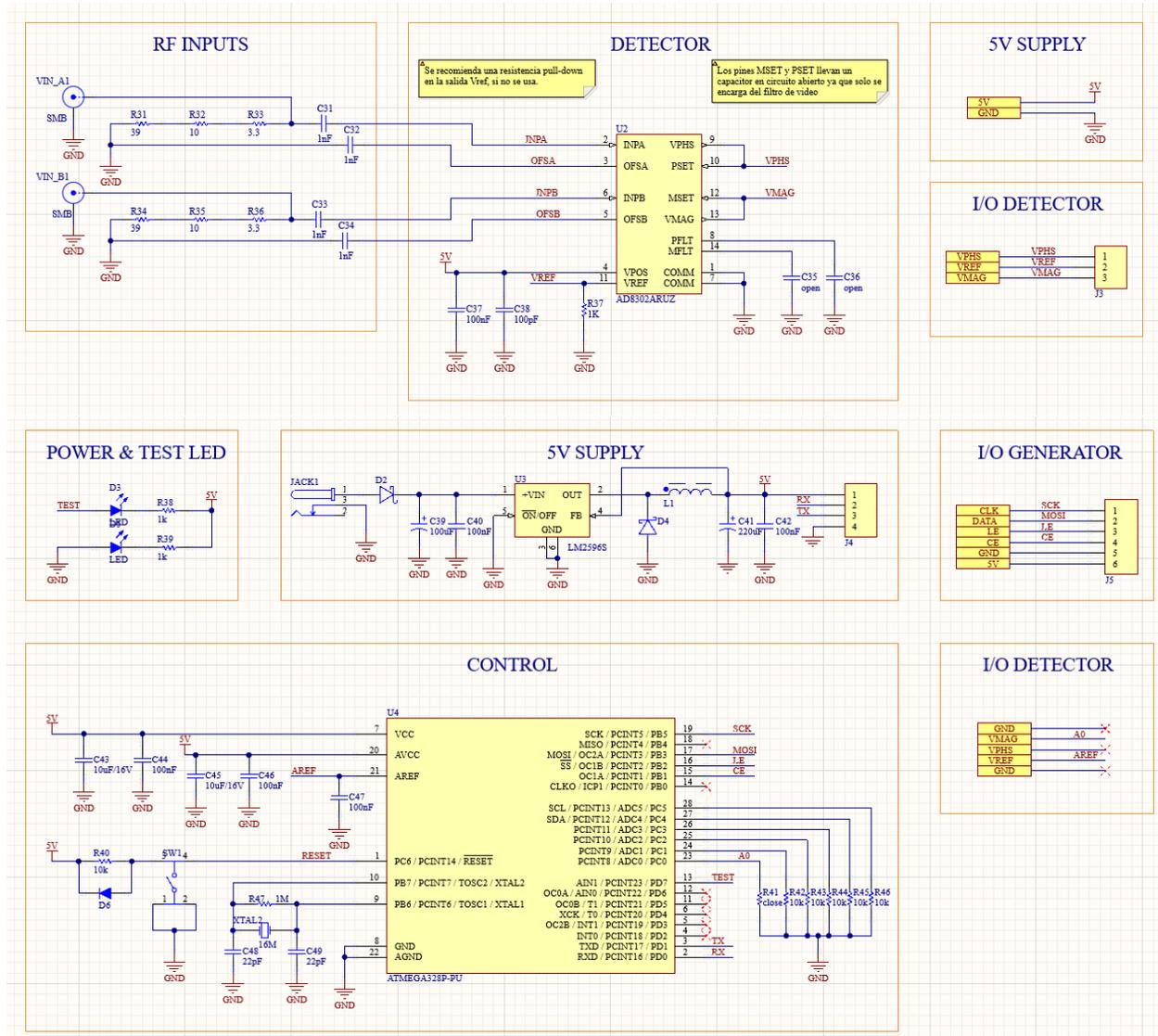
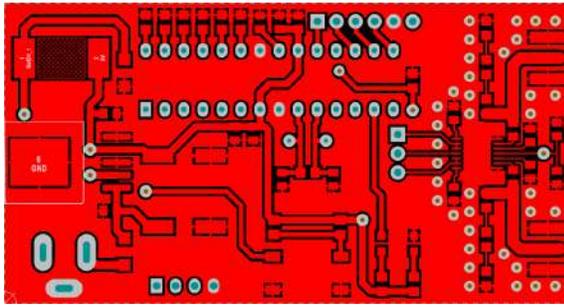


Figura 3.5: Diagrama esquemático de la placa microcontrolador-detector.

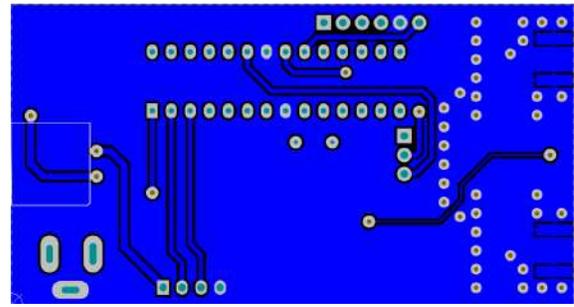
Para el diseño del circuito detector, se optó por una impedancia de entrada de $52,3\Omega$, como se especifica en la hoja de datos. La mayoría de los componentes para este proyecto fueron reutilizados de las placas adquiridas para las pruebas preliminares. En el caso específico del detector, la placa de prueba ya contaba con una resistencia SMD de $52,3\Omega$ y con una tolerancia del 1 %, por lo que no fue necesario realizar el ajuste resistivo que aparece en el diagrama de la Figura 3.5. Esto se debió a que la configuración inicial propuesta permitía obtener la impedancia requerida utilizando valores comerciales.

En este diseño, se consideraron las recomendaciones del fabricante antes mencionadas. Dado que se utilizó una fuente conmutada, se decidió ubicar los componentes susceptibles de generar interferencias, tanto de la fuente regulada como del oscilador de cristal requerido para el microcontrolador, lo más alejado posible de la etapa de entrada del detector. Esta disposición busca minimizar las posibles perturbaciones electromagnéticas en las señales de entrada.

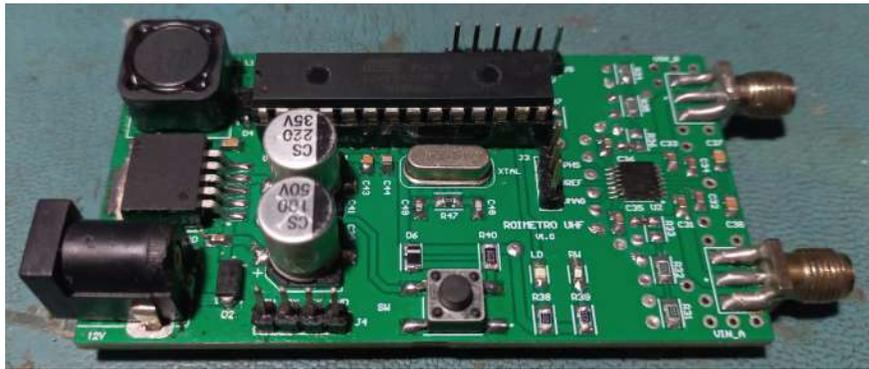
En la Figura 3.6 se observa el diseño terminado de la placa microcontrolador-detector.



(a) Diseño de la capa superior.



(b) Diseño de la capa inferior.



(c) PCB ensamblada.

Figura 3.6: Diseño PCB del módulo microcontrolador-detector.

3.1.2. Módulos complementarios

Se incorporaron una serie de módulos necesarios para conformar el banco de medición propuesto. Su elección y funcionalidades se detallan en el Apéndice C. A continuación se hace mención de algunos de los aspectos más importantes de cada uno de ellos:

3.1.2.1. Generador

Este bloque es el encargado de sintetizar las frecuencias necesarias para realizar el barrido en frecuencia del roímetro. El ADF4351 [14] es un circuito integrado que por sus prestaciones y utilización en otros proyectos resulta adecuado para este desarrollo.

Sus principales características son:

- Amplio rango de frecuencias de salida (35-4400MHz)
- Bajo ruido de fase y bajo jitter, lo que resulta de utilidad para conseguir señales de salida con menor distorsión
- Programación de registros a través de interfaz SPI
- Nivel de potencia de salida programable

Diagrama esquemático y PCB

Para este proyecto, se desarrolló el diseño esquemático y el PCB del generador. Sin embargo, con el fin de simplificar las pruebas iniciales y evitar posibles complicaciones relacionadas con la soldadura del componente integrado, especialmente del ADF4351, cuyo encapsulado es 32-VFQFN, se optó por utilizar el kit de evaluación comercialmente disponible como plataforma de pruebas. Esta decisión permitió agilizar el proceso de validación del diseño, minimizando el riesgo de comprometer la integridad del componente durante las primeras fases del proyecto.

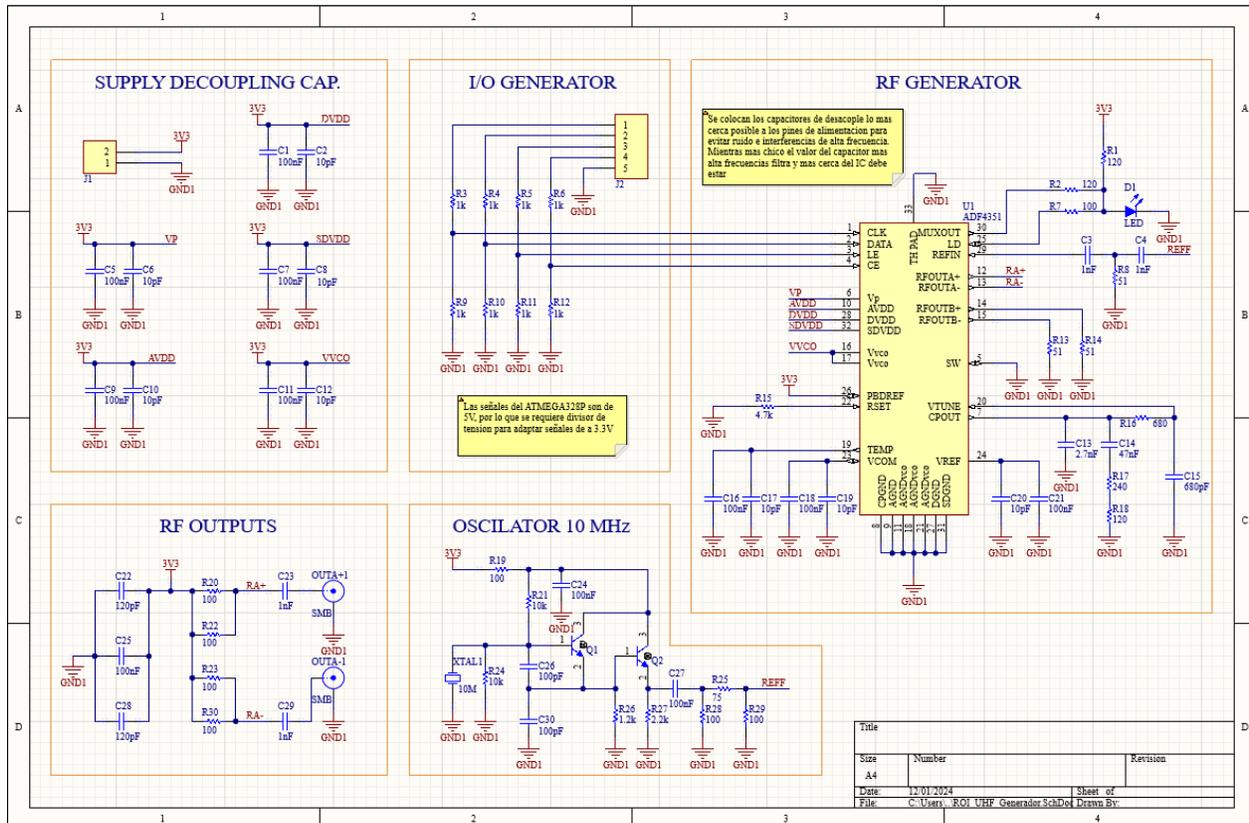
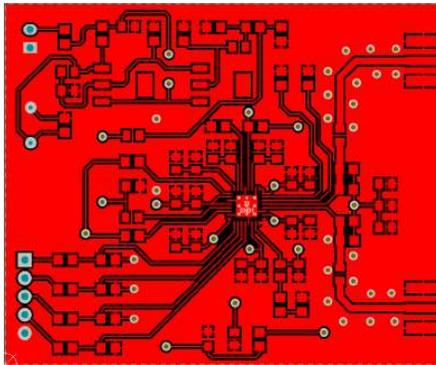
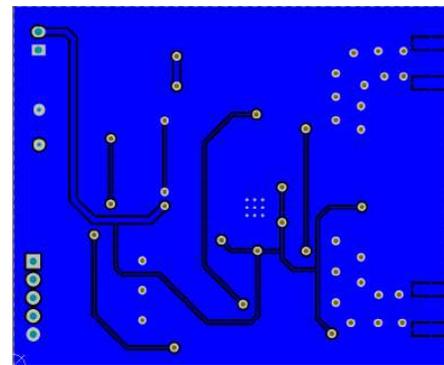


Figura 3.7: Diagrama esquemático del generador.

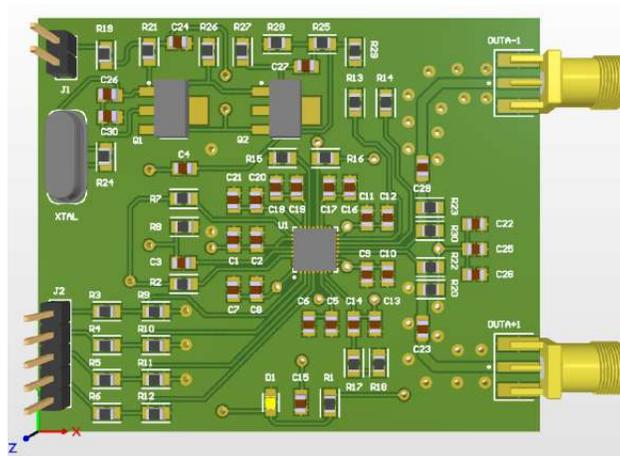
El diseño del bloque generador se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de diseño de la placa microcontrolador-detector, dado que ambos trabajan con señales de RF. En este contexto, se garantizó que las señales fueran de impedancia controlada, a fin de evitar desajustes que pudieran comprometer la integridad de la transmisión.



(a) Diseño de la capa superior.



(b) Diseño de la capa inferior.



(c) Diseño 3D.

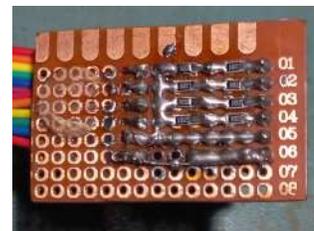
Figura 3.8: Diseño PCB del generador.

3.1.2.2. Divisor resistivo

Este módulo fue desarrollado como resultado de una modificación en el diseño original. Se debía diseñar el bloque completo del generador, aunque no estaba previsto que se fabricara. Sin embargo, durante el diseño de la placa microcontrolador-detector, se cometió un error al no incluir el divisor resistivo especificado en el diseño del generador. Este arreglo resistivo no estaba integrado en la placa adquirida y por este motivo, fue necesario implementar este módulo mediante una placa experimental, lo que permitió agilizar su construcción, y para conservar las dimensiones se utilizaron resistencias SMD. El objetivo del módulo, además de reducir la tensión de 5V a 3,3V para poder comunicarse con el generador, es llevar dos pines adicionales de 5V y GND que proveen alimentación a la placa del generador.



(a) Vista superior del divisor.



(b) Vista inferior del divisor.

Figura 3.9: Diseño del divisor.

3.1.2.3. Acoplador bidireccional

Para poder separar las señales incidente y reflejada necesarias para el cálculo de ROE buscado, se requiere de un dispositivo capaz de separar dichas señales. Para ello se hizo uso del acoplador HP778D [15] provisto por el Laboratorio de Comunicaciones (LAC). Las características de este acoplador son tratadas en detalle en el Apéndice B.



Figura 3.10: Acoplador bidireccional HP778D utilizado para el roímetro.

3.1.2.4. Módulo de comunicación

Para la conexión entre el microcontrolador y la PC se hizo uso de un módulo de comunicación UART a USB. La comunicación se realiza a través del puerto serie utilizando el estándar RS232 (EIA 232). Los pines Rx y Tx están directamente conectados a los pines UART del microcontrolador para establecer la comunicación.

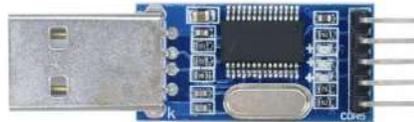


Figura 3.11: Conversor USB-UART.

3.2. Desarrollo del Firmware

El firmware del microcontrolador de la placa controlador-detector se programó en lenguaje C/C++, utilizando la herramienta de desarrollo gratuita Arduino IDE. El microcontrolador funciona en modo esclavo, es decir, una vez establecida la comunicación con la interfaz gráfica únicamente recibe datos y responde a las solicitudes enviadas por el usuario a través de la interfaz. En la Figura 3.12 se detalla el algoritmo implementado, donde cada tarea realizada por el microcontrolador se desarrolló en el Apéndice C.

- Inicializar generador y configurar parámetros de barrido en frecuencia
- Lectura y procesamiento de datos del detector
- Comunicación con la interfaz gráfica

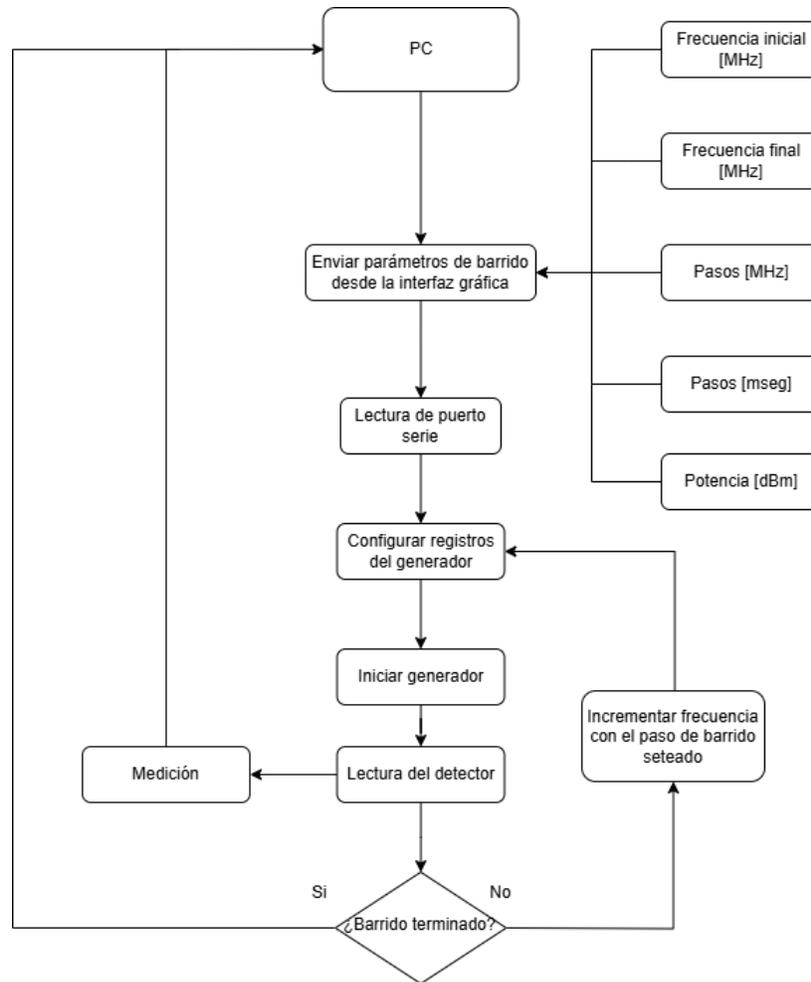


Figura 3.12: Diagrama de flujo del algoritmo del microcontrolador.

3.3. Desarrollo del Software

La interfaz cuenta con una ventana donde el usuario podrá configurar los parámetros de barrido y seleccionar los gráficos a visualizar. También se evaluarán todas las condiciones de validación de parámetros, para evitar cualquier error en los datos ingresados y poder corregirlos antes de ser enviados al microcontrolador.

3.3.1. Interfaz gráfica

El desarrollo de esta interfaz se realizó en lenguaje Python por su practicidad y diversidad de módulos que permiten una implementación completa y sencilla de las funcionalidades requeridas. Esta interfaz devuelve dos tipos de resultados:

- **Resultados gráficos:** Luego de efectuar el barrido en frecuencia indicado por el usuario, se devuelven dos gráficos, seleccionables, que dan información de la ROE obtenida en el rango de barrido y el valor de VMAG, que es el parámetro que devuelve el detector. Este último tiene más utilidad como parámetro de referencia al calibrar y depurar el programa, ya que permite identificar discrepancias en las lecturas.
- **Resultados numéricos:** En simultáneo con los gráficos obtenidos se obtienen los parámetros de valores mínimos, máximos y de posición del cursor de ambas gráficas. Esto permite la rápida identificación de máximos y mínimos en los gráficos, o valores que son de particular interés para al momento de evaluar la frecuencia óptima de funcionamiento de un dispositivo o identificar problemas de desadaptación.

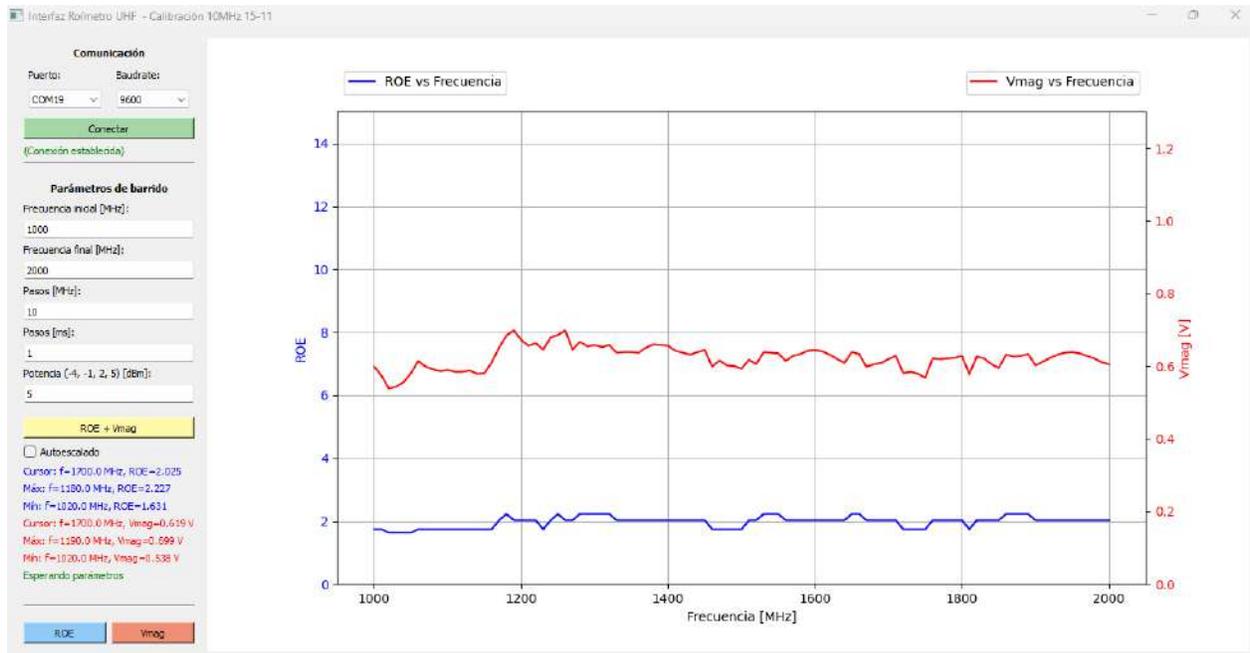


Figura 3.13: Interfaz gráfica del roímetro.

Los parámetros que el usuario puede configurar son los siguientes:

- **Comunicación:** Se puede seleccionar el puerto COM y baudrate y luego pulsar el botón conectar para comprobar que la conexión se estableció exitosamente.
- **Parámetros de barrido:** El usuario puede configurar los parámetros de barrido para el cálculo de la ROE. Para ello cuenta con casillas donde puede ingresar los valores de: frecuencia inicial, frecuencia final, pasos en tiempo y frecuencia y la potencia de la señal. Estos parámetros están acotados y la interfaz notificará cuando alguno de ellos esté fuera de los valores permitidos.
- **Botones y leyendas:** La interfaz cuenta con tres botones para seleccionar los gráficos, la opción de auto escalado de ejes e información de los gráficos como valor máximo, mínimo y valor del cursor.

3.3.2. Lectura y procesamiento de datos

El microcontrolador recibe los datos de la interfaz gráfica desde el puerto serie, setea los valores en el generador, inicia la lectura del detector y cada valor leído se envía de nuevo a la interfaz gráfica, donde los valores son almacenados en listas que incrementan su longitud con cada valor de Vmag leído para cada una de las frecuencias generadas. De esta forma, al finalizar el barrido, se procesan y grafican todos los valores almacenados en estas listas. Esto se hace para que la mayor carga computacional esté sobre la PC, ya que, de otra forma, dadas las limitaciones del microcontrolador, los tiempos de barrido se incrementarían notablemente.

En la Figura 3.14 se muestra el flujo que siguen los datos desde que son ingresados hasta su visualización en la interfaz. El detalle de este proceso está documentado en el Apéndice C.

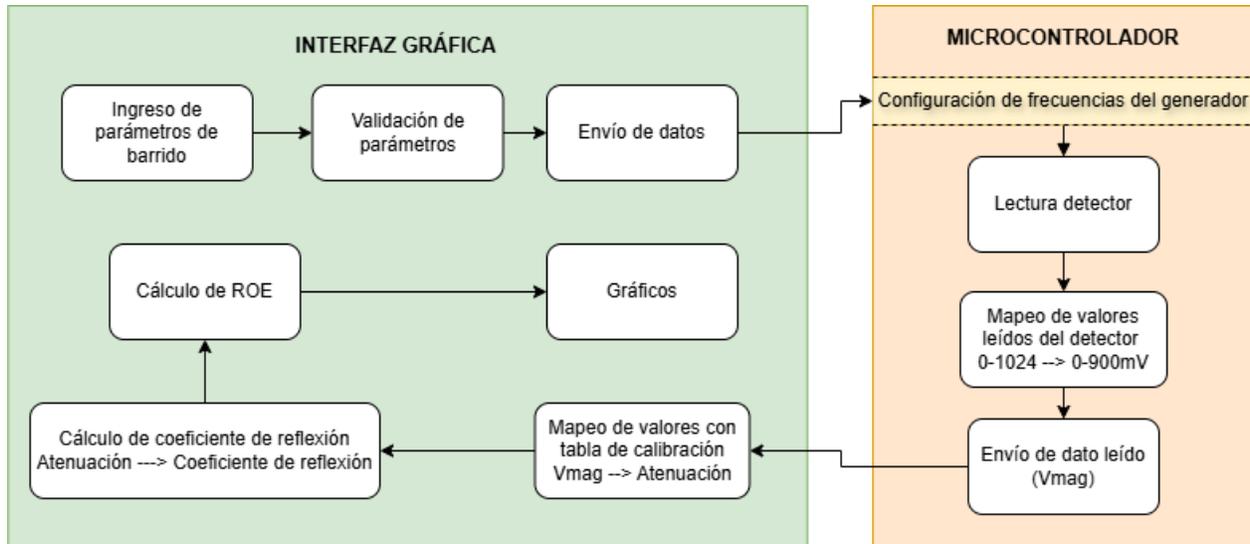


Figura 3.14: Diagrama de procesamiento de datos leídos por el detector.

3.3.3. Calibración

Este proceso requirió múltiples iteraciones debido a que fue el que presentó mayores desafíos. Esto no se debió tanto al procedimiento en sí, sino a las discrepancias identificadas en las lecturas obtenidas durante las pruebas realizadas luego de construir el dispositivo. Estos aspectos se analizan con mayor detalle en el capítulo correspondiente a los Resultados.

Para la calibración del dispositivo se intercalan atenuadores en el camino de la señal reflejada, de manera de poder tener pares de valor (Vmag, Aten) para cada valor de frecuencia. Se implementó el siguiente banco de trabajo y se utilizaron dos atenuadores variables con pasos de 1dB y 10dB atenuación respectivamente.

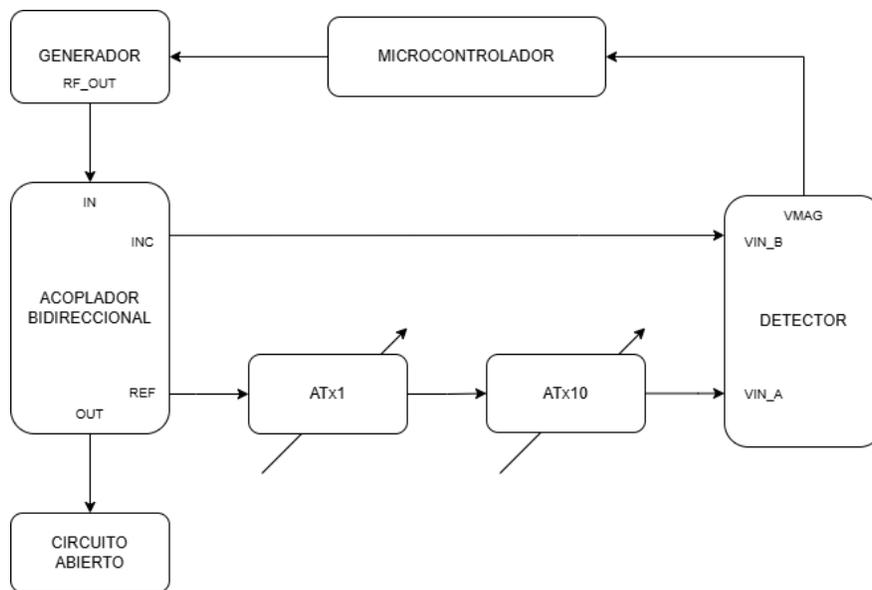


Figura 3.15: Banco de trabajo utilizado para la calibración.

3.4. Desarrollo de la estructura

El soporte principal es un compartimento para la disposición de las placas que consta de una base plástica que permite la fijación segura de estas a una estructura sólida. El objetivo es optimizar el uso del espacio disponible, garantizando un diseño compacto y facilitando tanto el montaje como el mantenimiento de los componentes. Además, se implementaron conectores que permiten desmontarlo fácilmente para su revisión y realizar mediciones durante las pruebas.

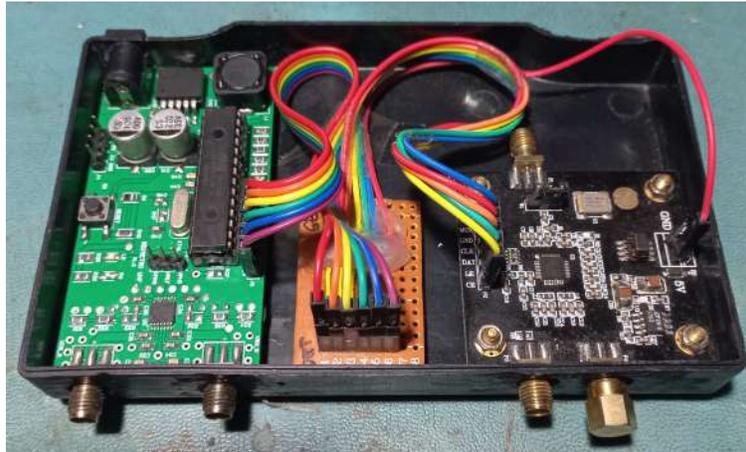


Figura 3.16: Disposición de módulos.



Figura 3.17: Panel frontal.



Figura 3.18: Base de apoyo.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Pruebas

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron una serie de pruebas en diferentes etapas para poder comprobar el funcionamiento de los bloques que componen el instrumento. Estas pruebas fueron realizadas siguiendo el Plan de Pruebas planteado en el Apéndice D y otras fueron consecuencia de ajustes en el dispositivo. A continuación, se presentan algunos de los resultados finales más relevantes que permiten visualizar el funcionamiento del instrumento completo.

4.1.1. Verificación de diseño de la placa adquirida

Tanto el módulo detector como el generador fueron placas adquiridas en el exterior, en la plataforma Aliexpress [7] que sirvieron para las pruebas iniciales y para la reutilización de sus componentes, como fue el caso del módulo detector. Si bien se contaba con la hoja de datos del AD8302, no se contaban con detalles técnicos del diseño de la placa adquirida, que es un factor determinante en este tipo de proyectos debido a las posibles desadaptaciones que podrían existir y su influencia en los resultados obtenidos. Por esta razón, se realizó ingeniería inversa y algunas comprobaciones, que no forman parte estrictamente del Plan de Pruebas diseñado para este instrumento, sino que surgen de la elección tomada respecto a la reutilización de componentes de placas ya ensambladas:

- **Verificación de valores de los componentes en la placa:** Se realizó una inspección visual y medición en placa de los valores de los componentes utilizados. Las resistencias SMD fueron rápidamente identificadas y medidas, pero de los condensadores no se tenía información, por lo que se midieron y se cotejaron con los valores sugeridos por el fabricante del AD8302, para ver si estaban dentro de los valores contemplados para el diseño. Esto fue verificado correctamente.
- **Verificación de trazas PCB:** En este caso, solo se pudo hacer una estimación basada en la medida de las trazas y el tipo de sustrato utilizado. Esta comprobación se realizó con calibre para tener una medida lo más aproximada posible y se obtuvieron los datos del ancho de traza y separación, que fueron ingresados a una calculadora online [10] para obtener la impedancia a partir de estos parámetros, resultando en un valor que se encontraba dentro de los valores esperados. Esto, en conjunto con la caracterización de la respuesta en frecuencia, fue de utilidad para comprobar principalmente la adaptación de impedancia fuera correcta.

4.1.2. Verificación de curva del detector

Realizada la verificación anterior, obteniendo los resultados esperados, se procedió a la medición de la respuesta real de la curva del detector. Este procedimiento se hizo tanto para la placa comprada como para la que se fabricó, cuyo procedimiento es similar al utilizado para la calibración, el cual se está documentado en el Apéndice D.

Para esta medición se usó el siguiente banco de pruebas:

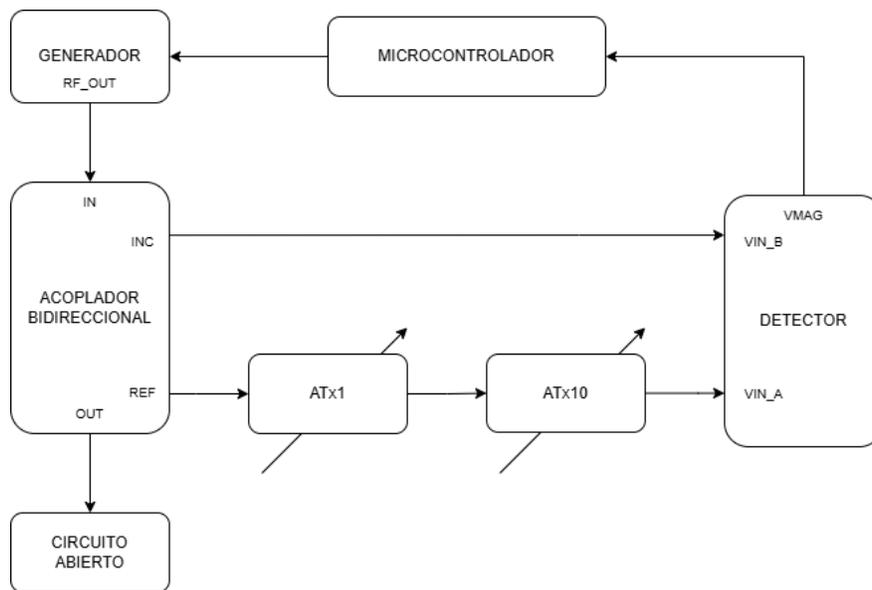


Figura 4.1: Banco de pruebas utilizado para la medición de la curva del detector.

El procedimiento para obtener la curva de respuesta es el siguiente:

- Se realiza un primer barrido en frecuencia (de 1 a 2GHz) con ambos atenuadores en 0dB y se mide la Vmag obtenida para cada valor de frecuencia. Para este caso se utilizaron pasos de frecuencia de 10MHz.
- Se repite el barrido en frecuencia para cada paso de atenuación. Se midió en el rango de 0-30dB, con pasos de 2dB.
- Con los dos pasos anteriores se creó una tabla en Excel que contenía todos los valores de Vmag en función de la frecuencia y la atenuación seleccionada.

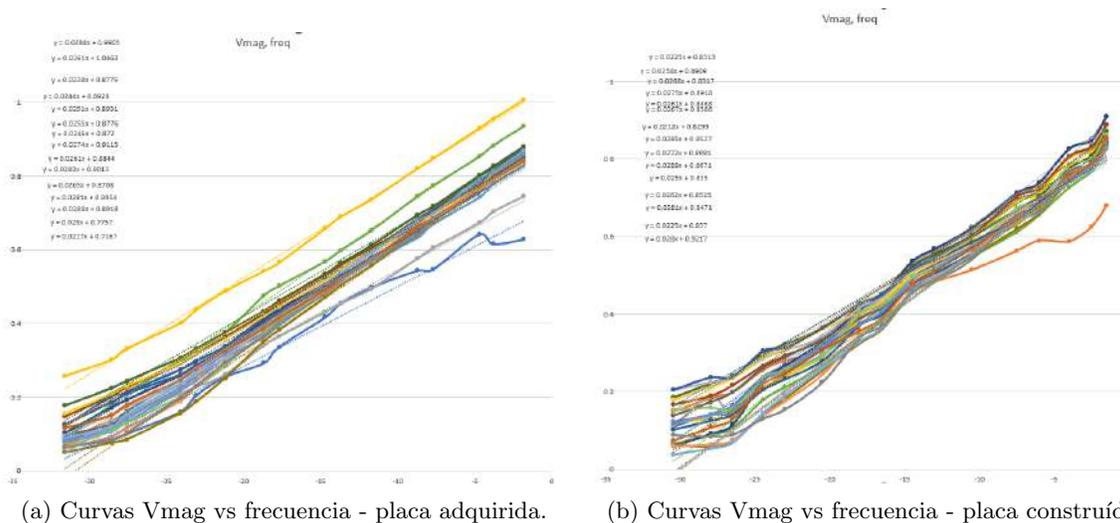


Figura 4.2: Curvas de respuesta del detector para todos los pasos de atenuación.

Un análisis cualitativo de las curvas obtenidas permite observar una dispersión menor en los resultados obtenidos en la placa construida, respecto de la placa adquirida, lo que indica una mejora respecto al banco utilizado para las mediciones y pruebas iniciales. A partir de estas curvas, se realiza un promedio y se obtiene una estimación de la curva real del detector para ambos casos, obteniendo los siguientes resultados.

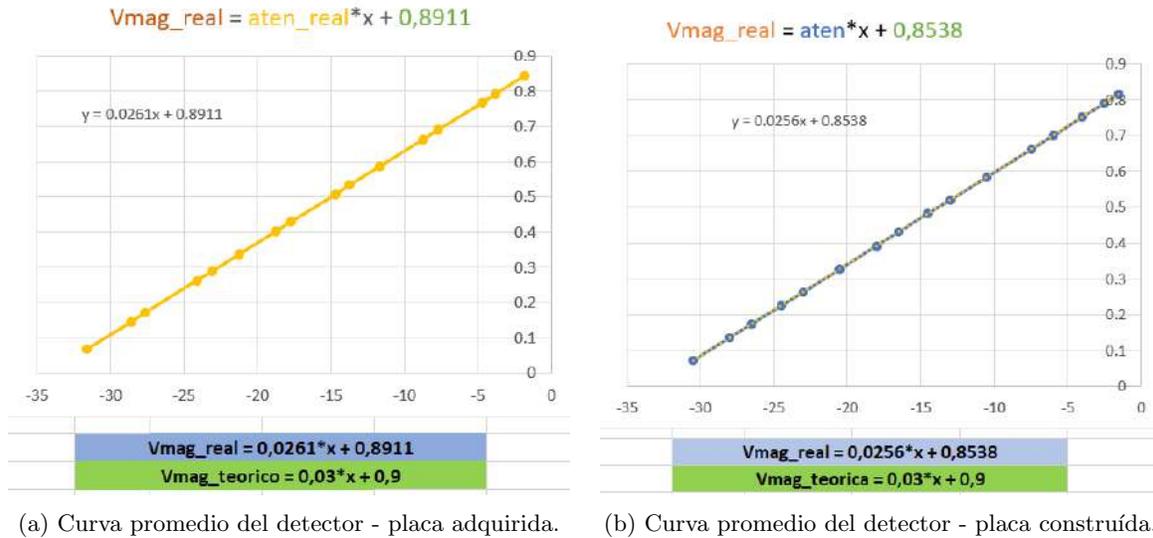


Figura 4.3: Curvas promedio del detector.

En este caso, si bien se aprecia una curva de respuesta de la placa adquirida que tiende a ajustarse más a los valores ideales, la diferencia es mínima y al tratarse de un promedio, solo es una estimación en la que la diferencia de respuestas no tiene implicancias significativas en los resultados obtenidos.

4.1.3. Calibración

Una vez terminada la construcción del dispositivo se realizó el procedimiento de calibración, necesario para realizar las mediciones y obtener la ROE del sistema bajo prueba.

Para la calibración del dispositivo se intercalan atenuadores en el camino de la señal reflejada, utilizando el mismo banco de prueba de la Figura 4.1 empleado para determinar la curva de respuesta del detector, con la única diferencia que ahora los pasos de atenuación son de 1dB para poder tener la mayor resolución posible en la tabla de calibración resultante. Mediante este método se obtiene una tabla con pares de valores (V_{mag} , A_{ten}) para cada valor de frecuencia. A continuación, se detalla el procedimiento de calibración:

- Con ambos atenuadores en 0dB, se realiza un barrido en frecuencia de 1 a 2GHz y se mide la V_{mag} obtenida para cada valor de frecuencia. Para este caso se utilizaron pasos de frecuencia de 10MHz.
- Se repite el barrido en frecuencia para cada paso de atenuación. Se midió en el rango de 0-30dB, con pasos de 1dB.
- Con los dos pasos anteriores se creó un diccionario en Python, que será utilizado por la interfaz gráfica para hallar el valor de atenuación correspondiente para cada V_{mag} leído, en función de la frecuencia actual.

Esta fue una de las etapas en las que se requirió un número mayor de iteraciones debido a discrepancias en las lecturas que se obtenían en las pruebas, las cuales se analizan en detalle en la sección de Mediciones.

4.1.4. Mediciones

Luego de la calibración, y para probar el rango dinámico de funcionamiento del dispositivo, se midieron dos cargas que representan los valores extremos de la tabla. Es importante mencionar que para todas las mediciones realizadas, la salida no utilizada del generador se cargo con 50Ω para evitar reflexiones que pudieran afectar los resultados. En primer lugar se midió en circuito abierto, que representa una reflexión total y, por lo tanto, señales incidente y reflejada de aproximadamente la misma magnitud, resultando en un valor de ROE máximo. Por otro lado, una carga de 50Ω que indica una adaptación total, obteniendo el mínimo valor de ROE posible.

En la Figuras 4.4 y 4.5 se pueden ver los resultados de estas mediciones, resultando en los valores esperados.

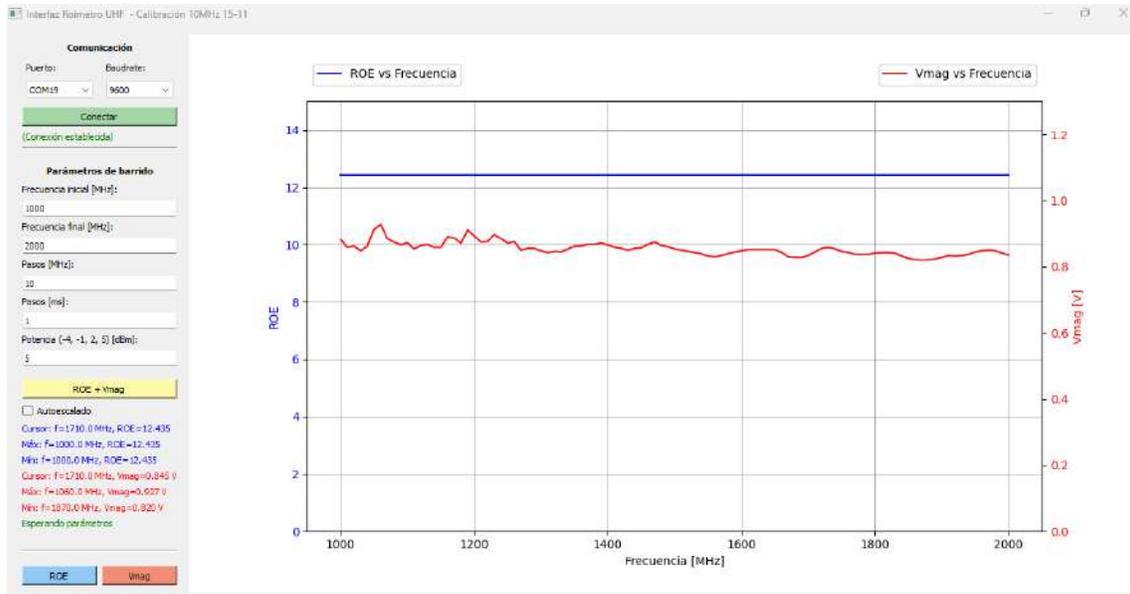


Figura 4.4: Respuesta del roímetro para circuito abierto.

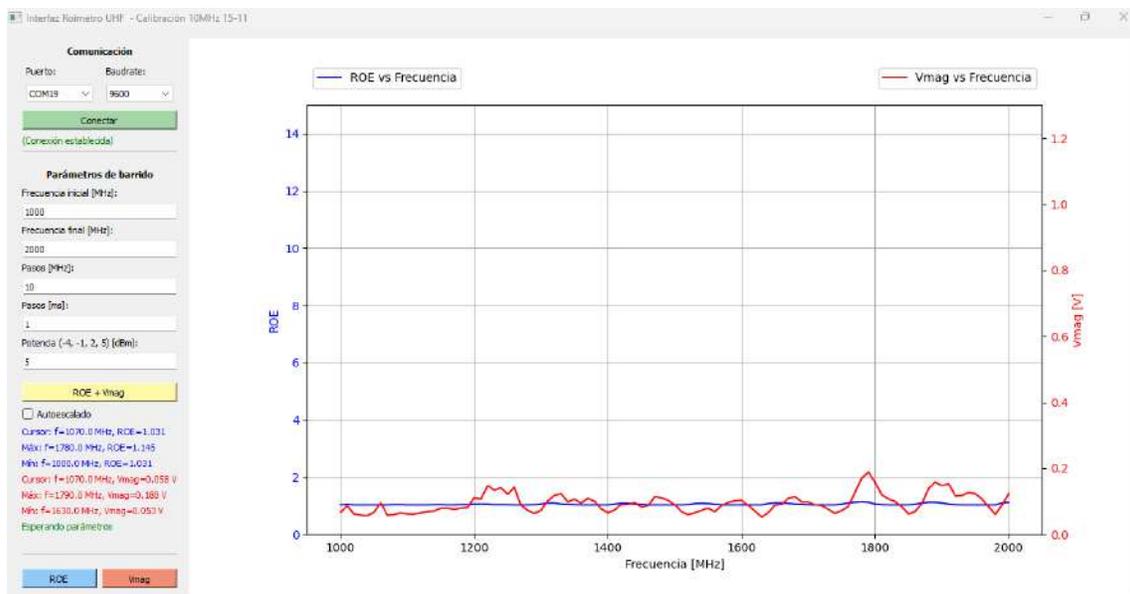


Figura 4.5: Respuesta del roímetro para circuito adaptado (50Ω).

4.1.4.1. Errores en las mediciones

Luego de la calibración y mediciones de algunas cargas de prueba comenzaron a observarse errores sistemáticos en la medición de ROE que no estaban presentes en las pruebas iniciales y se acentuaban en el rango de frecuencias de 1000 a 1500MHz aproximadamente, donde se observaban saltos en las lecturas que no se correspondían con los valores esperados. Esta discrepancia en la lectura se acentuaba cuanto mayor era el valor de ROE teórico. A continuación, se muestran algunos de estos resultados.

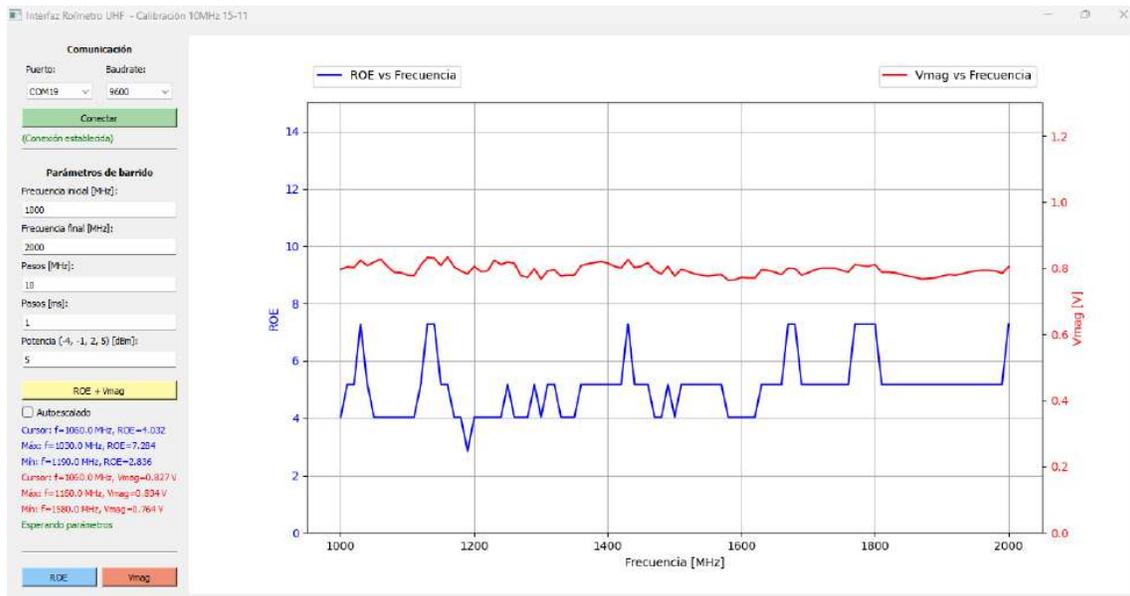


Figura 4.6: Error acentuado en bajas frecuencias con carga de 10Ω - $ROE_{teórica} = 4,88$.

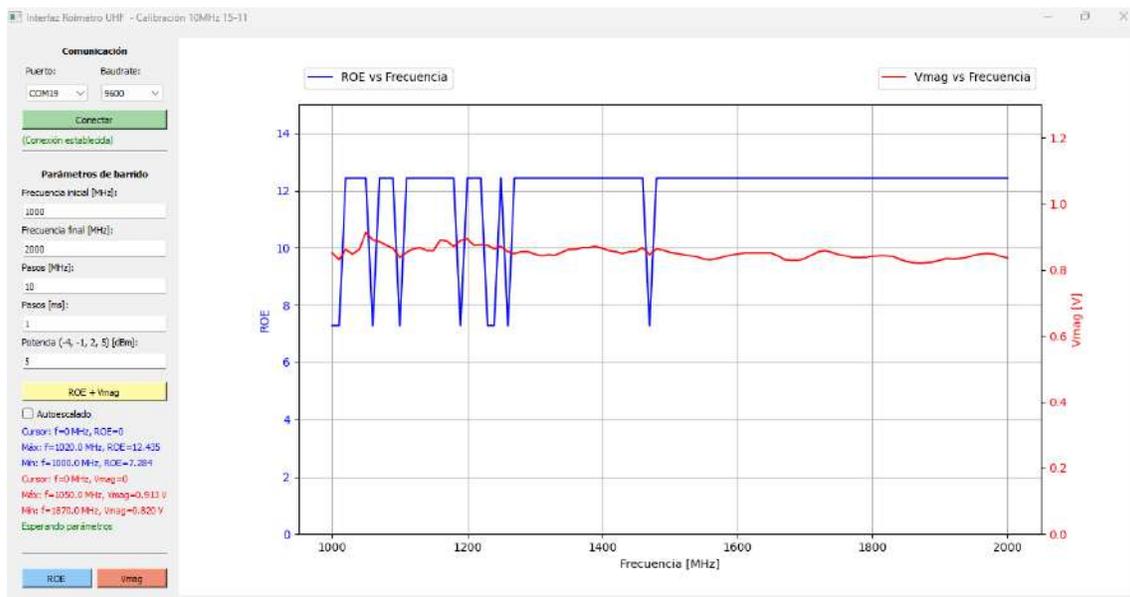


Figura 4.7: Error en bajas frecuencias con carga de $10k\Omega$ - $ROE_{teórica} = 199$ (limitada por el rango dinámico).

Frente a esta situación, se implementaron una serie de medidas destinadas a identificar la fuente del error, dado que, al tratarse de errores sistemáticos, su caracterización permitiría realizar las correcciones necesarias en las mediciones obtenidas.

4.1.4.2. Determinación de la fuente de error

A continuación, se presentan, en el orden de su ejecución, las hipótesis formuladas para determinar la fuente de error y las acciones implementadas para su validación.

- Error en la calibración
- Cargas de prueba defectuosas
- Falla del módulo generador
- Falso contacto de los conectores de los atenuadores y/o acoplador

Error en la calibración

La primera hipótesis de error fue suponer una mala calibración, ya sea por algún desajuste mecánico en el banco de calibración, como por algún error al momento de la creación de la tabla de Python. Si bien se automatizaron estos procesos para evitar este tipo de errores, dado el tamaño de la tabla/diccionario implementado en el código podría haberse cometido un error en esta etapa.

Se probaron tablas de calibración para todo el rango de frecuencia en pasos de 1, 10 y 100MHz. Tablas con pasos de 1MHz presentaban el mismo comportamiento, pero su elaboración demandaba tiempos más prolongados, ya que se trataban de tablas de 31000 filas y 31 columnas, en su formato sin procesar, dado que para cada valor de atenuación (31 en total) se realizaba un barrido con la resolución deseada, resultando en 1000 pares de valores por cada valor de atenuación.

Frecuencia [MHz]	Vmag [V], Atenuación [dB]			
1000	0.0108, 1.2	0.0521, 2.2	[...]	0.8521, 32.1
1001	0.0182, 1.2	0.0146, 2.2	[...]	0.8854, 32.1
1002	0.1558, 1.2	0.1521, 2.2	[...]	0.8956, 32.1
[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
1998	0.1131, 1.2	0.1221, 2.2	[...]	0.8796, 32.1
1999	0.0918, 1.2	0.1571, 2.2	[...]	0.8554, 32.1
2000	0.1248, 1.2	0.1518, 2.2	[...]	0.9157, 32.1

Tabla 4.1: Formato de la tabla de calibración con pasos de 1MHz.

Para descartar esta posibilidad se probó reiteradas veces todo el proceso de calibración, ajustando metodología de toma de datos, aumentando y minimizando la resolución de la tabla y el error seguía siendo sistemático, aunque en ocasiones, con dispersiones menores. Por lo cual se adoptó el valor intermedio de pasos de 10MHz para minimizar el tiempo de calibración en las comprobaciones, ya que este proceso debe realizarse siempre que se modifiquen las condiciones iniciales del banco de calibración propuesto.

Cargas de prueba defectuosas

La siguiente comprobación, dado que los errores continuaban, fue verificar los conectores y soldaduras de las cargas de prueba. Esta conjetura se fundamenta en el hecho de que, en repetidas ocasiones, la lectura del roímetro variaba al realizar un ajuste mecánico más preciso de la carga. Dado que estos elementos se utilizaron en otros proyectos, era factible el deterioro mecánico de las mismas.

En este proceso se encontraron fallas en dos de las cuatro cargas de prueba utilizadas. Esto se debía principalmente a desajustes mecánicos que provocaban que el componente resistivo SMD soldado hiciera un falso contacto al momento de la conexión. Esto debido al deterioro por el uso, ya que los pines SMA no tienen la rigidez mecánica que otros utilizados (como los tipo-N). Si bien estas fallas significaban un error a la hora de realizar las pruebas, se corroboró que no estaban directamente relacionadas con los saltos en los valores leídos en la banda inferior de frecuencias.

Para solucionarlo se resoldaron las resistencias SMD y en otro caso se elaboró una nueva carga de prueba ya que el desajuste mecánico del conector, que se hizo visible luego de desarmarlo completamente, no permitía volver a tener una soldadura confiable para las pruebas. En ese caso, se utilizó un conector SMA con un ángulo de 90° lo que le confirió mayor rigidez al momento de utilizarlo para las mediciones.

Falla del módulo generador

Descartadas las dos hipótesis anteriores se consideró la posibilidad de un funcionamiento incorrecto del módulo generador, ya que este se adquirió a través de la plataforma Aliexpress [7] y no se contaba con un diseño esquemático del mismo ni datos técnicos, más que los proporcionados por la hoja de datos del fabricante del ADF4351.

Ante esta hipótesis se realizaron las siguientes comprobaciones:

Cambio del módulo generador completo: El Laboratorio de Comunicaciones (LAC) proporcionó una placa utilizada en un Glucómetro, que era funcional e implementaba el mismo circuito integrado ADF4351, utilizado en un proyecto anterior. Por esta razón, gracias a la modularidad del dispositivo diseñado se pudo reemplazar este bloque completo para realizar las pruebas. Cabe destacar que este módulo, a diferencia del que se había adquirido, ya tenía los divisores de tensión incorporados en la placa, por lo que se realizó la conexión de los pines de comunicación de la placa microcontrolador-detector de forma directa.

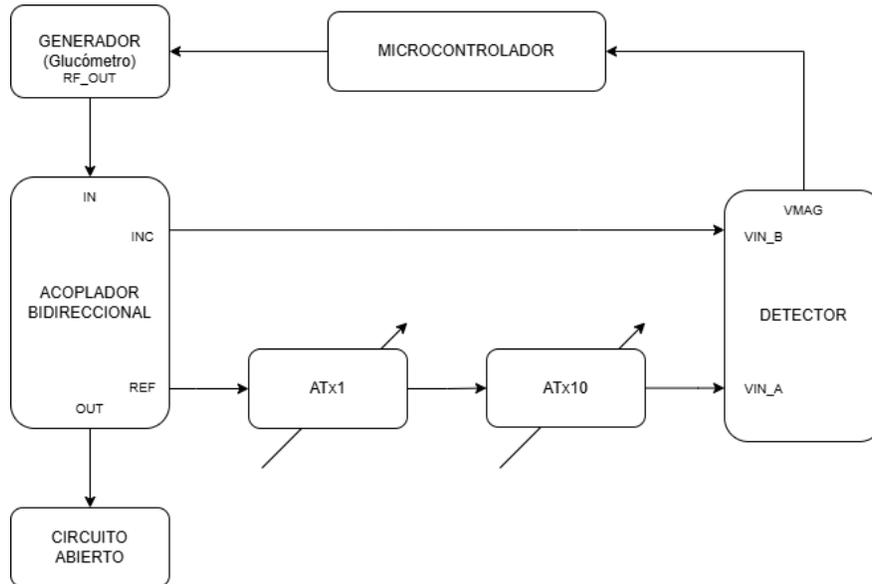


Figura 4.8: Banco de medición utilizado para el generador de prueba.

Se realizó nuevamente todo el proceso de calibración con este nuevo módulo y cuando se realizaron las mediciones se observó una leve disminución de los errores de las lecturas en baja frecuencia y algunos errores adicionales en altas frecuencias debido a desadaptaciones de la placa de prueba, pero esencialmente con el mismo comportamiento. Por esta razón, se descartó que el generador utilizado para las pruebas tuviera un mal funcionamiento y se realizaron las siguientes comprobaciones con el módulo generador inicial.

Cambio de la frecuencia de referencia del generador utilizado: El módulo generador utilizado, cuenta con la posibilidad de usar una referencia interna o externa para la síntesis de frecuencias. Dado que la prueba con el generador del glucómetro implementaba un oscilador Colpitts de 10MHz, se decidió realizar el proceso de calibración y todas las mediciones con una referencia de 10MHz, modificando el firmware del microcontrolador para que el generador responda a la nueva frecuencia de referencia. Se implementó el banco de la Figura 4.9.

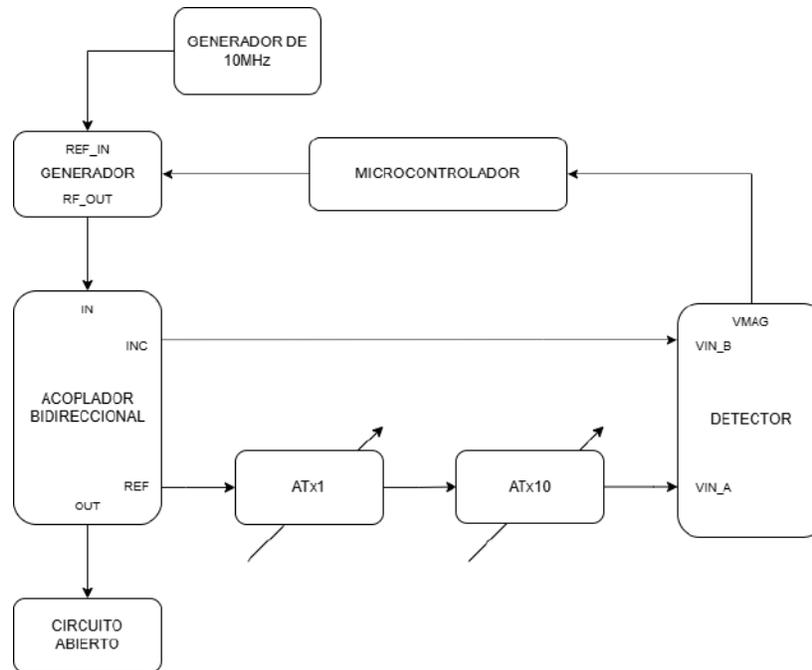


Figura 4.9: Banco de medición utilizado con $f_{\text{ref}} = 10\text{MHz}$ para el generador.

No se observaron mejoras respecto a las mediciones realizadas con el banco de prueba original, por lo que se decidió seguir utilizando la referencia de 100MHz que trae incorporada la placa adquirida.

Revisión del código de la librería implementado: Al no observarse mejoras notables, el siguiente paso fue revisar errores en el código del firmware implementado para la configuración de los parámetros del generador. Existía la posibilidad de una combinación no óptima de los parámetros, así como un error de procesamiento, por lo que en primer lugar se realizaron las mismas mediciones con tiempos de establecimientos mayores, de manera de asegurar el correcto seteo de los datos del generador, si fuera esa la fuente de error.

Por otro lado, para la comunicación con el generador se implementó una librería externa que se modificó inicialmente para las pruebas, ya que no respondía a los requerimientos inicialmente buscados. En esta instancia se analizó todo el código utilizado para la escritura de los registros del generador, utilizando como referencia el software [11] provisto por Analog Devices para la configuración de los parámetros de cada registro del ADF4351, que es el mismo que se utilizó para las pruebas iniciales. Se encontró que la combinación de registros, si bien generaba las frecuencias deseadas, no era la óptima en términos de lo que el software indicaba. Por ello se realizó la modificación completa y se añadieron más sentencias condicionales para eliminar cualquier fuente de error que pudiera estar enmascarada en dicho código.

Luego de realizar las mediciones, no se observaron mejoras y los errores persistían.

Falso contacto de los contactos de los atenuadores y/o acoplador Habiendo realizado todas las comprobaciones anteriores sin obtener una mejora sustancial, se presenta un falso contacto al momento de realizar unas de las mediciones que no tenía que ver con los cables utilizados. Se realiza un pequeño ajuste mecánico y se obtiene una medición sin errores en circuito abierto, que es donde tenía mayor incidencia tenía el error. Se verifica que dos conectores de los atenuadores utilizados para la calibración estaban teniendo un falso contacto. Adicionalmente se encuentran falsos contactos en el conector de salida del acoplador, que es un adaptador tipo-N a SMA y que es consecuente con las fallas que se tenían al cambiar las cargas, ya que constantemente se modificaban estos parámetros, tanto para la calibración como la posterior medición.

De esta manera se lograron identificar dos de los errores que más implicancia tenían en las lecturas obtenidas. Se resuelve cambiar todos los conectores necesarios, y en el caso de los atenuadores, se reemplaza la unión entre estos utilizado un cable tipo-N sin adaptadores para una conexión más robusta. Luego se realiza una medición completa de todo el banco de pruebas a través del analizador de espectro, de manera de comprobar la planicidad de la respuesta en frecuencia en el rango de trabajo del roímetro.

4.1.4.3. Mediciones de ROE

A continuación, se presentan los resultados de las mediciones realizadas con las cargas de pruebas, implementando las mejoras y soluciones antes analizadas. Se utilizaron cargas SMA proporcionadas por el LAC para estas mediciones. Los valores utilizados son: 10Ω, 50Ω, 100Ω, 10kΩ y circuito abierto. En cada medición se muestran los gráficos de ROE y Vmag en simultáneo.

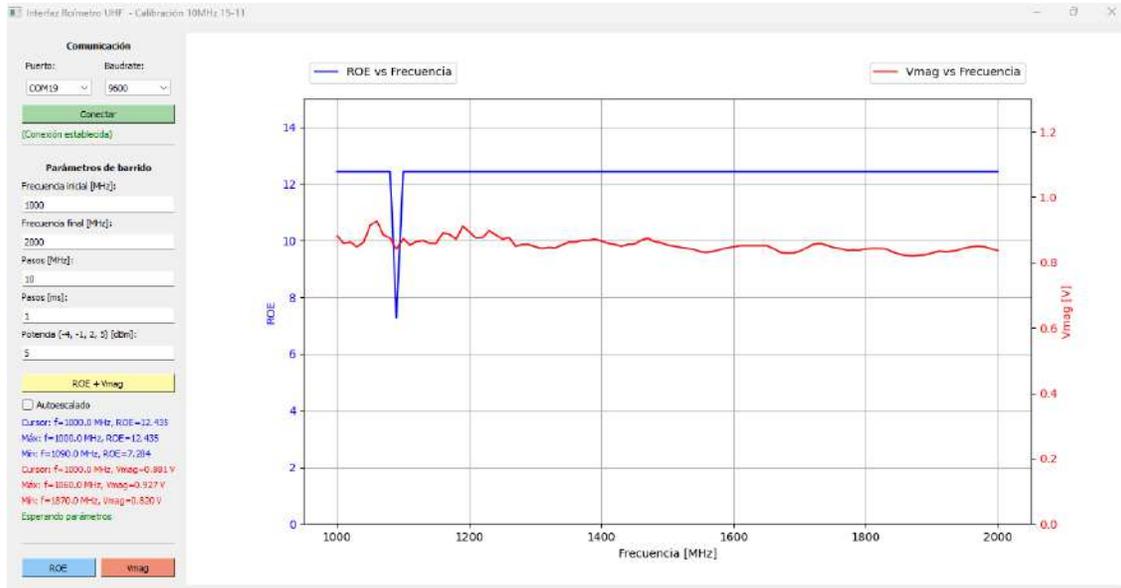


Figura 4.10: Medición de circuito abierto (desadaptación) - $ROE_{teórica} = inf.$

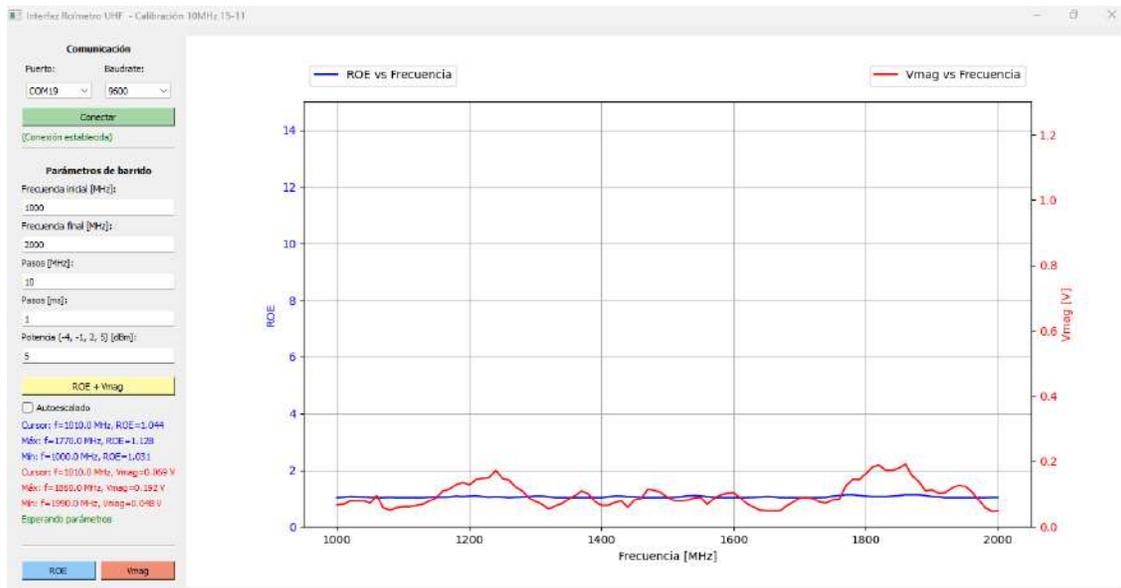


Figura 4.11: Medición de carga de 50Ω (adaptado) - $ROE_{teórica} = inf.$

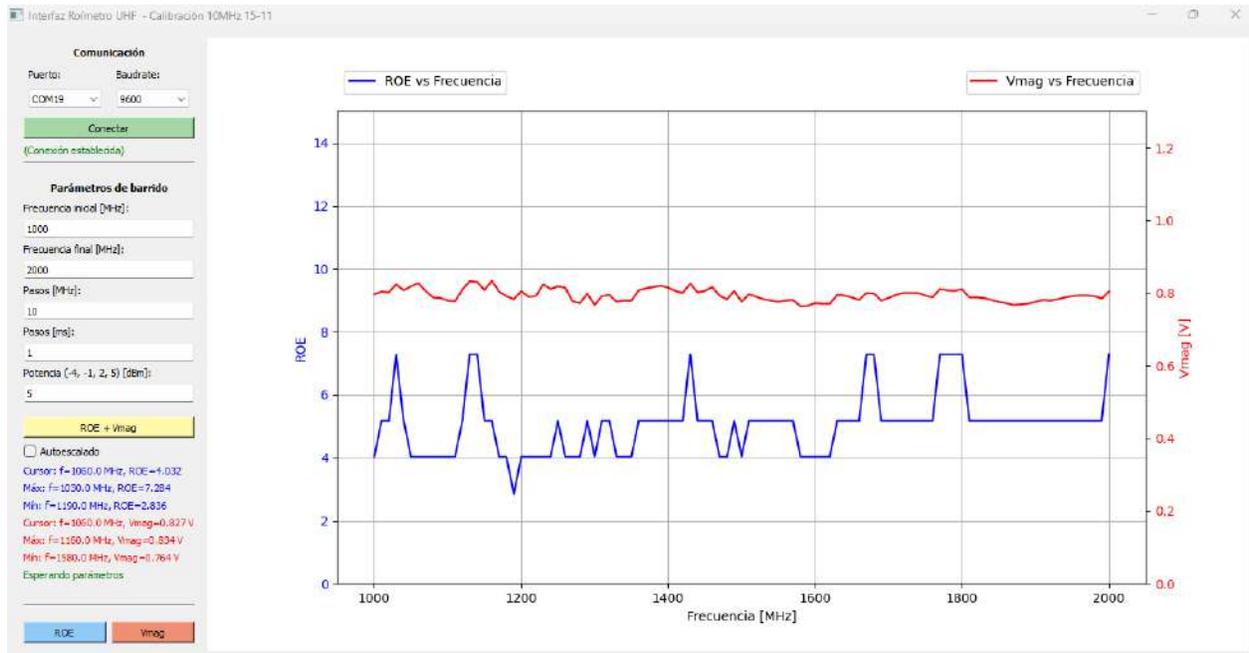


Figura 4.12: Medición de carga de 10Ω - $ROE_{teórica} = 4,88$.

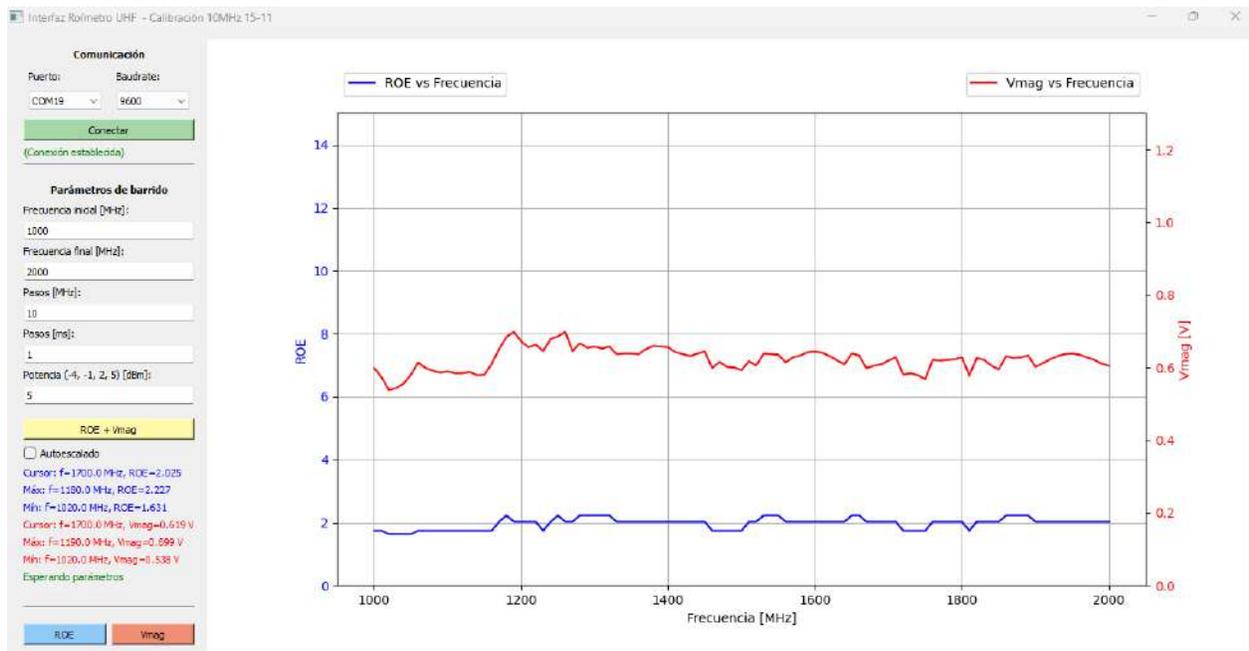


Figura 4.13: Medición de carga de 100Ω - $ROE_{teórica} = 1,98$.

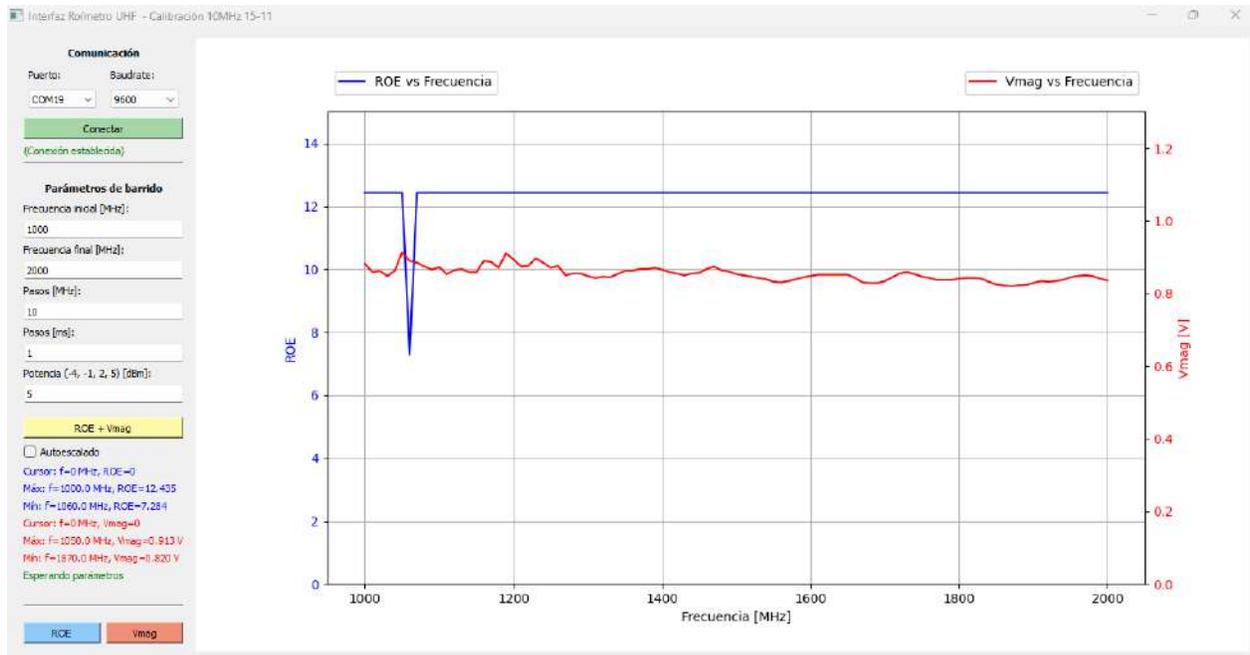


Figura 4.14: Medición de carga de $10k\Omega$ - $ROE_{teórica} = 199$.

El rango máximo de medición está limitado principalmente por las características técnicas del detector. En particular, el piso de ruido de este, en conjunto con las pérdidas de inserción de los cables y conectores fijaran un valor mínimo del coeficiente de reflexión que se traduce en el máximo valor de ROE que se puede obtener, dado por la fórmula C.14 del Apéndice C de Especificaciones Técnicas.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones del instrumento

En este proyecto se diseñó y desarrolló un instrumento de medición de ROE que opera en el rango de funcionamiento requerido. Para ello se utiliza un banco de medición que consta de módulos adicionales para completar su funcionalidad.

Uno de los principales desafíos de este proyecto se presentó al final de su construcción, ya que a medida que se desarrollaban las pruebas para evaluar la calidad de las mediciones realizadas, se observaban valores erráticos en la banda inferior del rango de frecuencias de diseño. Se plantearon y validaron numerosas hipótesis para resolver el inconveniente. Se comenzó desde las hipótesis más simples de verificar hasta las más improbables, resultando estas últimas en el principal motivo por el que se obtenían mediciones fuera de los valores esperados. Este inconveniente implicó una modificación de casi todos los módulos involucrados en el banco de medición, llegando al punto de verificar el funcionamiento de instrumentos de laboratorio, tales como el acoplador bidireccional y los atenuadores, que son sumamente confiables por su uso constante en el LAC y sus características técnicas.

En esta línea, fue que se detectaron falsos contactos en los conectores y adaptadores, tanto de los atenuadores como del acoplador bidireccional, afectando las mediciones de manera sistemática, pero con el componente aleatorio del movimiento/modificación mecánica del mismo. Esto generaba que prácticamente en cada calibración que se realizaba, luego de implementar alguna mejora, se vieran afectadas las condiciones iniciales del banco provocando inconsistencias en las mediciones y dificultando encontrar la fuente de error predominante.

Los resultados tuvieron una mejora sustancial tras la implementación de los ajustes, aunque todavía se observaban pequeños valles en las mediciones a circuito abierto. Estas variaciones abruptas y puntuales dan cuenta de que pequeñas fluctuaciones en las mediciones de la magnitud del detector generan un salto importante en los gráficos. Se observó, además, que la discrepancia en los valores leídos aumentaba a medida que el valor esperado (o teórico) de ROE se incrementaba. Este comportamiento se atribuye a la relación exponencial existente entre la magnitud leída por el detector y la atenuación asociada, lo que genera saltos más significativos cuanto mayor es el valor de ROE.

5.1.1. Mejoras a implementar

Considerando este escenario, se plantean optimizaciones que podrían incrementar significativamente la calidad de los resultados obtenidos.

Cabe mencionar que, en el proceso de determinación de la fuente de error, se utilizó un módulo atenuador programable de RF, con un ancho de banda de operación de hasta 4GHz que, si bien no tenía la misma planicidad en frecuencia que los atenuadores utilizados, tenía la posibilidad de generar pasos de atenuación menores, del orden de 0,5dB. Se decidió incorporarlo al banco de pruebas, solo para comprobar la hipótesis anterior y realizar la calibración con este dispositivo. Lo que se obtuvo fueron lecturas donde se tenía una mejor resolución para mayores valores de ROE, aunque con la desventaja de una respuesta en frecuencia menos plana.

A partir de esta situación, se proponen las siguientes mejoras:

- **Rutina de promediado:** En el algoritmo para el cálculo de la ROE, el microcontrolador obtiene el valor de V_{mag} del detector y determina la atenuación correspondiente utilizando una tabla de calibración que relaciona V_{mag} con atenuación. El proceso asigna un valor de atenuación al V_{mag} leído basándose en el valor más cercano disponible en la tabla de calibración. Sin embargo, la ausencia de valores intermedios de atenuación genera saltos abruptos en el cálculo de la ROE. Esto significa que pequeños cambios en V_{mag} producen grandes variaciones en la ROE, debido a la relación exponencial entre ambas magnitudes, y estos saltos se acentúan aún más cuanto mayor es el valor de ROE.

Para mitigar este problema, se propone implementar un algoritmo de interpolación que permita estimar la atenuación de manera más precisa. Este enfoque no asignaría el V_{mag} al valor más cercano en la tabla, sino que calcularía un valor interpolado de ROE basado en el V_{mag} medido, mejorando la continuidad y precisión de los resultados.

- **Aumentar el rango dinámico del dispositivo:** Haciendo uso del mismo detector, una posible mejora sería incorporar un amplificador RF en el camino de la señal reflejada, permitiendo así excursionar en los valores positivos de la curva de respuesta del detector, es decir, aquellos donde la señal reflejada es mayor que la incidente. Esta mejora permitiría aprovechar el rango completo del detector, que son 60dB, para lograr lecturas más precisas. También implicaría una modificación del firmware para adecuarse a estos cambios.
- **Calibración con paso de atenuación menores:** Adicionalmente, si se utilizaran atenuadores con pasos de 0,5dB, como se mencionó anteriormente, se podrían obtener valores intermedios, principalmente en atenuaciones mayores, lo que permitiría reducir a la mitad la magnitud de los valles observados en las Figuras 4.10 y 4.14.

5.2. Conclusiones de la gestión del proyecto

El proyecto inició en el año 2021, habiéndose completado las clases del Seminario de Proyecto Final durante ese mismo año, dictadas de manera virtual debido a las restricciones impuestas por la pandemia de COVID-19. Durante gran parte del desarrollo, el avance se limitó principalmente a tareas de investigación y pruebas específicas, dado que las restricciones laborales redujeron significativamente el tiempo disponible para dedicarle al proyecto. No fue sino hasta principios de este año que se logró asistir presencialmente de manera más regular al laboratorio, lo que marcó un punto de inflexión para acelerar la finalización del trabajo. En este contexto, se realizó un esfuerzo adicional por ajustar los tiempos y maximizar la eficiencia de las actividades, intentando compatibilizar la disponibilidad laboral con los horarios del laboratorio.

Para llevar a cabo este proyecto, se estima un tiempo total invertido de unas 1540 horas, distribuidas como se muestra en la siguiente gráfico, a partir de las etapas del proyecto definidas en el diagrama de Gantt mostrado en la Figura 2.2.

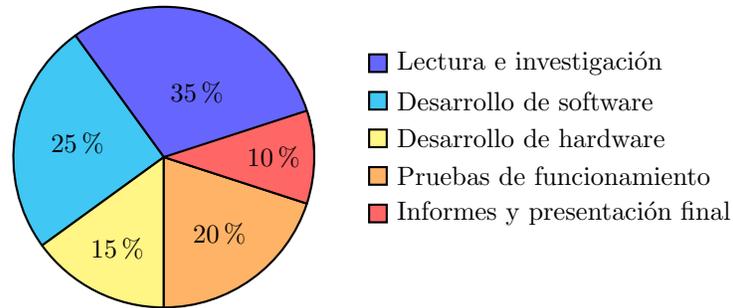


Figura 5.1: Distribución porcentual del tiempo invertido en cada etapa del proyecto.

5.3. Conocimientos aplicados y adquiridos

El inicio del proyecto implicó una planificación detallada de las tareas, donde, aunque los objetivos estaban claramente definidos, en algunos casos no se disponía con certeza cuales eran las herramientas más adecuadas para alcanzarlos. Esto implicó la readecuación constante del plan de trabajo propuesto inicialmente. Dado el contexto laboral que acompañó el desarrollo de este trabajo, se redistribuyeron las horas disponibles, principalmente al inicio del proyecto, hacia la adquisición y comprensión de los conceptos técnicos necesarios y algunas pruebas específicas.

Por medio de este proyecto se han adquirido conocimientos en diseño de circuitos de RF, fabricación de PCB's en software específico, soldadura de componentes SMD, programación de microcontroladores en C/C++, programación en Python, escritura en LaTeX y prácticas de ingeniería inversa para analizar los módulos adquiridos que no tenían información previa, así como la reutilización de componentes de placas ya ensambladas, concepto que fue importante para poder adquirir los componentes necesarios para el proyecto, minimizando costos, y que se convierte en una buena práctica cuando no se cuenta con la disponibilidad local de los mismos. También resultó un gran valor agregado la experiencia adquirida en la gestión del proyecto, planificación y ejecución del mismo para alcanzar los objetivos planteados, delimitándolos dentro de un marco razonable, para poder llevarlos a cabo. Los problemas que surgieron principalmente en la etapa final del proyecto desafiaron los conocimientos sobre el dispositivo que se estaba desarrollando y los conceptos involucrados, razón por la cual, gracias a la formación adquirida, se pudieron resolver generando un valor agregado importante en el futuro desarrollo como profesional.

Bibliografía

- [1] Santiago Colusso. *Roímetro para UHF con ancho de banda extendido, Especificación de Requerimientos*. 2024
- [2] Santiago Colusso. *Roímetro para UHF con ancho de banda extendido, Especificación Funcional*. 2024
- [3] Santiago Colusso. *Roímetro para UHF con ancho de banda extendido, Especificación Técnica*. 2024
- [4] Gantt Project. *Free desktop project management software*. <https://www.ganttproject.biz/>. 2024
- [5] Texas Instrument. *LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator*. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>. 2024
- [6] Brian C Wadell. *Transmission line design handbook*. Artech House Microwave Library. 1991. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>. 2024
- [7] Aliexpress. *Online Shopping*. <https://es.aliexpress.com>. 2024
- [8] JLCPCB. *PCB Manufacturing & Assembly Capabilities*. <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities>. 2024
- [9] JLCPCB. *High-quality PCB manufacturing services*. <https://jlcpcb.com>. 2024
- [10] Cheamandy Electronics. *Coplanar wave guide with ground*. https://chemandy.com/calculators/microstrip_transmission_line_calculator.htm. 2024
- [11] Analog Devices. *ADF4350/ADF4351 Evaluation Board Software*. https://www.analog.com/media/en/evaluation-boards-kits/evaluation-software/ADF435x_v4_5_0.zip. 2024
- [12] Analog Devices. *RF/IF Gain and Phase Detector*. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8302.pdf>. 2024
- [13] Microchip. *8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash*. https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ProductDocuments/DataSheets/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. 2024
- [14] Analog Devices. *Wideband Synthesizer with Integrated VCO*. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF4351.pdf>. 2024
- [15] Keysight. *Keysight 778D Dual Directional Coupler*. <https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-01344/user-manuals/9018-01344.pdf?success=true>. 2024

Apéndice A

Especificación de requerimientos

A.1. Introducción

Este documento corresponde al diseño y desarrollo de un Roímetro para UHF con ancho de banda extendido, que se realiza como proyecto sugerido del Laboratorio de Comunicaciones (LAC) de la UNMDP. El objetivo del mismo es poder realizar una medición de la relación de onda estacionaria (ROE) de un sistema. En este sentido, el dispositivo inyecta una señal que varía en frecuencia para poder determinar la ROE de un sistema bajo prueba, permitiendo caracterizarlo y corregir problemas de eficiencia de potencia, acoplamiento de impedancias y demás parámetros de interés.

A.2. Proyecto

A.2.1. Resumen

Se propone el diseño y desarrollo de un dispositivo que sea capaz de medir la relación de onda estacionaria (ROE) de un sistema bajo prueba, usando circuitos integrados comerciales y técnicas de reflectometría.

A.2.2. Definiciones, acrónimos y abreviaturas

Nombre	Descripción
RF	Requerimiento Funcional
RNF	Requerimiento No Funcional
ROE	Relación de onda estacionaria
VHF	Very High Frequency (Frecuencia muy alta)
UHF	Ultra High Frequency (Frecuencia ultra alta)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso)

A.3. Problemas de investigación

A.3.1. Surgimiento de la idea de investigación

La idea del proyecto surge como una necesidad del Laboratorio de Comunicaciones. Esto se da en el marco del estudio de sistemas y medios de transmisión que requieren adaptar sus impedancias para poder mejorar la transferencia de energía. Para poder obtener información de la calidad de esta adaptación se requiere conocer de la respuesta del sistema en un rango de frecuencias de interés, y evaluar la señal reflejada obtenida, la cual nos brindara información de qué tan bien adaptado está el sistema para una carga dada. Este parámetro de interés se conoce como Relación de Onda Estacionaria (ROE) y para obtenerlo es necesario inyectar una señal de amplitud y frecuencia conocidas, y observar la amplitud y fase de la señal reflejada obtenida bajo ciertas condiciones de carga.

- **Cliente:** Ingenieros del Laboratorio de Comunicaciones (UNMDP/CONICET)
- **Beneficiario:** Personal del laboratorio de comunicaciones (profesores y alumnos)

A.3.2. Perspectiva del producto

Se requiere un dispositivo capaz de generar una señal de entrada, separar las componentes de onda incidente y reflejada del sistema bajo prueba, y medir las magnitudes respectivas, con el fin de evaluar el nivel de adaptación del sistema. Para ello se propone el diseño y desarrollo de un equipo basado en circuitos integrados comerciales capaces de medir estos parámetros y presentarlos al usuario de manera clara y precisa, mediante el diseño de una aplicación para poder leer los datos obtenidos en la medición.

A.3.3. Funciones

El dispositivo debe ser capaz de medir magnitud y fase de la señal incidente y reflejada en el rango de UHF (0,3-3GHz). Para este proyecto se desea operar en las frecuencias que van de 1GHz a 2GHz (con posibilidades de extender el rango), y se espera que el dispositivo sea capaz de representar de forma clara la señal medida. Si bien la medición de fase no es un parámetro relevante en el cálculo de la ROE, sería de utilidad disponer de esta característica para proyectos futuros, pero dado que esto excede al alcance del proyecto no será un objetivo a tener en cuenta en la implementación. Para su construcción, se dispone de un circuito generador de señal, un circuito detector, un microcontrolador para realizar los cálculos y representar la información medida, un acoplador bidireccional para poder tomar muestras de la señal incidente y reflejada y una interfaz gráfica que permita ingresar parámetros y leer los resultados obtenidos.

A.3.4. Diagrama del dispositivo propuesto

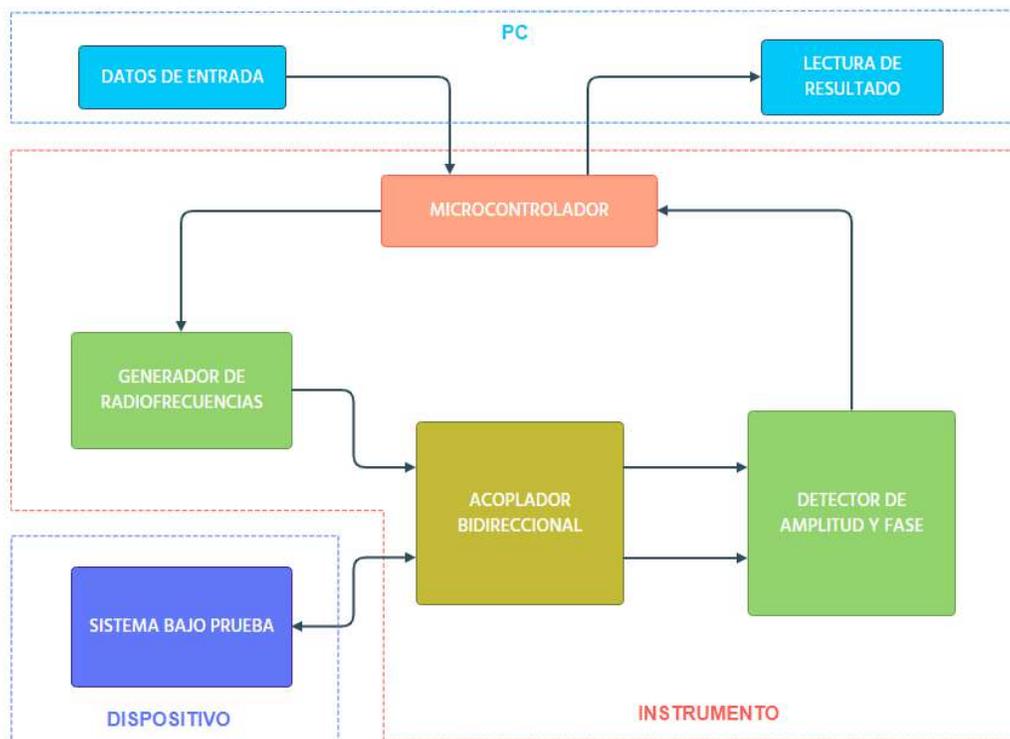


Figura A.1: Diagrama en bloques del roímetro.

A.3.5. Preguntas de investigación

A continuación, se listan algunas preguntas que este trabajo de investigación se plantea y que permite acotar el alcance del mismo.

- ¿Es posible realizar un roímetro con los circuitos integrados ADF4351 y AD8302?
- ¿Se puede medir la impedancia de un sistema para una frecuencia dada por medio de este dispositivo?
- ¿Cuál es la precisión y exactitud del dispositivo en diferentes rangos de frecuencia?
- ¿Cuál es la máxima frecuencia de trabajo de la que se pueden obtener valores confiables?
- ¿Son significativas las variaciones en los valores medidos debidas a cambios en las características del ambiente, tales como temperatura y humedad?
- ¿Qué potencia tendrá la señal inyectada en el sistema y cómo influye esta en los resultados de la medición?
- ¿Qué características debe tener el acoplador utilizado en el roímetro?
- ¿Cómo se puede mejorar la velocidad de medición del roímetro sin comprometer la precisión de la ROE?
- ¿Cuál es el impacto de la calibración periódica en la estabilidad y precisión a largo plazo del roímetro?
- ¿Cuáles son las limitaciones actuales de los roímetros electrónicos y cuáles son las posibles direcciones futuras de investigación para superar estas limitaciones?
- ¿Cuál es el costo-beneficio de utilizar un roímetro electrónico en comparación con otros métodos de medición de ROE disponibles en el mercado?
- ¿Qué funcionalidades se podrían agregar/mejorar a futuro?

A.3.6. Objetivos de la investigación

Actualmente hay roímetros comerciales pero sus frecuencias de aplicación son muy acotadas, generalmente para uso en equipos que están en el rango de VHF (de 30 a 300MHz) y en su mayoría son dispositivos analógicos. Por ello se propone el desarrollo de un Roímetro para UHF (de 0,3 a 3GHz) con ancho de banda extendido, que represente la información obtenida en formato digital para facilitar su lectura.

Los valores resultantes de la medición comprenden: la amplitud de la señal incidente y reflejada, pudiendo calcular a partir de dichos valores el coeficiente de reflexión del sistema; la ROE, obtenida a partir del cálculo del coeficiente de reflexión y, adicionalmente la fase de la señal reflejada, aunque, como se mencionó, no será un parámetro de interés ya que excede a los objetivos de este proyecto. Para obtener la ROE se evaluará la respuesta en amplitud de la señal incidente y reflejada para distintos rangos de frecuencias, por lo tanto, será necesario una tabla de calibración que permita la corrección de errores propios de la medición, debido a los parámetros del sistema que varían conforme varía la frecuencia de prueba. Entre los parámetros de entrada está la frecuencia inicial y final de barrido, los pasos en tiempo y frecuencia, y la potencia de la señal inyectada, que serán los valores de entrada que recibirá el sistema.

A.3.7. Justificación y viabilidad de la investigación

El principal propósito del proyecto, además de las ventajas que ofrece un dispositivo de estas características para su uso como instrumental de laboratorio, es la posibilidad de desarrollar un equipo de bajo costo, con circuitos integrados comerciales, que permita medir grado de desadaptación de un sistema de manera directa y que, por medio de mejoras, pueda ampliar su funcionalidad a futuro. Esto es muy útil para diseñar y ajustar radiotransmisores, líneas de transmisión y antenas, así como para caracterizar la frecuencia de óptima adaptación a un sistema, o la frecuencia de resonancia de un resonador; también podría ser útil como medidor de impedancia añadiendo funcionalidad de medición de fase.

A.3.8. Enfoque

En primera instancia, se investigará y recopilará información del funcionamiento de los circuitos integrados involucrados. En el caso del generador, se trabajará para establecer la comunicación entre una placa Arduino UNO, que será el prototipo para las pruebas, y el circuito ADF4351 de manera de poder configurar parámetros de la señal sintetizada por el generador. En cuanto al detector, este recibirá las muestras de la señal incidente y reflejada del sistema bajo prueba, provenientes del acoplador direccional, y se ingresarán al microcontrolador para su posterior procesamiento. Una vez establecida la comunicación entre el generador, detector y microcontrolador se diseñará la interfaz gráfica de usuario, para poder procesar y presentar los datos obtenidos. Se diseñará el circuito esquemático, se programará el microcontrolador acorde a las especificaciones y finalmente, a partir de este, se fabricará el circuito impreso. Como última etapa del proceso se realizarán pruebas y calibraciones.

Todos los componentes que conforman el roímetro son comerciales, lo que permite su fácil implementación. En cuanto al PCB, se deberán tener en cuenta consideraciones de diseño debido a las altas frecuencias en las que va a estar funcionando el dispositivo. El diseño de las trazas en el PCB es un factor clave en el funcionamiento de un circuito que opera en altas frecuencias ya que son susceptibles de irradiar y recibir interferencias que afectan el funcionamiento, razón por la cual se deben seguir reglas de diseño específicas para su construcción. Además, se propone el desarrollo de un software para que el usuario pueda ingresar los datos y obtener los resultados.

A.3.9. Alcance

El equipo a construir se acota a las especificaciones de un prototipo de laboratorio. De esta manera, las especificaciones de diseño solo se limitan a cumplir características requeridas por el Laboratorio de Comunicaciones con el fin de realizar pruebas y mediciones que validen su funcionamiento. Por tal motivo, no se tendrán en cuenta de manera estricta características de diseño para equipos comerciales, como pueden ser: certificación de seguridad eléctrica, compatibilidad electromagnética (CEM), restricción de sustancias peligrosas (RoHS), entre otras.

Apéndice B

Especificación funcional

B.1. Introducción

Este documento corresponde a la Especificación Funcional del roímetro de UHF con ancho de banda extendido. Esta especificación se ha estructurado basándose en la información mencionada en el documento de Especificación de Requerimientos documentado en el Apéndice A.

B.1.1. Propósito del documento

El presente documento tiene como propósito proveer información detallada de cómo funcionará el sistema, cuáles serán sus comportamientos deseados y cómo se deberá construir, con base en los requerimientos anteriormente definidos en la Especificación de Requerimientos.

Está dirigido a:

- El desarrollador del instrumento, quien lo construirá
- Los directores y solicitantes del proyecto, así como quienes lo evaluarán.

B.1.2. Alcance del proyecto

Este documento corresponde al diseño y desarrollo de un Roímetro para UHF con ancho de banda extendido. Para la medición se utilizarán técnicas propias de la reflectometría mediante un acoplador bidireccional.

Se requiere que opere en una sub-banda del rango de UHF (rango de frecuencias objetivo de 1 a 2 GHz). Para ello se hará uso de distintos circuitos integrados comerciales, junto con herramientas de laboratorio.

B.1.3. Definiciones, acrónimos y abreviaturas

Nombre	Descripción
RF	Requerimiento Funcional
RNF	Requerimiento No Funcional
ROE	Relación de onda estacionaria
VHF	Very High Frequency (Frecuencia muy alta)
UHF	Ultra High Frequency (Frecuencia ultra alta)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso)

B.2. Descripción del dispositivo

Para la construcción del dispositivo se utilizarán circuitos integrados comerciales en las etapas de generación y detección de las señales de radiofrecuencias.

Se requiere un acoplador bidireccional para tomar muestras de la señal incidente y reflejada del sistema bajo prueba y así poder obtener los valores necesarios para la medición de los parámetros de interés.

Para el funcionamiento general del instrumento se utilizará un microcontrolador que sea capaz de ajustar el barrido de frecuencia del generador y recibir los datos suministrados por el detector, realizar el procesamiento de los mismos y finalmente enviarlos a la PC para su visualización.

Se utilizará también una interfaz gráfica para poder configurar los parámetros de entrada y poder leer los datos de salida resultantes.

La etapa de control involucra un microcontrolador que realizará los cálculos antes mencionados y permitirá también la comunicación con la PC.

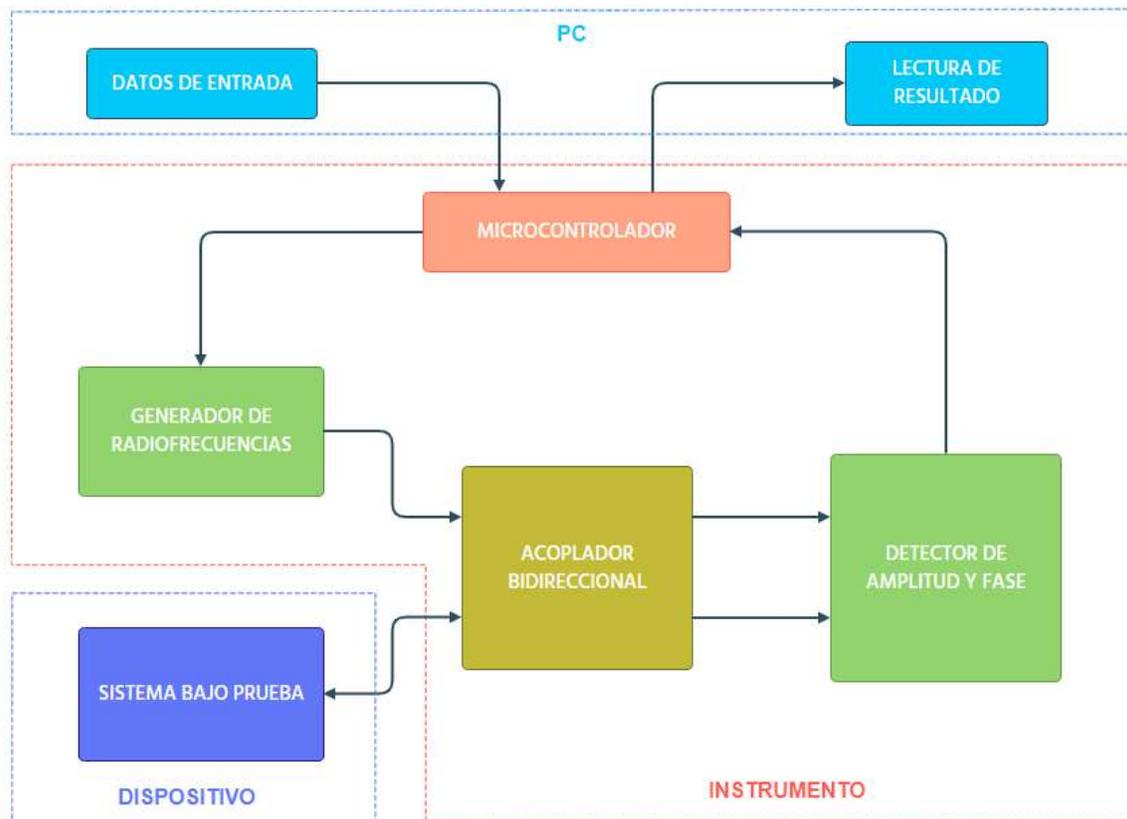


Figura B.1: Diagrama en bloques del roímetro.

B.2.1. Microcontrolador

Este dispositivo es el elemento central del roímetro, encargado de configurar los parámetros de frecuencia del generador, leer los valores recibidos del detector y realizar el procesamiento de datos y la comunicación con la interfaz gráfica.

B.2.2. Datos de entrada

A través de la interfaz gráfica se ingresan los parámetros de barrido para la generación de frecuencias

B.2.3. Lectura de resultado

Por medio de la interfaz gráfica se ingresan los parámetros de barrido y visualizan los resultados obtenidos.

B.2.4. Generador de radiofrecuencias

El generador ADF4351 es el encargado de generar el barrido de frecuencias en el rango de interés al cual el sistema bajo prueba será sometido.

B.2.5. Acoplador bidireccional

Este dispositivo permite acoplar las señales del generador y del sistema bajo prueba para que puedan ser medidas por el detector. Permite tomar muestras atenuadas de la señal incidente y reflejada para poder procesarlas.

B.2.6. Detector de amplitud y fase

El detector AD8302 se encarga de recibir las señales provenientes del acoplador y obtener la amplitud de las señales recibidas. Es a través de este dispositivo que se determina la ROE del sistema.

B.2.7. Sistema bajo prueba

Este dispositivo es al que se someten las señales generadas para obtener información de la ROE del mismo.

B.3. Especificaciones funcionales

B.3.1. RF01: Ajuste del rango de medición

El usuario debe definir el rango de frecuencias en el que va a realizar la medición, dentro del rango de frecuencias objetivo que va de 1 a 2GHz.

Para indicar el rango de barrido el usuario debe definir frecuencia máxima, frecuencia mínima, pasos en frecuencia, pasos en tiempo y potencia de la señal generada. Esta información se ingresará por medio de la interfaz gráfica, se enviará al microcontrolador para que este configure estos parámetros en el generador y luego se mostrarán los resultados por la misma interfaz gráfica.

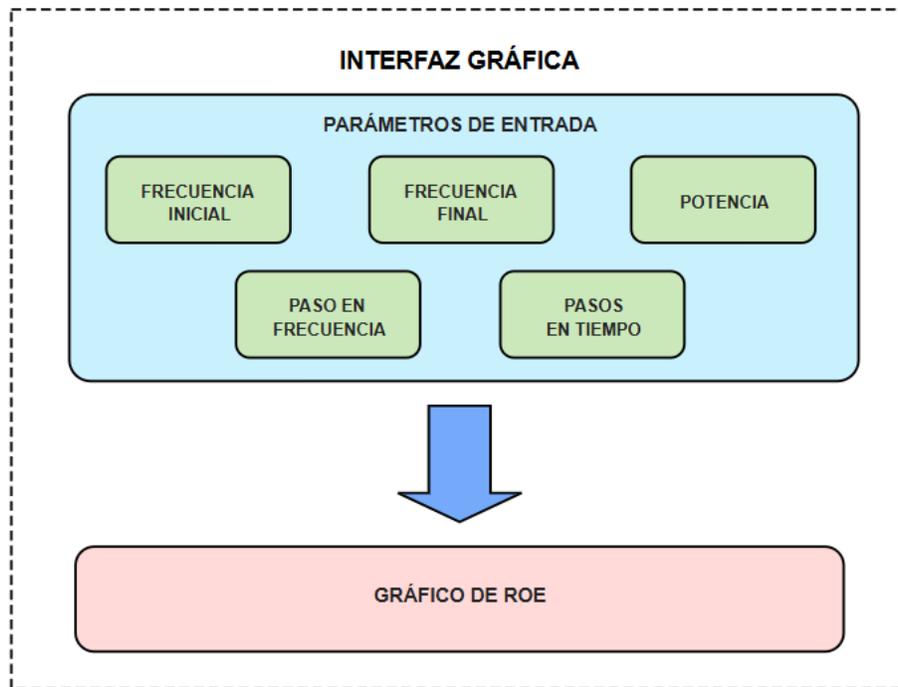


Figura B.2: Interfaz gráfica del roímetro - ajuste de parámetros de entrada.

B.3.2. RF02: Microcontrolador

El microcontrolador debe ser capaz de recibir los datos de la PC y configurar el generador con los parámetros de barrido definidos por el usuario.

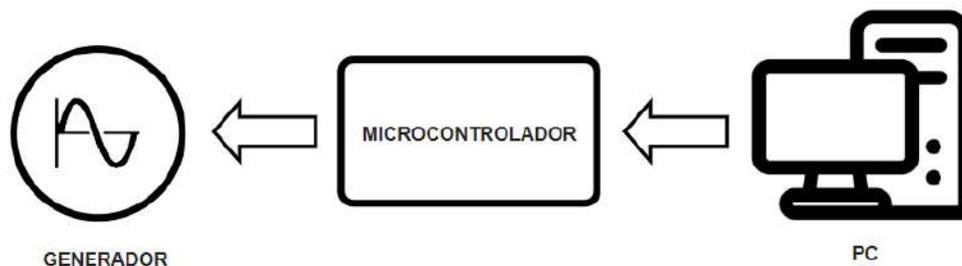


Figura B.3: Comunicación interfaz gráfica - generador.

B.3.3. RF03: Separación de la onda reflejada

Para poder aplicar la técnica de reflectometría correctamente se necesitará un acoplador bidireccional que sea capaz de operar en el rango de 1 a 2GHz.

El bloque generador de radiofrecuencias sintetiza la onda incidente, y la envía al sistema bajo prueba, en su camino pasando por un acoplador bidireccional. Este no obstruye a la onda viajante, pero acopla parte de su potencia, es decir, emite por la una de sus salidas una onda de menor potencia que es “copia” de la que pasó por el puerto de entrada. Además, la onda que incide sobre el sistema bajo prueba se ve reflejada en función del valor de su impedancia de entrada (Sistema bajo prueba). La onda reflejada regresa al acoplador bidireccional, el cual, nuevamente, toma parte de su potencia y la emite, esta vez, por una salida diferente.

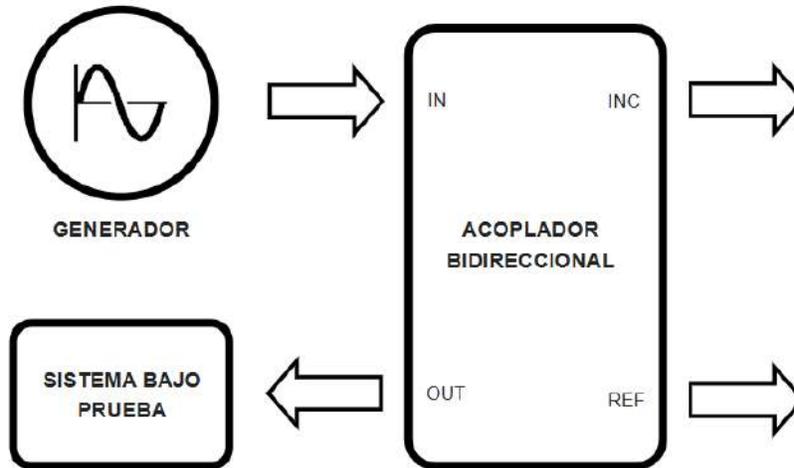


Figura B.4: Separación de onda incidente y reflejada.

B.3.4. RF04: Detección, lectura y envío de datos

Las señales provenientes de las salidas del acoplador bidireccional ingresan al detector para poder ser medidas. En esta etapa, se obtiene información de amplitud de la señal incidente y de la señal reflejada. Estas magnitudes son enviadas como niveles de tensión al microcontrolador, el cual las procesará y enviara a la interfaz gráfica para realizar los cálculos necesarios y obtener el gráfico resultante de la ROE del sistema bajo prueba en el rango especificado.

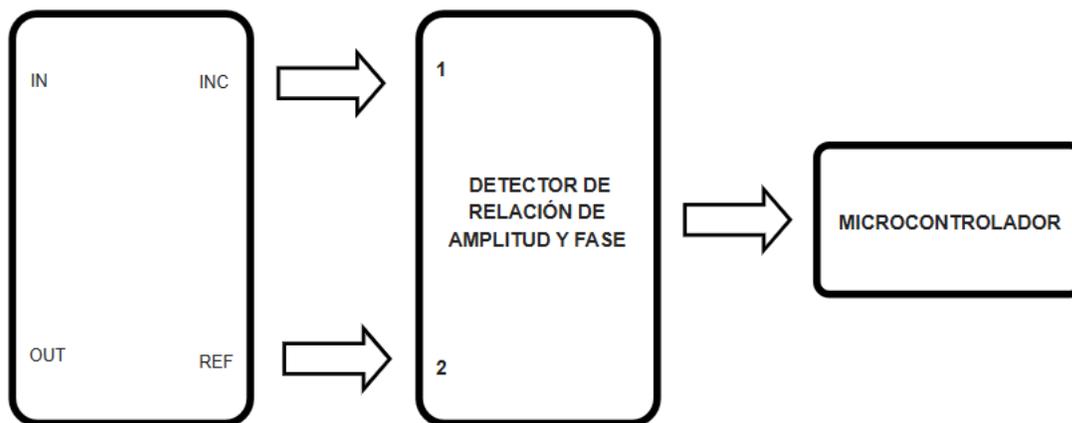


Figura B.5: Detección, lectura y envío de datos.

B.3.5. RF05: Procesamiento de datos

Los valores de tensión provenientes del detector son leídos por el ADC del microcontrolador para cuantificarlos. El detector brinda información de amplitud y fase, pero para este proyecto solo interesa la información de amplitud, necesaria para el cálculo de la ROE, por lo que la información de fase se desestimará. El microcontrolador, en conjunto con la interfaz gráfica se encargan del procesamiento y cálculo de estos parámetros.

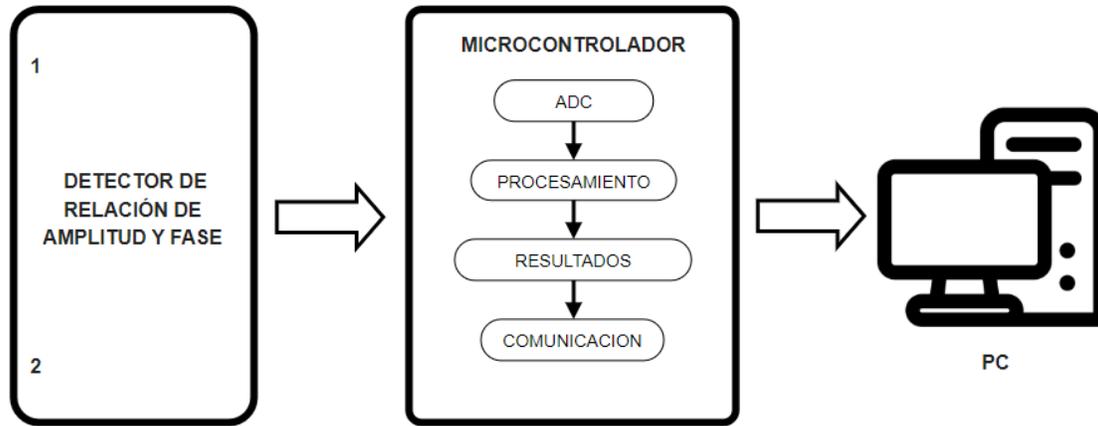


Figura B.6: Procesamiento de datos.

B.3.6. RF06: Graficar y mostrar resultados

Una vez leídos los datos y procesados, se enviarán nuevamente a la PC para graficar la ROE en el rango de frecuencia seleccionado y mostrar la ROE máxima y mínima obtenida en dicho rango.

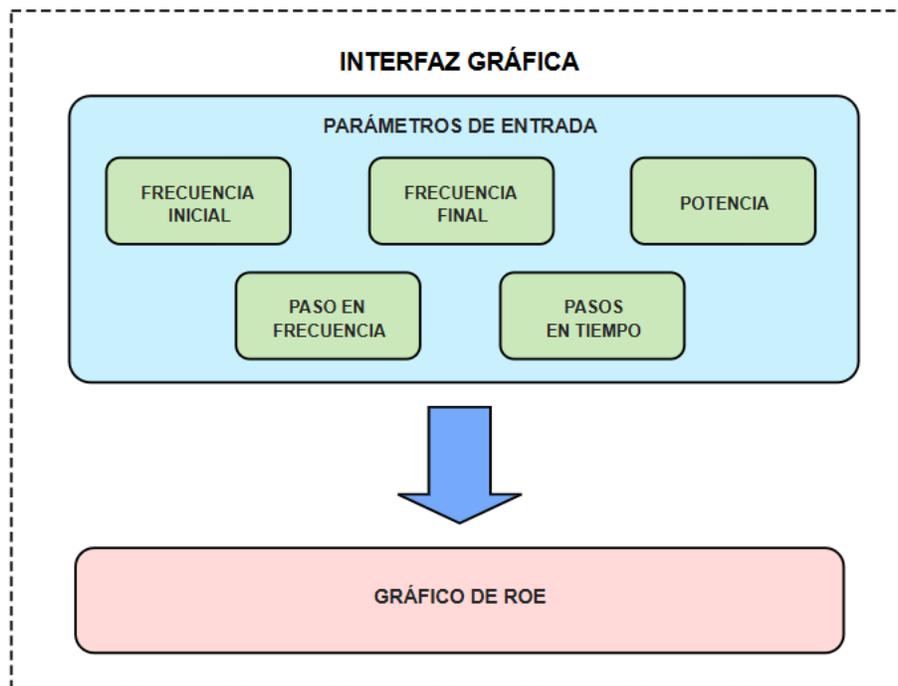


Figura B.7: Visualización de resultados.

B.3.7. RF07: Calibración del instrumento

El usuario tendrá la opción de cambiar el banco de trabajo, pero será necesario realizar la calibración cada vez que lo modifique o realice algún cambio de cable, conectores o adaptadores utilizados. Por otro lado, se requiere la utilización de un acoplador bidireccional que cumpla con los requisitos del banco propuesto en la RF03.

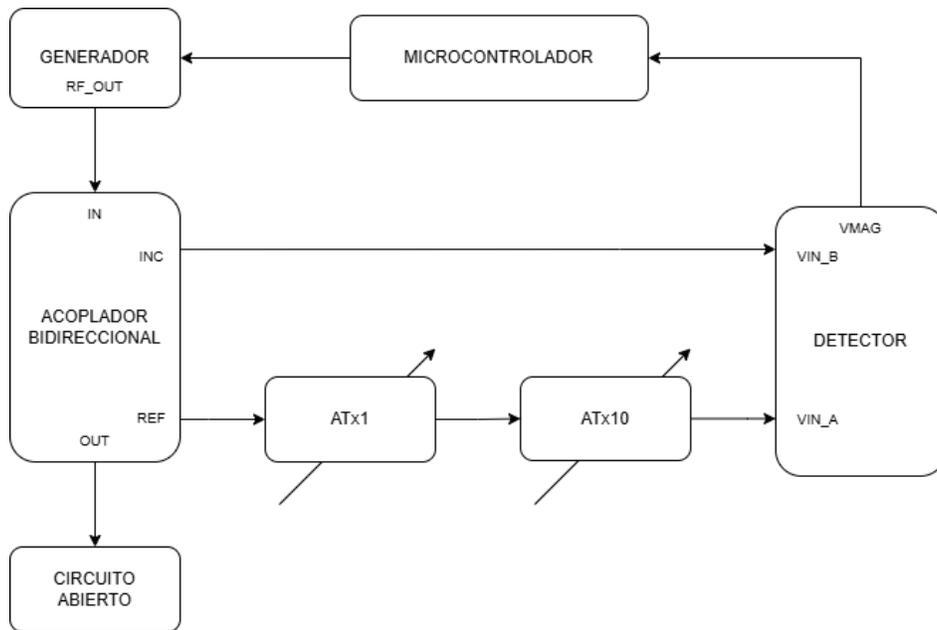


Figura B.8: Banco de calibración.

Apéndice C

Especificación técnica

C.1. Introducción

Un roímetro es un instrumento utilizado en electrónica, especialmente en el área de telecomunicaciones, para medir la Relación de Onda Estacionaria (ROE). Este parámetro indica el grado de adaptación de impedancia entre una fuente de señal, como puede ser un transmisor, y su carga, generalmente una antena o línea de transmisión. Cuando una señal de RF es enviada desde el transmisor hacia la antena a través de una línea de transmisión (como un cable coaxial), parte de la potencia puede ser reflejada hacia el transmisor si las impedancias no están perfectamente adaptadas. Esto ocurre debido a una desadaptación entre la impedancia característica del cable (por lo general, 50Ω) y la impedancia de la antena. Cuanto más cercano a 1 sea este valor de ROE mejor adaptado estará el sistema, lo que indica que la magnitud de la señal reflejada V_r , respecto a la incidente V_i , es significativamente menor. Este instrumento mide dos parámetros claves para determinar este valor de ROE: la amplitud de la señal incidente y amplitud de la señal reflejada.

$$\text{ROE} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (\text{C.1})$$

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} \quad (\text{C.2})$$

C.1.1. Propósito del documento

El presente documento tiene como objetivo proveer información detallada de cómo funcionará el instrumento, desarrollando la implementación de cada bloque que lo compone, como se deberá construir y cuál será el comportamiento esperado para cada etapa, con base en los requerimientos definidos en la Especificación Funcional.

Se encuentra dirigido a:

- El desarrollador del instrumento, quien lo construirá
- Los directores y solicitantes del proyecto

C.1.2. Alcance del proyecto

Este proyecto propone el diseño, desarrollo, calibración y ensayo de un Roímetro para UHF con ancho de banda extendido. Los requerimientos del proyecto fueron planteados junto con el Laboratorio de Comunicaciones de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Para la medición se utilizarán técnicas propias de la reflectometría mediante un acoplador bidireccional. Se requiere que opere en una banda del rango de UHF (entre 1 y 2GHz). Para ello se hará uso de distintos circuitos integrados comerciales, junto con herramientas de laboratorio.

C.1.3. Definiciones, acrónimos y abreviaturas

Nombre	Descripción
ROE	Relación de onda estacionaria
UHF	Ultra High Frequency (Frecuencia ultra alta)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de circuito impreso)
SMD	Surface Mounted Device (Dispositivo de montaje superficial)
PC	Personal Computer (Computadora Personal)
SPI	Serial Peripheral Interface (Interfaz Periférica Serial)
RF	Radiofrecuencia
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Transmisor-Receptor Asíncrono Universal)

C.2. Hardware

Para la construcción del dispositivo se utilizaron 5 módulos interconectados como se observa en la Figura C.1.

La PC se utilizó para la interfaz gráfica, mediante la cual se ingresan los parámetros y se visualizan las curvas de ROE resultantes para el rango de frecuencias seleccionado. El módulo de comunicación se utiliza tanto para la programación del microcontrolador como para la comunicación de este con la interfaz gráfica. El módulo generador es un kit de evaluación que se obtuvo para realizar las pruebas de programación de las frecuencias de barrido del generador. El acoplador bidireccional, se utilizó para separar las señales incidente y reflejada para su posterior análisis. Por último, el bloque microcontrolador-detector que es la etapa que se diseñó en PCB, encargada de leer la diferencia de amplitud entre las señales incidente y reflejada, procesar los datos y enviarlos a la PC para su visualización.

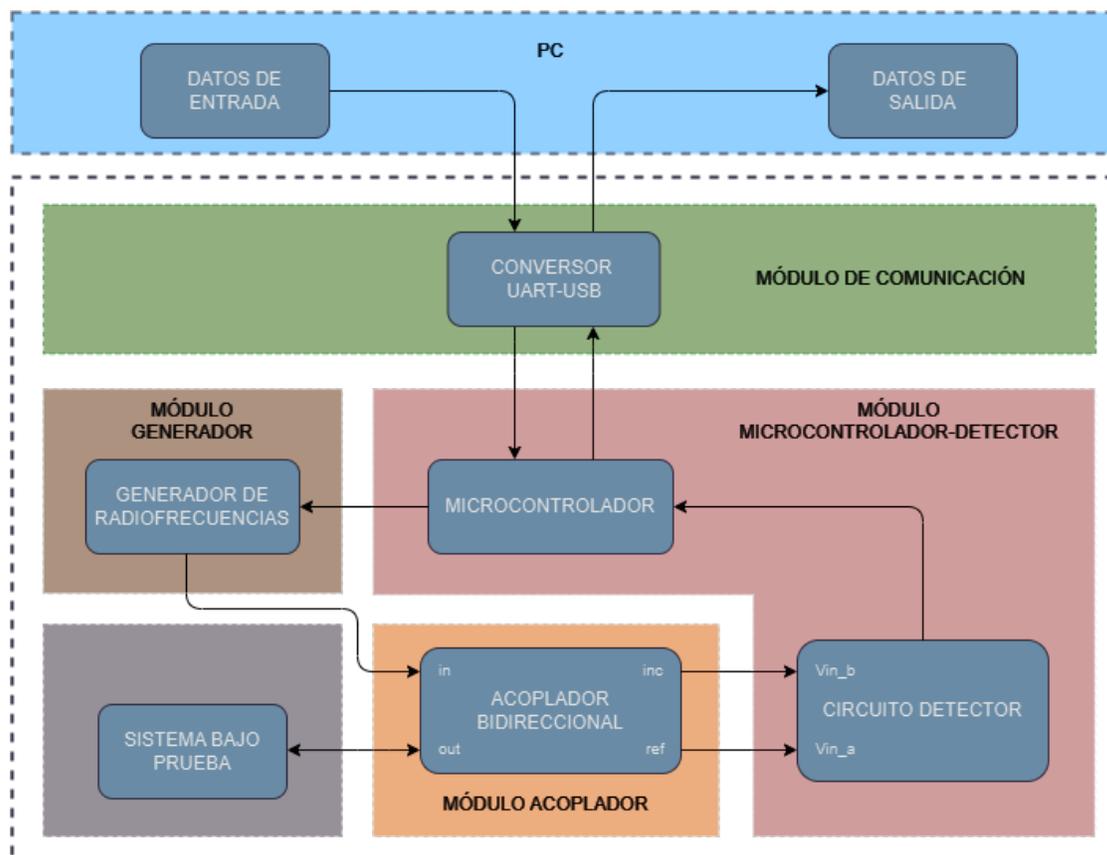


Figura C.1: Módulos que componen el roímetro.

A continuación, se explican los cuatro módulos que componen el diseño de hardware del dispositivo final: módulo de comunicación, placa microcontrolador-detector, modulo generador y acoplador bidireccional. Se realiza una breve descripción de los aspectos técnicos de los módulos que se interconectan, y una descripción más detallada en los que se deben diseñar y construir por completo.

C.2.1. RT01: Módulo de comunicación

Para la conexión entre el microcontrolador y la PC se hizo uso de un módulo de comunicación UART a USB. La comunicación se realiza a través del puerto serie utilizando el estándar RS232 (EIA 232). Los pines Rx y Tx están directamente conectados a los pines UART del microcontrolador para establecer la comunicación.

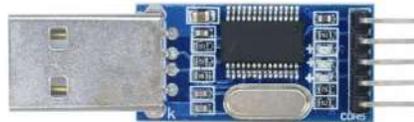


Figura C.2: Conversor USB-UART.



Figura C.3: Conexión del módulo de comunicación.

C.2.2. RT02: Placa microcontrolador-detector

Esta placa incluye el microcontrolador ATmega328P y el detector, conformado por el circuito integrado AD8302. El microcontrolador se utiliza para recibir la información ingresada por el usuario en la interfaz gráfica e indicarle al generador ADF4351 el rango de frecuencias para realizar el barrido. El detector, por su parte, recibe la información de amplitud de la señal incidente y reflejada obtenida por el acoplador bidireccional y entrega una señal de amplitud proporcional a la diferencia de magnitud entre estas dos, parámetro que se utilizara para el cálculo de ROE en el rango de frecuencias seleccionado.

C.2.2.1. Detector

La información de la diferencia de amplitud entre la señal incidente y reflejada se obtiene a partir de circuito integrado AD8302. Este detector permite obtener la relación de amplitud y fase entre dos señales, pero en este trabajo solo analizaremos la relación de amplitud, cuya magnitud sirve para el cálculo de la ROE.

Este circuito tiene un amplio rango de frecuencias de trabajo (hasta los 2700MHz) y una buena precisión, por lo que resulta particularmente útil en este proyecto. Las señales de entrada acopladas en CA pueden variar entre 0dBm y -60dBm. En cuanto a la relación de amplitud, tiene la capacidad de realizar una medición precisa de relación de amplitud de ± 30 dB. Para este proyecto, solo se utilizó el rango de -30 a 0dBm, ya que los sistemas a probar son dispositivos pasivos, por lo que una señal reflejada de mayor amplitud que la incidente no es un escenario posible.

En la Figura C.4 se puede ver el diagrama funcional simplificado del detector.

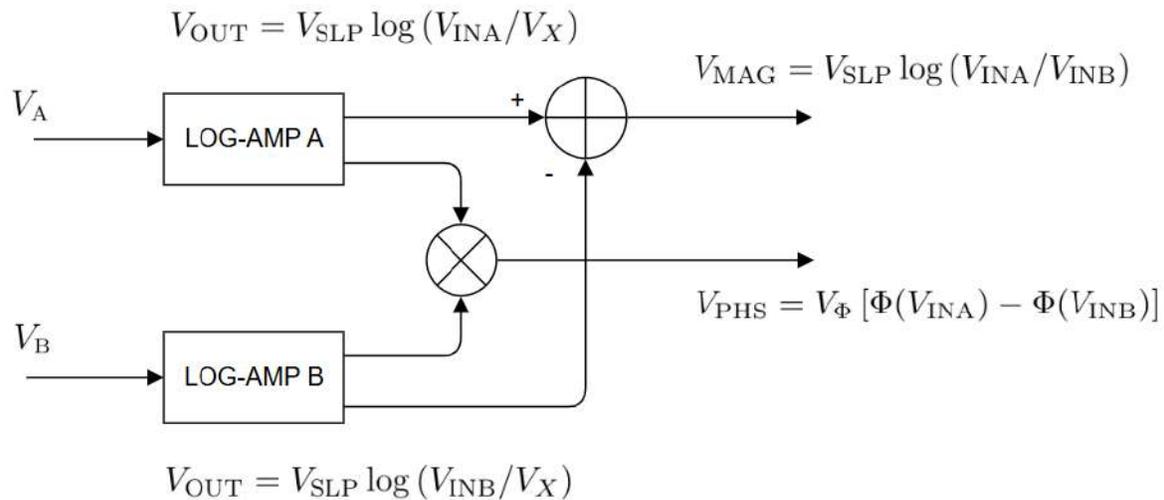


Figura C.4: Diagrama en bloques del detector AD8302.

El detector consta de dos amplificadores logarítmicos que proporcionan la medición de amplitud, cada uno con un rango dinámico de 60dB, lo cual permite obtener una relación logarítmica entre las señales.

Ambos amplificadores logarítmicos responden a la siguiente Ecuación de salida de tensión :

$$V_{OUT} = V_{SLP} \log(V_{IN}/V_X) \tag{C.3}$$

Donde V_{OUT} es la tensión de entrada, V_{SLP} es la pendiente, V_X es la intersección del amplificador. La tensión V_X es el punto en el que la pendiente logarítmica cruza el eje X obteniendo como resultado una salida $V_{OUT} = 0$. Se puede observar en el diagrama en bloques del detector que la salida de ambos amplificadores se resta, y aplicando las propiedades del logaritmo se obtiene la ecuación que modela la salida del detector en función de las amplitudes de las señales de entrada.

$$V_{OUT A} - V_{OUT B} = V_{SLP} \log\left(\frac{V_{IN A}}{V_X}\right) - V_{SLP} \log\left(\frac{V_{IN B}}{V_X}\right) \tag{C.4}$$

$$V_{MAG} = V_{SLP} \log\left(\frac{V_{IN A}}{V_X} \cdot \frac{V_X}{V_{IN B}}\right) = V_{SLP} \log\left(\frac{V_{IN A}}{V_{IN B}}\right) \tag{C.5}$$

El detector tiene dos modos de funcionamiento: Modo comparador/control o modo medición. Se utiliza esta última configuración ya que en este modo las salidas VMAG y VPHS guardan una relación proporcional con la entrada. Para utilizar el modo de medición el fabricante indica que se deben conectarlos pines PSET y MSET para obtener una realimentación en la etapa de salida.

La respuesta del detector brindada por el fabricante para la relación de amplitud de las señales de entrada es la siguiente:

El circuito detector genera una tensión interna VCP de 900mV que sirve para establecer el punto central de referencia, y que en este caso se corresponde con señales de entrada de igual amplitud. De esta forma, amplitudes inferiores a la tensión de referencia se sitúan debajo de la curva y las amplitudes superiores por encima. Es este proyecto, el sistema bajo prueba consta de elementos pasivos, por lo cual se trabajó únicamente sobre la curva inferior, teniendo una excursión total de -30dB. En esta configuración, se pueden

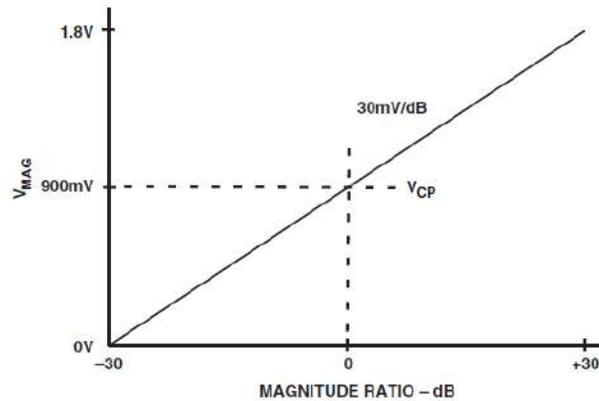


Figura C.5: Curva característica ideal del detector para la medición de amplitud relativa.

medir señales de entrada cuyas amplitudes varían como máximo 30dB, parámetro que será de utilidad para conocer las limitaciones técnicas del dispositivo.

En el diseño de esta placa se utilizó la configuración para el modo medición y se realizaron las conexiones de acuerdo al diagrama esquemático proporcionado en la hoja de datos (Figura C.6). Los valores correspondientes a los componentes mostrados se presentan en la Tabla C.1.

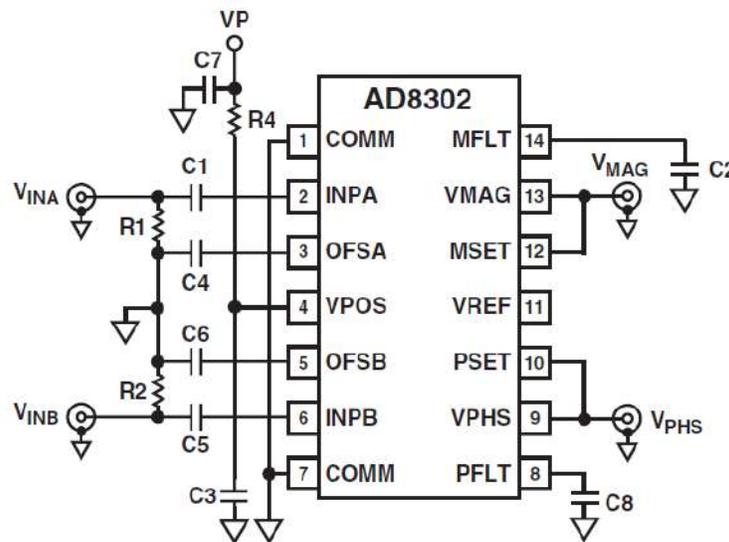


Figura C.6: Diagrama esquemático del detector en modo medición.

Para el diseño del PCB se tuvieron en cuenta las recomendaciones de diseño del fabricante.

- Plano de tierra para reducir el ruido y asegurar un retorno de corriente adecuado.
- Pistas cortas y directas para minimizar pérdidas y desadaptaciones.
- Impedancia controlada para evitar reflexiones.
- Condensadores de desacoplo en la fuente de alimentación.
- Condensadores de acoplo en las entradas RF para evitar cualquier componente de continua y terminación adecuada de impedancias.

Componente	Valor	Cantidad
R1, R2	52,3Ω	2
R4	0Ω	1
C1, C4, C5, C6	1nF	4
C2, C8	Open	2
C3	100pF	1
C7	100nF	1

Tabla C.1: Lista de componentes.

Los trazos de entrada de la señal de RF se diseñaron para tener una impedancia característica $Z_0=50\Omega$. Para el cálculo de los mismos se utilizarán las ecuaciones de diseño de guía de onda coplanar con plano de masa [6].

$$Z_0 = \frac{60,0\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \frac{1,0}{\frac{K(k)}{K(k')} + \frac{K(k_1)}{K(k'_1)}} \tag{C.6}$$

$$k = \frac{a}{b} \tag{C.7}$$

$$k' = \sqrt{1,0 - k^2} \tag{C.8}$$

$$k'_1 = \sqrt{1,0 - k_1^2} \tag{C.9}$$

$$k_1 = \frac{\tanh\left(\frac{\pi a}{4,0h}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi b}{4,0h}\right)} \tag{C.10}$$

Para facilitar los cálculos se utiliza una calculadora online [10] de forma de agilizar el diseño. Se debe tener en cuenta un pequeño cambio en los valores de entrada, ya que a y b son remplazados por W y S según muestra la Figura C.7.

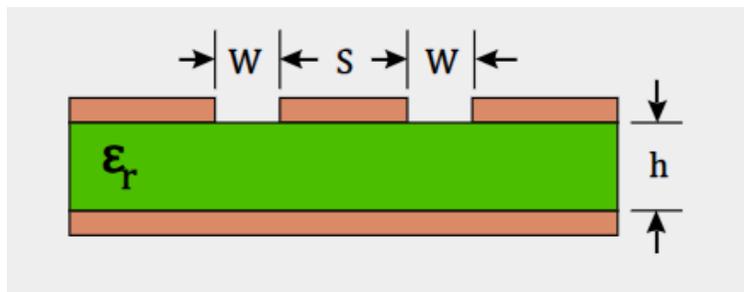


Figura C.7: Referencias para el cálculo de guía de onda coplanar.

Se tienen los siguientes datos del sustrato epoxi doble faz a utilizar proporcionados por la empresa de fabricación del PCB [8]:

- Espesor del dieléctrico (h): 1,6mm
- Constante dieléctrica relativa (ϵ_r): 4,5

Se decidió utilizar un ancho de pista de $W=0,3\text{mm}$, dadas las limitaciones de clearance de la empresa encargada de la fabricación del PCB y se realizaron diferentes iteraciones variando S hasta obtener $S=1,6\text{mm}$ de tal manera de lograr una impedancia de 50Ω . Estas dimensiones se utilizaron para ambas entradas RF del detector.

C.2.2.2. Microcontrolador

El circuito integrado ATmega328P es un microcontrolador de 8 bits de la familia AVR desarrollado por Microchip Technology (anteriormente Atmel), el cual se utilizó para el control del generador y el detector, así como para gestionar la comunicación con la interfaz gráfica.

A continuación, se muestra el diagrama de interconexión entre los pines de los diferentes módulos.

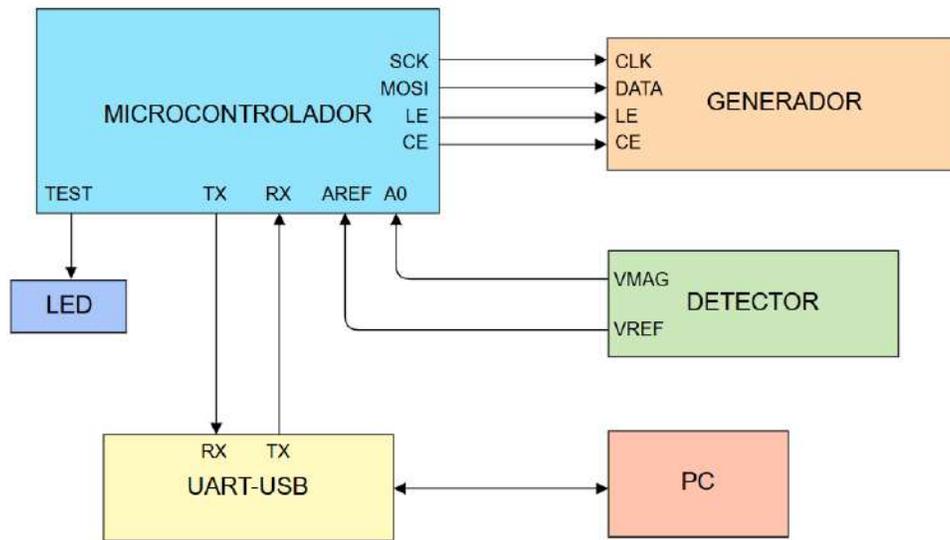


Figura C.8: Interconexión de pines del microcontrolador.

La funcionalidad de cada pin se detalla en el siguiente cuadro.

BLOQUE	PIN	TIPO	FUNCIÓN
Microcontrolador	A0	ADC	Entrada analógica encargada de leer la tensión de salida del detector
	AREF	ADC	Entrada de tensión de referencia enviada por el detector
	SCK	SPI	Señal de reloj SPI
	MOSI	SPI	Señal de datos SPI
	LE	SPI	Chip Enable SPI
	CE	SPI	Load enable SPI
	TEST	OUT	Pin led para indicar fin de procesamiento
	TX	OUT	Pin de transmisión de datos UART
	RX	IN	Pin de recepción de datos UART
Generador	CLK	SPI	Señal de reloj SPI
	DATA	SPI	Señal de datos SPI
	LE	SPI	Chip Enable SPI
	CE	SPI	Load enable SPI
Detector	VMAG	OUT	Salida de tensión del detector
	VREF	OUT	Tensión de referencia interna del detector
UART-USB	TX	OUT	Pin de transmisión de datos UART
	RX	IN	Pin de recepción de datos UART

Tabla C.2: Descripción de pines.

A continuación, se listan las características principales del microcontrolador ATmega328P:

- Arquitectura: Microcontrolador AVR RISC de 8 bits con alta eficiencia energética y procesamiento rápido.
- Memoria:
 - 32kB de memoria Flash para programas.
 - 2kB de SRAM para datos temporales.
 - 1kB de EEPROM para almacenamiento no volátil.
 - Velocidad de Operación: Hasta 20MHz.
- Voltaje de Operación: 1,8V a 5,5V.
- Entradas y Salidas:
 - 23 pines digitales configurables.
 - 6 canales de conversión analógica a digital (ADC) de 10 bits.
 - Comunicación Serial: Compatibilidad con USART, SPI e I2C (TWI).
- Temporizadores y PWM:
 - Tres temporizadores (uno de 16 bits y dos de 8 bits).
 - Salidas PWM integradas.
- Modo de Bajo Consumo: Ideal para aplicaciones alimentadas por baterías, con múltiples modos de ahorro de energía.

C.2.2.3. Fuente

Para alimentar el dispositivo conformado por la placa microcontrolador-detector y el generador se integra al diseño de la placa de una fuente regulada del tipo Buck, por su eficiencia energética y simplicidad. Inicialmente se contempló la utilización de una fuente lineal, pero las exigencias de corriente del dispositivo hacían necesaria la disipación térmica y expandían las dimensiones del diseño previsto más de lo esperado, motivo por el cual se decidió optar por una fuente conmutada para este proyecto.

Para el diseño de la fuente conmutada se utilizó el circuito integrado LM2596-5.0 [5], que es la versión de salida con tensión fija, de Texas Instrument. Para el diseño se implementó el siguiente circuito:

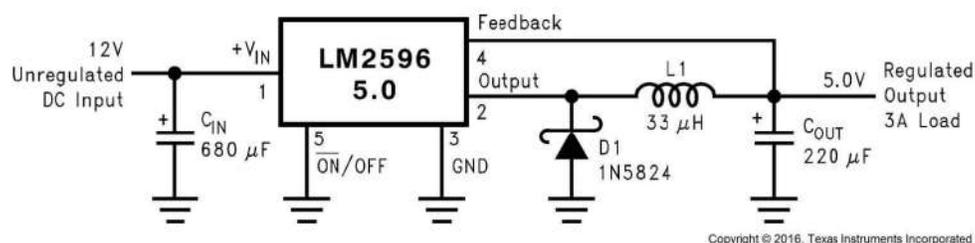


Figura C.9: Circuito esquemático para la fuente regulada de 5V fijos.

C.2.2.4. Diagrama esquemático y PCB

Una vez definidos los parámetros de fabricación, se realizó el diseño esquemático de la placa empleando la versión académica del software de diseño Altium Designer, como se ilustra en la Figura C.10. Cabe destacar el agradecimiento a Altium por proporcionar acceso a esta herramienta, la cual facilitó significativamente el desarrollo de este proyecto.

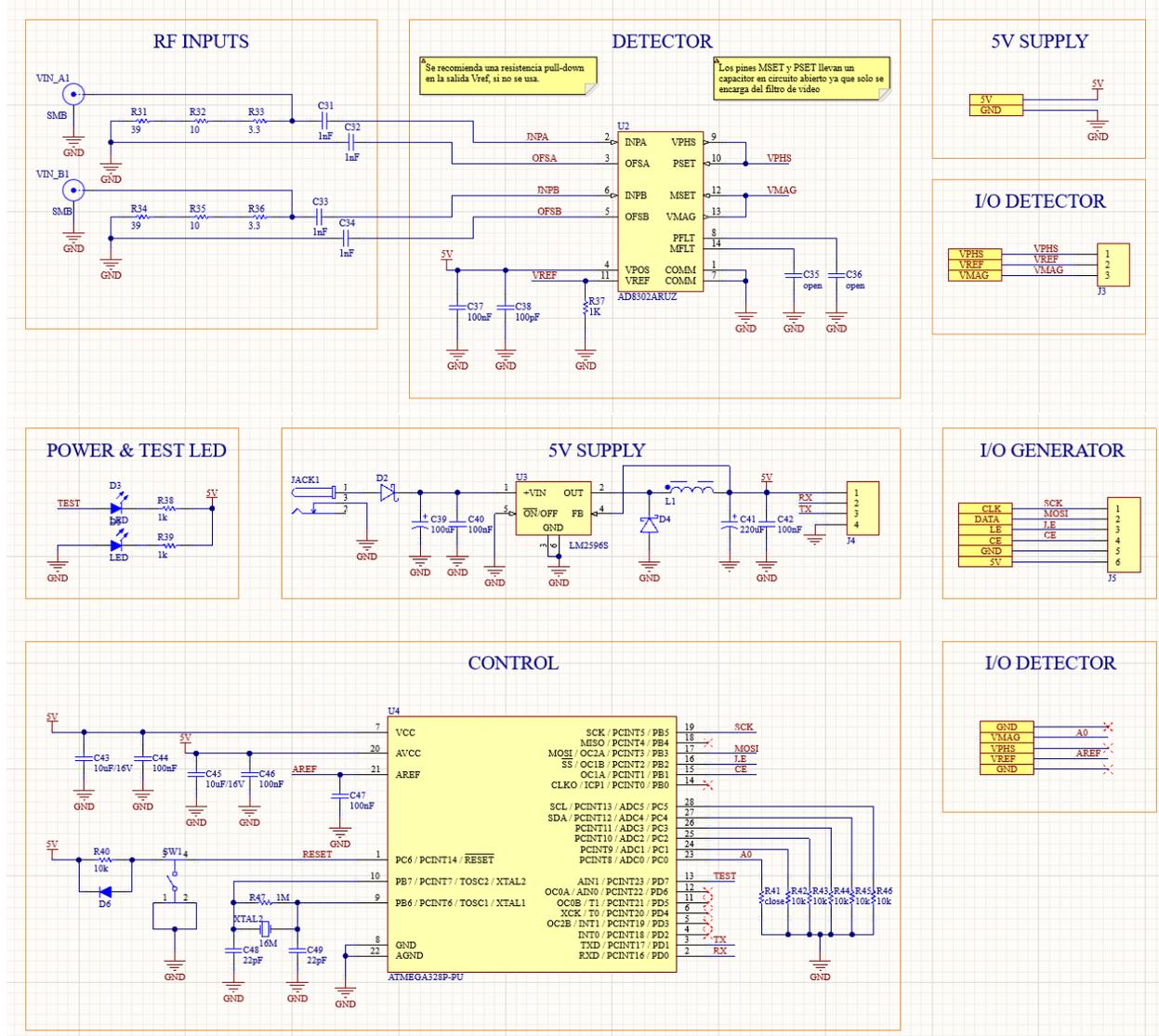
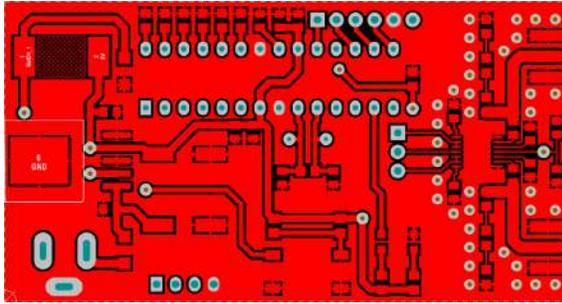


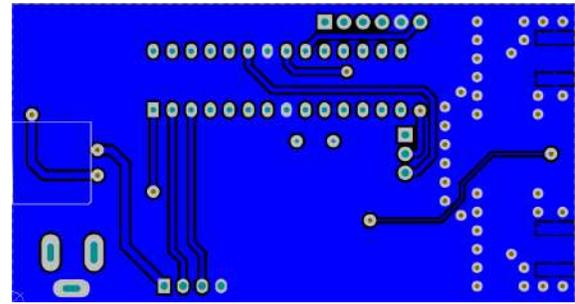
Figura C.10: Diagrama esquemático de la placa microcontrolador-detector.

Para el diseño del circuito detector, se optó por una impedancia de entrada de 52,3Ω, como se especifica en la hoja de datos. La mayoría de los componentes para este proyecto fueron reutilizados de las placas adquiridas para las pruebas preliminares. En el caso específico del detector, la placa de prueba ya contaba con una resistencia SMD de 52,3Ω y con una tolerancia del 1%, por lo que no fue necesario realizar el ajuste resistivo que aparecía en el diagrama. Esto se debió a que la configuración inicial propuesta permitía obtener la impedancia requerida utilizando valores comerciales.

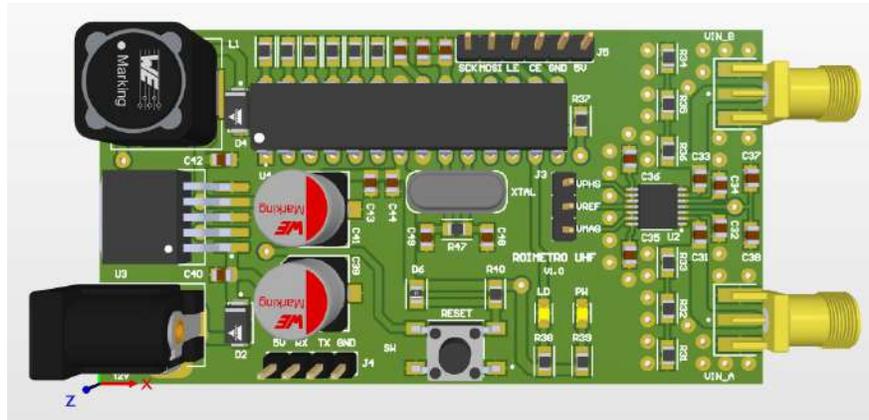
En este diseño, se consideraron las recomendaciones del fabricante antes mencionadas. Dado que se utilizó una fuente conmutada, se decidió ubicar los componentes susceptibles de generar interferencias, tanto de la fuente regulada como del oscilador de cristal requerido para el microcontrolador, lo más alejado posible de la etapa de entrada del detector. Esta disposición busca minimizar las posibles perturbaciones electromagnéticas en las señales de entrada.



(a) Diseño de la capa superior.



(b) Diseño de la capa inferior.



(c) Diseño 3D.

Figura C.11: Diseño PCB del módulo microcontrolador-detector.

Teniendo la placa diseñada, se prepararon los archivos Gerber, que son el estándar de la industria electrónica para describir el diseño de PCB, cuyos datos más relevantes son:

- Tamaño y material del sustrato
- Cantidad de capas y diseño detallado de las dimensiones de cada traza de cobre
- Máscaras de soldadura
- Serigrafía de componentes
- Taladros, para indicar la posición específica de cada orificio

Para este proyecto se envió el diseño a fabricar en el exterior, en la empresa JLCPCB [9] ya que los tiempos y costos de fabricación era notablemente menores que los de las empresas locales. Por otro lado, también contaban con la revisión y validación del diseño, para corroborar que sea factible su fabricación en función de las limitaciones tecnológicas de la empresa. A continuación, se muestra la placa fabricada.

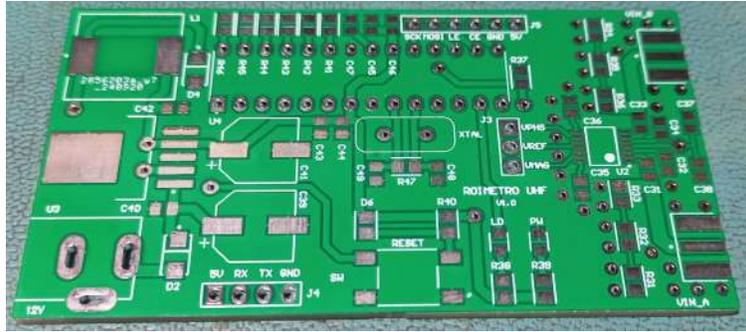


Figura C.12: PCB fabricada.

Considerando los costos asociados y la disponibilidad limitada de algunos componentes específicos en el mercado, como se mencionó previamente, se optó por reutilizar componentes provenientes de placas electrónicas adquiridas en el exterior, inicialmente compradas para las pruebas preliminares. Esta estrategia permitió optimizar los recursos y asegurar la continuidad del desarrollo, sin comprometer la funcionalidad ni la calidad del proyecto.

Tras realizar el desmontaje de los componentes seleccionados y su posterior integración en el diseño, se obtuvo la placa final ensamblada. Este proceso incluyó la extracción cuidadosa de los componentes reutilizables, su inspección para verificar la funcionalidad, y la soldadura en el nuevo diseño para garantizar la correcta operatividad del sistema.



Figura C.13: Placa microcontrolador-detector ensamblada.

C.2.3. RT03: Acoplador bidireccional

El roímetro utiliza técnicas de reflectometría para determinar la ROE del sistema bajo prueba. Esta técnica consiste en ingresar una señal a la carga a medir y utilizar la onda reflejada para obtener información de la misma.

Para ello se utiliza un acoplador bidireccional que es un dispositivo pasivo utilizado para medir señales o dividir potencia entre dos líneas de transmisión de RF sin interrumpir la señal principal y es bidireccional ya que puede medir y acoplar señales que viajan en ambas direcciones en la línea de transmisión.

Los acopladores direccionales tienen varias características importantes, entre las que se encuentran el ancho de banda, la potencia nominal de entrada, la pérdida de inserción, la planitud de la frecuencia, el coeficiente de acoplamiento, la directividad y el aislamiento. El rango de operación del roímetro es entre 1 y 2GHz, por lo que se necesita un acoplador bidireccional con ese ancho de banda.

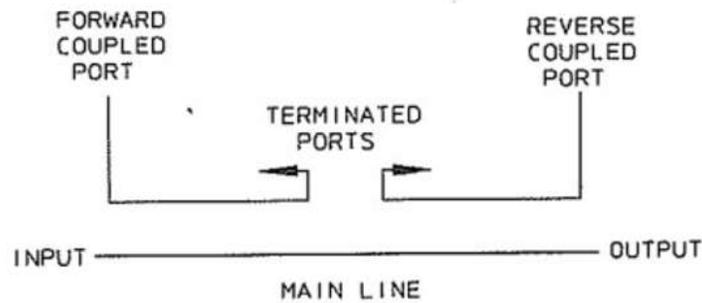


Figura C.14: Esquema de un acoplador bidireccional.

Para la separación de las señales incidente y reflejada en este proyecto se utilizó el acoplador HP 778D.



Figura C.15: Acoplador bidireccional HP778D utilizado para el roímetro.

El acoplador bidireccional modelo HP778D tiene las siguientes características principales:

- **Ancho de banda:** Opera eficientemente en un rango de frecuencias de 100MHz a 2000MHz, siendo también utilizable por debajo de los 100MHz, aunque con limitaciones en la potencia de la fuente de señal y la sensibilidad del detector conectado.
- **Pérdida de inserción:** Presenta un factor de acoplamiento nominal de 20dB para frecuencias superiores a 100MHz. Esta pérdida aumenta con una pendiente de 0,006dB/MHz al disminuir la frecuencia por debajo de ese rango.
- **Directividad:** La directividad es alta y depende de la frecuencia. En el brazo auxiliar:
 - A:** Frecuencia de 0,1-1GHz: $\geq 36\text{dB}$ y de 1-2GHz $\geq 32\text{dB}$.
 - B:** Frecuencia de 0,1-1GHz: $\geq 30\text{dB}$ y de 1-2GHz $\geq 30\text{dB}$.
- **Factor de acoplamiento:** La variación en el factor de acoplamiento es de $\pm 1,5\text{dB}$ respecto al valor nominal, lo que asegura estabilidad y precisión en las mediciones.

Estas características hacen que el HP778D sea ideal para mediciones de coeficientes de reflexión en el rango de trabajo del presente proyecto. La conexión al acoplador se realiza mediante cables macho a macho SMA tanto en la entrada del acoplador con la señal proveniente del generador, como en las salidas que llevan la onda reflejada e incidente al circuito detector. En el caso del acoplador, se utilizaron adaptadores tipo-N a SMA.

C.2.4. RT04: Generador

Este bloque es el encargado de sintetizar las frecuencias necesarias para realizar el barrido en frecuencia del roímetro. El ADF4351 es un circuito integrado que por sus prestaciones y utilización en otros proyectos resulta adecuado para este desarrollo.

Sus principales características son:

- Amplio rango de frecuencias de salida (35-4400MHz)
- Bajo ruido de fase y bajo jitter, lo que resulta de utilidad para conseguir señales de salida con menor distorsión
- Programación de registros a través de interfaz SPI
- Nivel de potencia de salida programable

C.2.4.1. Diagrama esquemático y PCB

Para este proyecto, se desarrolló el diseño esquemático y el PCB del generador. Sin embargo, con el fin de simplificar las pruebas iniciales y evitar posibles complicaciones relacionadas con la soldadura del componente integrado, especialmente del ADF4351, cuyo encapsulado es 32-VFQFN, se optó por utilizar el kit de evaluación comercialmente disponible como plataforma de pruebas. Esta decisión permitió agilizar el proceso de validación del diseño, minimizando el riesgo de comprometer la integridad del componente durante las primeras fases del proyecto.

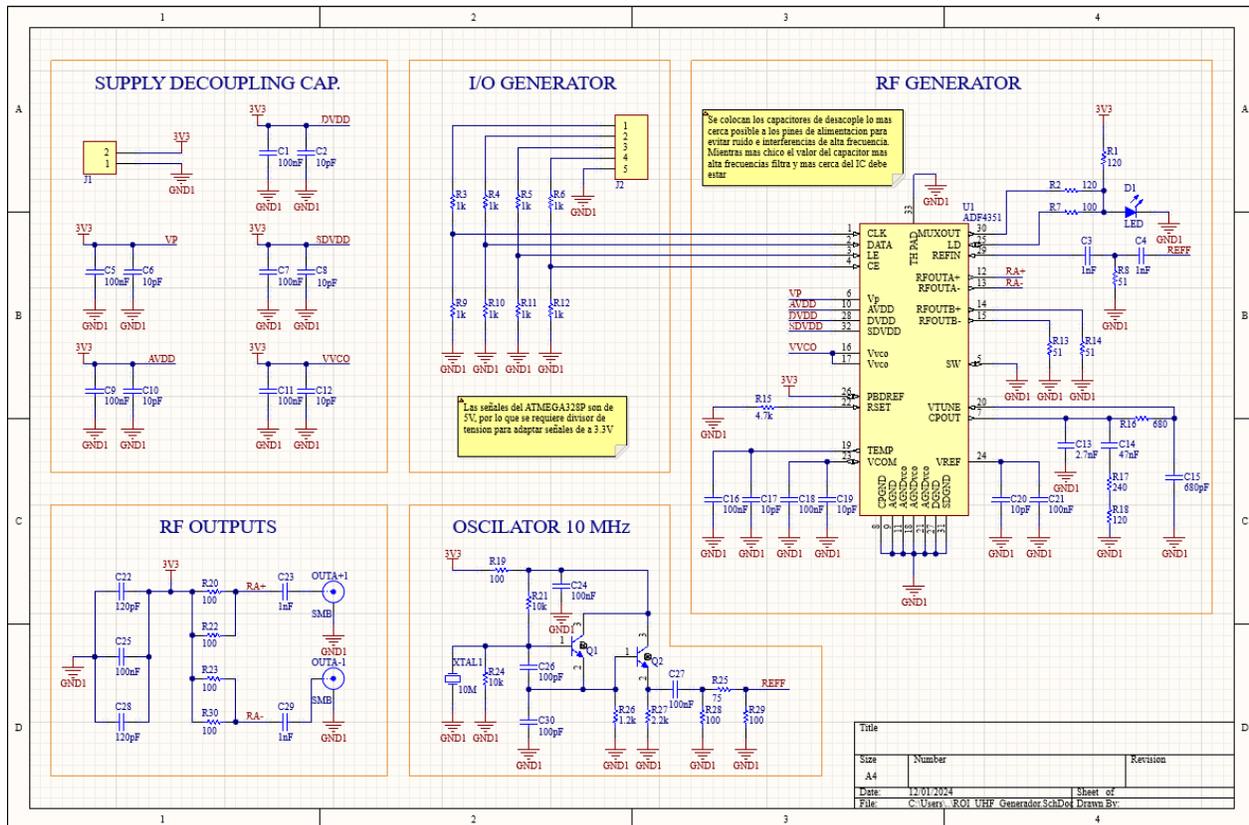
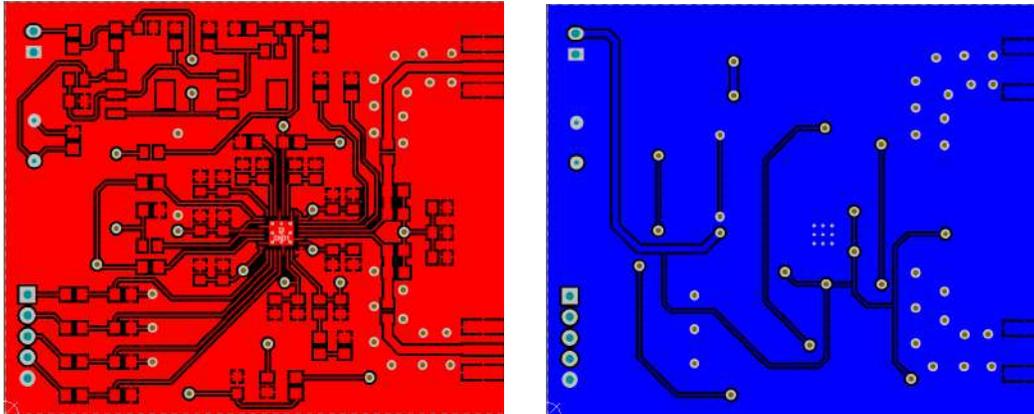


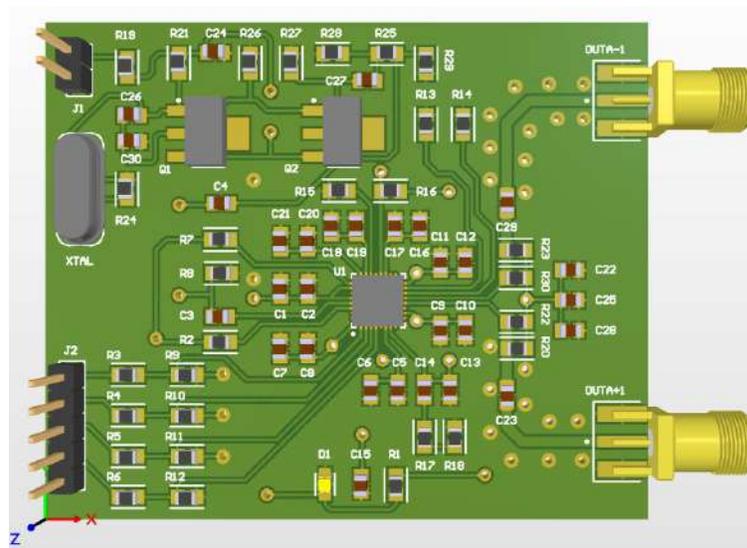
Figura C.16: Diagrama esquemático del generador.

El diseño del bloque generador se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de diseño de la placa microcontrolador-detector, dado que ambos trabajan con señales de RF. En este contexto, se garantizó que las señales fueran de impedancia controlada, a fin de evitar desajustes que pudieran comprometer la integridad de la transmisión.



(a) Diseño de la capa superior.

(b) Diseño de la capa inferior.



(c) Diseño 3D.

Figura C.17: Diseño PCB del generador.

Para el bloque generador se utilizó una placa adquirida a través de la plataforma AliExpress [7], seleccionada por su bajo costo y disponibilidad. Sin embargo, debido a la naturaleza del proveedor y la falta de información técnica detallada proporcionada en la descripción del producto, no se dispone de información sobre el diagrama esquemático y parámetros técnicos de la placa. Esto fue considerado al momento de realizar las pruebas y evaluaciones del sistema, aplicando un enfoque experimental para validar su funcionamiento en el diseño propuesto.



Figura C.18: Kit de evaluación - Generador ADF4351.

A continuación, se detalla el funcionamiento de cada bloque del kit de desarrollo.

- **ADF4351:** Es un circuito integrado basado en un oscilador controlado por tensión, capaz de generar una salida senoidal con una frecuencia en el rango 35-4400 MHz. Su salida es programable mediante registros de 32bits, estos serán analizados en la etapa del firmware.
- **Pines de comunicación:** Interfaz SPI que se utilizan la programación del generador. Consta de 4 canales: una línea de reloj (CLK), datos (DATA), chip enable (CE) y load enable (LE).
- **Oscilador de cristal:** El oscilador de cristal integrado en el encapsulado metálico genera una señal de referencia de 100MHz para poder sintetizar las frecuencias con el ADF4351.
- **Fuente regulada:** Consta de un CI de precisión y bajo ruido, y componentes que aseguran una señal de 3,3V estable para el funcionamiento del generador y con un choque de RF para evitar que las señales se propaguen por las líneas de alimentación.

C.3. Firmware

El firmware del microcontrolador de la placa controladora se programó en lenguaje C/C++, utilizando la herramienta de desarrollo Arduino IDE. Las tareas que deberá realizar el microcontrolador son:

- Inicializar generador y configurar parámetros de barrido en frecuencia
- Lectura y procesamiento de datos del detector
- Comunicación con la interfaz gráfica

El microcontrolador debe poder recibir e interpretar los parámetros enviados al generador indicados por el usuario mediante la interfaz gráfica, leer el valor del detector para cada frecuencia generada y devolver los datos leídos a la interfaz para poder ser graficados.

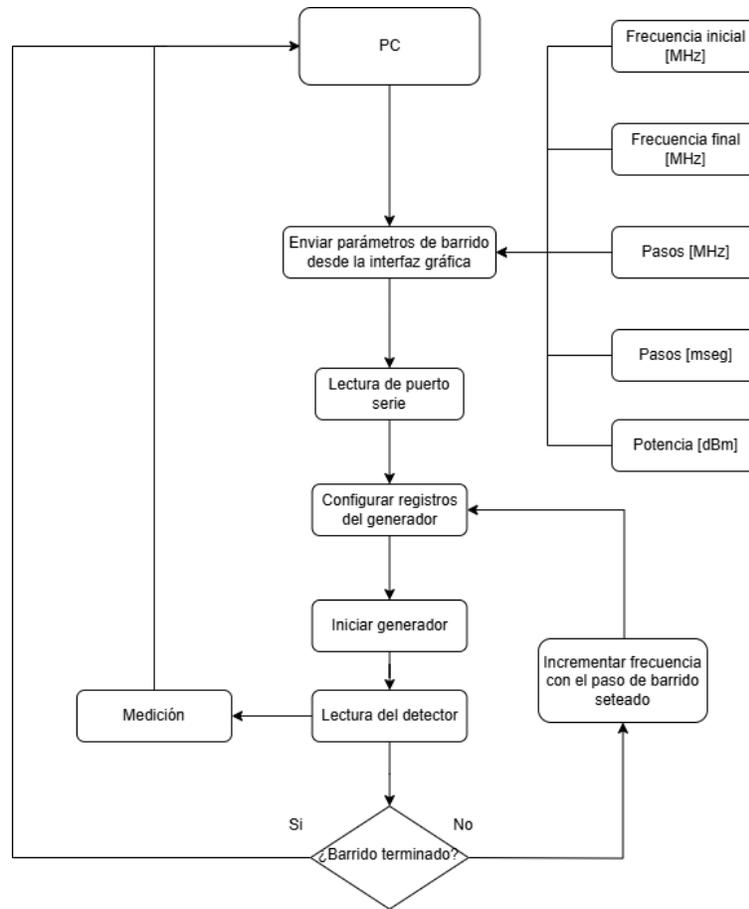


Figura C.19: Diagrama de flujo del algoritmo del microcontrolador.

C.3.1. RT05: Control del generador ADF4351

El integrado ADF4351 deberá ser configurado mediante 6 registros de 32 bits. Todos tienen en común un campo de tres bits reservado para el control. Estos registros deben ser enviados en orden descendente comenzando por el quinto. La frecuencia de salida se actualizará realizando los correspondientes cambios en el registro principal R0.

En el siguiente diagrama se indica el flujo del algoritmo a implementar para el barrido en frecuencias del generador. En una primera instancia se realizará un seteo de los valores generales del integrado tales como la frecuencia de referencia, el paso de frecuencia, el tiempo de paso en milisegundos y la potencia de salida del generador. Luego se iniciará el barrido en frecuencia sumándole a la frecuencia inicial el paso en frecuencia definido por el usuario.

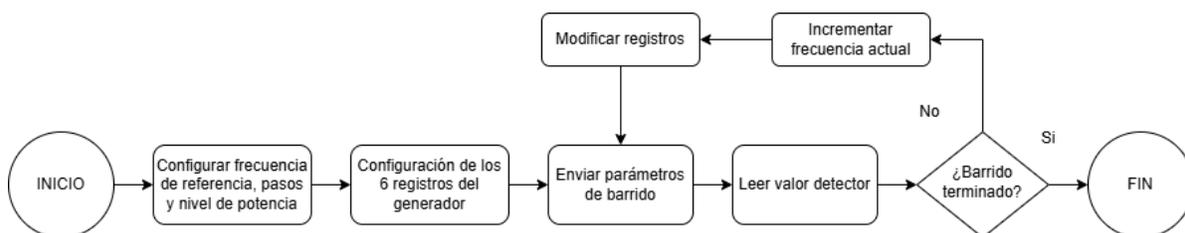


Figura C.20: Diagrama de flujo de algoritmo del generador.

Se hace uso de una librería para la configuración de cada registro del generador, donde se evalúan, a través de condicionales, todas las configuraciones posibles del generador y generando errores cuando se realizan combinaciones no permitidas. Esto permite modificar de manera muy detallada cada registro, ya que existen varias combinaciones de estos para generar una única frecuencia. Por este motivo, se adoptó la configuración de parámetros suministrada por el software provisto por el fabricante para lograr una configuración óptima.

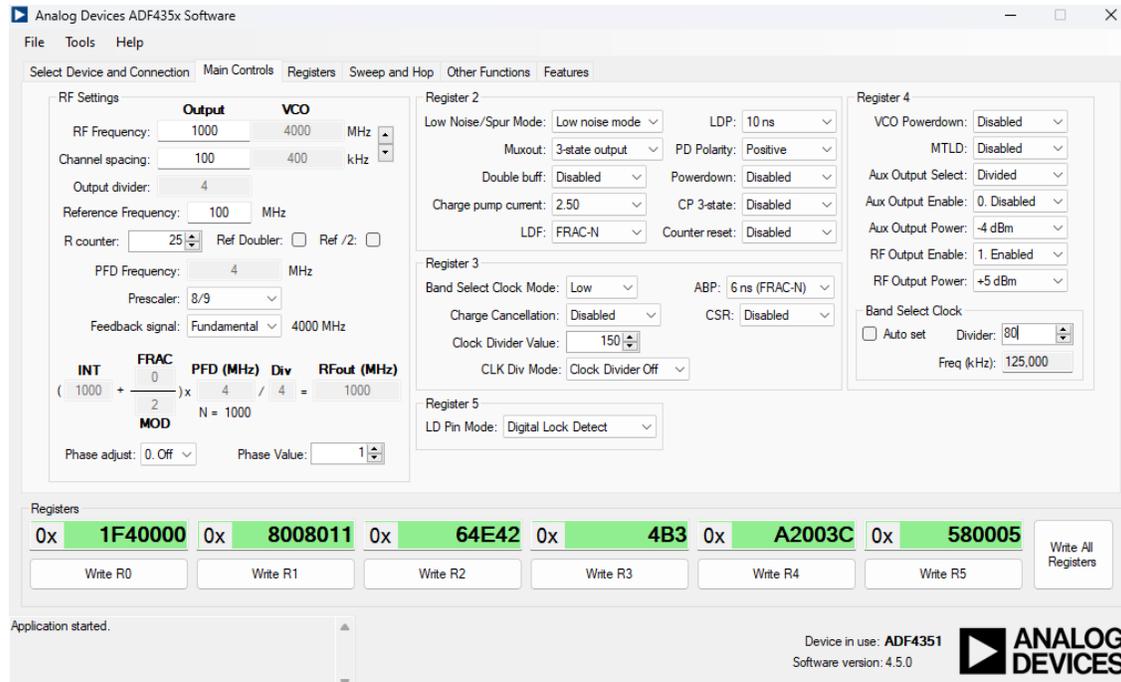


Figura C.21: Software provisto por el fabricante para la configuración de los registros.

En el ejemplo de la Figura C.21, se muestran los valores de los registros en función de parámetros cargados, para poder generar la frecuencia deseada. En caso de que hubiera un error, el software indica cuales son los parámetros incorrectos.

C.3.2. RT06: Recepción de datos del detector

Para leer los valores de medición del detector utilizará una de las entradas ADC incorporadas en el microcontrolador. Su longitud de palabra es de 10 bits, lo que implica que cuenta con 1024 posibles valores. Además de esto, se establece el valor de Vref en el pin de referencia analógica del microcontrolador. Este pin Vref del detector, entrega una señal estable de 1,8V para poder utilizarla como referencia en los ADC del microcontrolador. Por otro lado, establecer la tensión de referencia en este valor aumenta el rango dinámico, ya que, por el contrario, el ADC tomaría como referencia los 5V de alimentación, lo que generaría una pérdida significativa de resolución en el rango de tensión de interés.

Cabe destacar, que como se mencionó anteriormente, al tratarse de sistemas bajo prueba pasivos, solo se utilizara aproximadamente la mitad del rango dinámico total del detector, que son 900mV.

C.3.3. RT07: Comunicación con la interfaz gráfica

El microcontrolador estará escuchando constantemente el puerto serie a la espera de datos válidos. Estos datos tienen un orden y formato determinado que será establecido por la interfaz gráfica, por lo que la comprobación de datos válidos será efectuada directamente en la PC, así como los cálculos correspondientes para los gráficos de forma de no sobrecargar el microcontrolador.

Para esta comunicación, se establece un valor de baudrate de 9600bps, de manera de dar tiempo para que se establezcan las frecuencias del generador y para evitar errores en la lectura de los datos enviados por el mismo.

C.4. Software

La interfaz de usuario en la PC será la encargada de la comunicación con el instrumento, control de sus funciones, procesar y mostrar los resultados. La programación se realizará en lenguaje Python, por el bajo consumo de recursos, su simplicidad y la gran variedad de librerías que agilizaran su implementación.

C.4.1. RT08: Interfaz gráfica

La interfaz contará con una ventana donde el usuario podrá configurar los parámetros de barrido y seleccionar los gráficos a visualizar. También se evaluarán todas las condiciones de validación de parámetros, para evitar cualquier error en los datos ingresados y poder corregirlos antes de ser enviados al microcontrolador. Los parámetros que el usuario puede configurar son los siguientes:

- **Comunicación:** En este apartado el usuario puede seleccionar el puerto COM y baudrate y luego pulsar el botón conectar para corroborar que la conexión se estableció exitosamente.
 - **Puerto COM:** para seleccionar el puerto COM del dispositivo y establecer la conexión ya que puede cambiar si se cambia el dispositivo de comunicación o la PC utilizada.
 - **Baudrate:** que indica la velocidad de transferencia de datos utilizada para la comunicación serie.

- **Parámetros de barrido:** En esta sección, el usuario puede configurar los parámetros de barrido para el cálculo de la ROE. Estos parámetros son:
 - **Frecuencia inicial:** Frecuencia inicial de barrido en MHz
 - **Frecuencia final:** Frecuencia final de barrido en MHz
 - **Pasos:** Paso en MHz entre una frecuencia y otra
 - **Pasos:** Paso en milisegundos para el incremento de la frecuencia de barrido
 - **Potencia:** Nivel de señal a la salida del generador

- **Botones y leyendas:** La interfaz cuenta con tres botones para graficar para seleccionar los gráficos, una checkbox e información de los gráficos. A continuación, se detalla cada uno
 - **Botón ROE:** Para visualizar únicamente la ROE resultante del barrido en frecuencia
 - **Botón VMAG:** Para visualizar VMAG que es la tensión a la salida del detector, sin procesar, con mayor utilidad en el proceso de depurado y calibración de la interfaz grafica
 - **Botón ROE+VMAG:** Para poder visualizar ambos gráficos en simultáneo con sus respectivos ejes.
 - **Auto escalado:** Mediante esta checkbox, se puede habilitar o deshabilitar el ajuste de escala automático para poder visualizar detalles de los gráficos obtenidos. La interfaz también consta de un apartado donde se provee información de los valores máximos, mínimos y de cursor de las gráficas obtenidas para obtener los datos más relevantes de los gráficos.

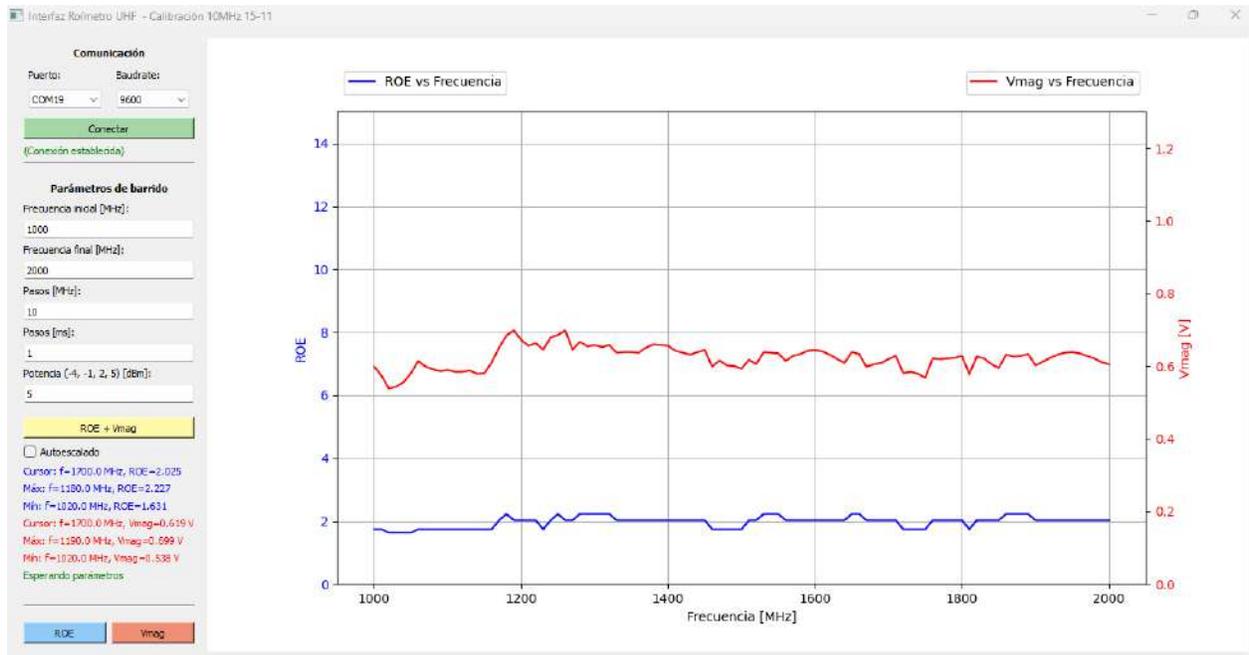


Figura C.22: Interfaz gráfica del roímetro.

C.4.2. RT09: Conexión, envío y recepción de datos

El usuario abrirá la aplicación, luego de haber conectado el instrumento y deberá seleccionar el puerto COM al cual se encuentra conectado y el baudrate, que por defecto viene seleccionado en un valor de 9600 para mejorar la estabilidad, pero que podría aumentarse para disminuir el tiempo de barrido.

Si el dispositivo se conectó correctamente a la interfaz gráfica, debajo de estos botones aparecerá la leyenda “Conexión establecida”. Si, por el contrario, la conexión no fue exitosa no se indicará ninguna leyenda.

Una vez establecida la comunicación correctamente, el usuario podrá ingresar en las diferentes etiquetas los parámetros de barrido deseados. Estos parámetros deben cumplir ciertas condiciones en función de la calibración y el ancho de banda de funcionamiento, además de las restricciones propias del generador, por lo que en caso de no ingresar un parámetro correcto la interfaz indicará con una leyenda cual es el error. Luego de setear correctamente los parámetros, estos se envían al microcontrolador para que los cargue en el generador, genere el barrido en frecuencia y realice la medición de la señal del detector.

Los valores permitidos son los siguientes:

Parámetro	Valores permitidos
Frecuencia inicial	$1000\text{MHz} \leq f$
Frecuencia final	$f \leq 2000\text{MHz}$
Pasos [MHz]	$10\text{MHz} \leq f \leq 1000\text{MHz}$, con $f \in \mathbb{N}$
Pasos [ms]	$0,001\text{ms} \leq t \leq 20000\text{ms}$
Potencia	$[-4, -1, 2, 5]$ dBm

Tabla C.3: Parámetros de barrido permitidos.

Una vez ingresados y enviados los parámetros, aparece la leyenda “Calculando” hasta que el microcontrolador termine de leer y enviar los datos del detector a la interfaz para su posterior procesamiento.

C.4.3. RT10: Procesamiento de datos recibidos

El microcontrolador recibe los datos de la interfaz gráfica desde el puerto serie, setea los valores en el generador, inicia la lectura del detector y cada valor leído se envía de nuevo a la interfaz gráfica, donde los valores son almacenados en listas que incrementan su longitud con cada valor de Vmag leído para cada una de las frecuencias generadas. De esta forma, al finalizar el barrido, se procesan y grafican todos los valores almacenados en estas listas. Esto se hace para que la mayor carga computacional esté sobre la PC, ya que, de otra forma, dadas las limitaciones del microcontrolador, los tiempos de barrido se incrementarían notablemente.

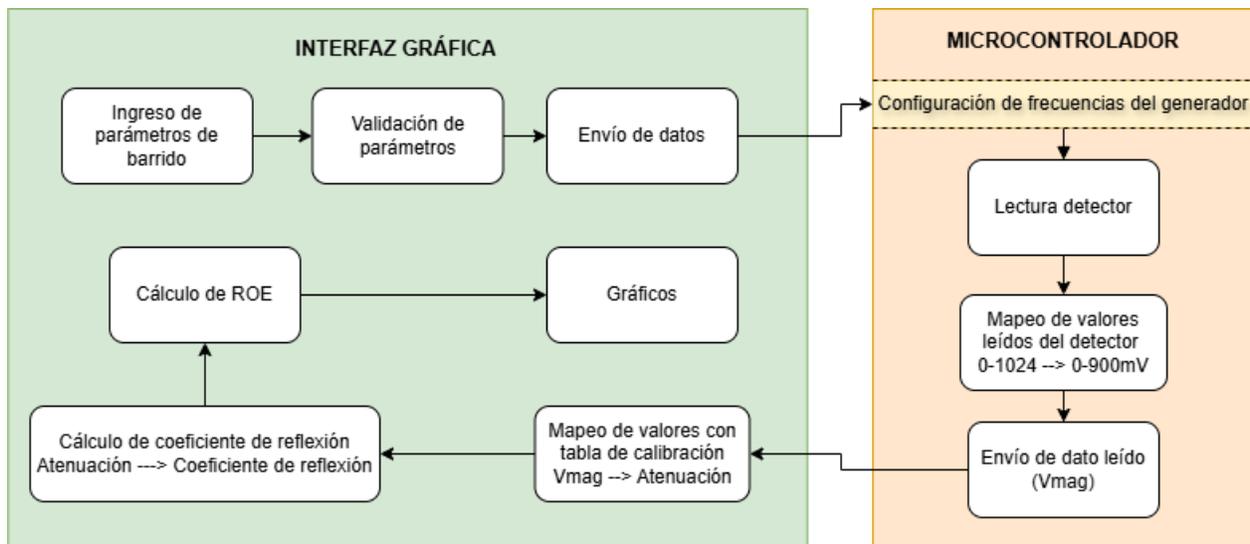


Figura C.23: Diagrama de procesamiento de datos leídos por el detector.

C.4.3.1. Mapeo de valores del ADC

La salida Vmag del detector entrega una tensión que varía entre 0 y 1,8V según la hoja de datos del fabricante (Figura C.5), pero como se mencionó anteriormente para este proyecto el valor máximo estará cercano a 1V, por la naturaleza pasiva del sistema bajo prueba, por lo que no se utilizará el rango completo. Este valor de Vmag se mapea para poder tener una correspondencia entre los valores digitales del ADC y la tensión Vmag del detector. Se utiliza la tensión de referencia Vref del detector, para una mayor precisión en la conversión, por lo que los valores leídos responden a esta ecuación.

$$Vmag = D \cdot (V_{ref}/1024) \quad (C.11)$$

Siendo D, el valor digital obtenido por el ADC en el pin A0.

Esta conversión se realiza en el microcontrolador y una vez obtenido el valor de Vmag, se envía a la interfaz gráfica en pares de valores de la forma (Frecuencia, Vmag). Esto permite tener una correspondencia entre la frecuencia seteada y el valor de Vmag obtenido. Una vez recibidos los pares de valores, se almacenan en listas para su posterior conversión y visualización gráfica.

C.4.3.2. Cálculo de ρ y ROE

El siguiente paso en la interfaz gráfica es realizar la conversión de V_{mag} a valores de atenuación correspondientes. Este valor de atenuación es una medida de la diferencia, en decibeles, entre la señal incidente y la reflejada, por lo que a partir de ese valor se puede obtener la ROE de acuerdo a estas ecuaciones y a la curva de respuesta del detector (Figura C.14).

$$\rho = V_r/V_i \qquad ROE = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \qquad (C.12)$$

$$Atenuacion = 20 \log(|\rho|) \qquad \rho = 10^{\frac{Atenuacion}{20}} \qquad (C.13)$$

$$\Rightarrow ROE = \frac{1 + 10^{\frac{Atenuacion}{20}}}{1 - 10^{\frac{Atenuacion}{20}}} \qquad (C.14)$$

La correspondencia entre V_{mag} y los valores de atenuación se obtienen de la tabla de calibración.

C.4.3.3. Calibración

Para la calibración del dispositivo se intercalan atenuadores en el camino de la señal reflejada, de manera de poder tener pares de valor (V_{mag} , Aten) para cada valor de frecuencia. Para la calibración se armó el siguiente banco de trabajo y se utilizaron dos atenuadoras variables, un HP8494B y HP8496B con pasos de 1dB y 10dB de atenuación respectivamente, como se muestran en la Figura C.24. Estos atenuadores presentan una respuesta plana en un amplio rango de frecuencias que llega hasta los 18GHz, lo que resulta indispensable para que en el proceso de calibración no se añada error a las mediciones realizadas.



Figura C.24: Atenuadores utilizados para la calibración.

El procedimiento para la calibración fue el siguiente:

- Con ambos atenuadores en 0dB, se realiza un barrido en frecuencia de 1 a 2GHz y se mide la V_{mag} obtenida para cada valor de frecuencia. Para este caso se utilizaron pasos de frecuencia de 10MHz.
- Se repite el barrido en frecuencia para cada paso de atenuación. Se midió en el rango de 0-30dB, con pasos de 1dB.
- Con los dos pasos anteriores se creó un diccionario en Python, que será utilizado por la interfaz gráfica para hallar el valor de atenuación correspondiente para cada V_{mag} leído, en función de la frecuencia actual.

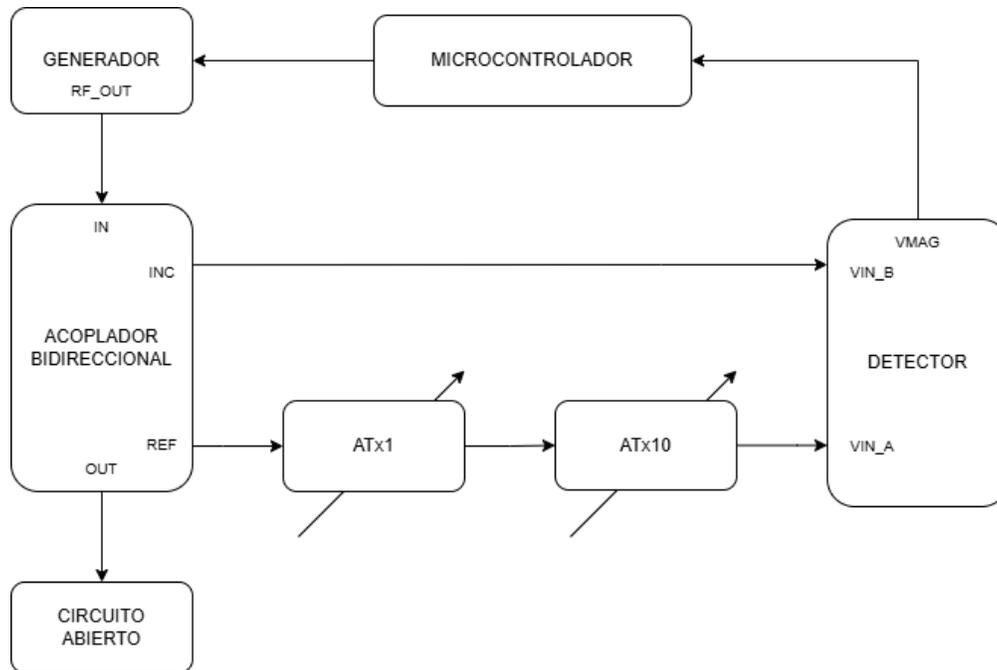


Figura C.25: Banco de trabajo utilizado para la calibración.

Los diccionarios son una estructura de Python que resulta útil en este proyecto. Funciona con pares clave: valor. El parámetro “clave” corresponde a cada una de las frecuencias de 1 a 2GHz, en pasos de 10MHz, por lo que contempla todo el rango de frecuencias completo del roímetro. Por otro lado, cada “valor” está asociado a un par de valores (Vmag, Aten). De esta forma, para cada frecuencia seleccionada, se lee el valor Vmag obtenido del detector y se le asigna el valor de atenuación correspondiente, realizando un algoritmo de búsqueda en Python. Con este valor de atenuación se realiza finalmente el cálculo de ROE (Ecuación C.14).

Frecuencia [MHz]	Vmag [V], Atenuación [dB]			
1000	0.0108, 1.2	0.0521, 2.2	[...]	0.8521, 32.1
1010	0.0182, 1.2	0.0146, 2.2	[...]	0.8854, 32.1
1020	0.1558, 1.2	0.1521, 2.2	[...]	0.8956, 32.1
[...]	[...]	[...]	[...]	[...]
1980	0.1131, 1.2	0.1221, 2.2	[...]	0.8796, 32.1
1990	0.0918, 1.2	0.1571, 2.2	[...]	0.8554, 32.1
2000	0.1248, 1.2	0.1518, 2.2	[...]	0.9157, 32.1

Tabla C.4: Formato de la tabla de calibración con pasos de 10MHz.

C.4.4. RT11: Gráficos

El usuario puede visualizar los resultados obtenidos en dos gráficos. El grafico de ROE es el más relevante y el que se tiene como objetivo este proyecto, Se puede visualizar VMAG, que es de utilidad para la validación de resultados o depuración del programa o ambos en simultáneo ROE+VMAG.

Como se mencionó anteriormente, la interfaz proporciona información relevante de los gráficos que se resultan útiles al momento de analizar las curvas. Así también la función de auto escalado, para visualizar con mayor detalle las curvas obtenidas.

C.5. Estructura física

La estructura física del dispositivo está compuesta por una base donde se fijan y se interconectan los diferentes módulos, placas electrónicas, conectores y adaptadores que componen el roímetro.

C.5.1. RT12: Soporte

El soporte principal es un compartimento para la disposición de las placas que consta de una base plástica que permite la fijación segura de estas a una estructura sólida. El objetivo es optimizar el uso del espacio disponible, garantizando un diseño compacto y facilitando tanto el montaje como el mantenimiento de los componentes. Además, se implementaron conectores que permiten desmontarlo fácilmente para su revisión y realizar mediciones durante las pruebas.



(a) Disposición de módulos.



(b) Panel frontal.

Figura C.26: Roímetro con soporte.

El módulo que interconecta las placas del generador y el microcontrolador es la placa con el arreglo resistivo que no se agregó al diseño original de la placa microcontrolador-detector. Esta se utiliza para llevar la alimentación al generador y adaptar la tensión de los pines de comunicación del microcontrolador que son de 5V y generar los 3,3V hacia los pines de comunicación del generador.

El banco de mediciones para las diferentes pruebas que se realizaron, integrando todos los módulos y etapas, queda de la siguiente manera.

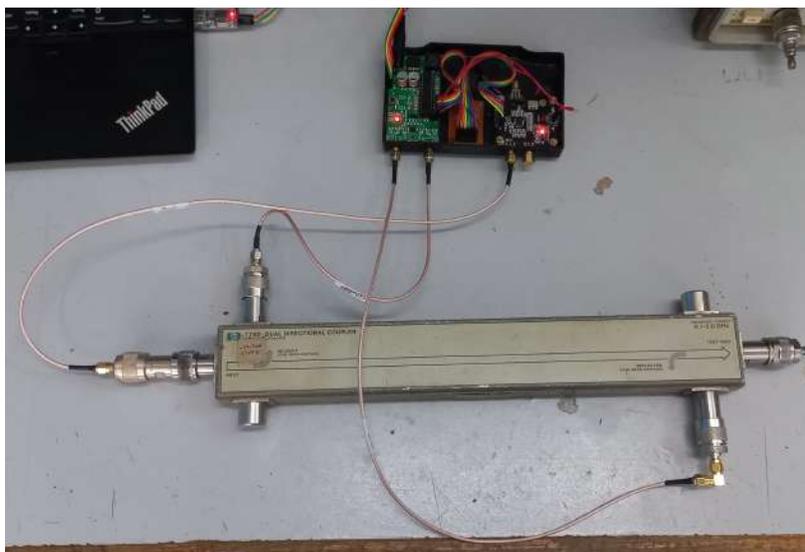


Figura C.27: Banco de medición completo.

Apéndice D

Plan de pruebas

D.1. Introducción

Este documento corresponde al Plan de Pruebas del Roímetro para UHF con ancho de banda extendido. El propósito del mismo es verificar y validar el funcionamiento del dispositivo. A continuación, se detallan las pruebas y se muestran los resultados más relevantes.

Los bloques del dispositivo fueron sometidos a diferentes pruebas para evaluar el correcto funcionamiento.

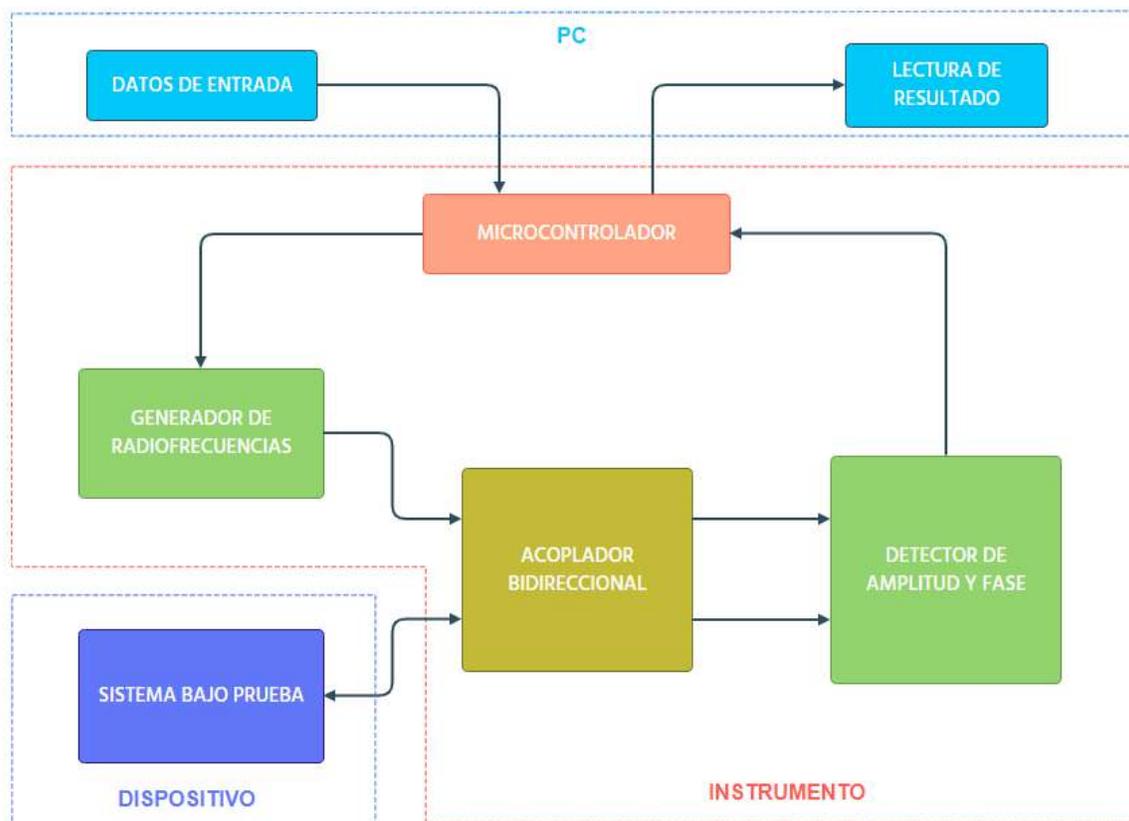


Figura D.1: Diagrama en bloques del roímetro.

Módulo	ID	Prueba	Tipo de Prueba	Procedimiento	Instrumental	Resultado Esperado	Fecha de Prueba	Resultado Obtenido	Observaciones
Controlador-Generador	#1	Comprobar comunicación serie	Prueba unitaria	Cambiar valores de registro del generador y observar los cambios mediante puerto serie	PC-Controlador-Generador	El generador debe modificar correctamente los registros con los valores enviados	2023	Se obtuvo el resultado esperado	
	#2	Verificación de frecuencia fija	Prueba unitaria	Configurar un valor de frecuencia específico y observar la frecuencia de salida del generador	PC-Controlador-Generador	La salida del generador debe corresponder con la frecuencia seteada	2023	Se obtuvo el resultado esperado	
	#3	Verificación de barrido en frecuencia	Prueba unitaria	Indicar un barrido en frecuencia y observar la frecuencia a la salida del generador	PC-Controlador-Generador	La salida del generador debe corresponder con el rango de frecuencias indicado	2023	Se obtuvo el resultado esperado	
	#4	Verificación de la amplitud en el ancho de banda especificado	Prueba unitaria	Realizar barrido en frecuencia, en el rango de 1 a 2GHz y observar la variación de la amplitud de salida	PC-Controlador-Generador	La amplitud de la señal del generador debe ser constante para el rango de frecuencias indicado	2023	Se obtuvo el resultado esperado, con pequeñas variaciones en la amplitud debido a la respuesta no ideal del generador	Aunque en el barrido se observaron fluctuaciones en la amplitud de la señal de salida, estas serán consideradas al momento de la calibración
Atenuador	#5	Medición de atenuación real	Prueba unitaria	Medir la amplitud de la señal del generador antes y después de los atenuadores para obtener la atenuación real en cada paso. Para ello se utilizan dos atenuadores con pasos de 1dB y 10dB colocados en serie barriendo desde 0 a 30dB	Generador-Atenuadores-Detector-Analizador de espectro-PC	Los valores de atenuación se corresponden con los valores seleccionados	2024	Si bien no se obtuvo una respuesta lineal de los atenuadores, debido al deterioro mecánico de los mismos, la respuesta fue la esperada en el resto de los valores medidos	Dado que la calibración se realizara con estos atenuadores, simulando cargas fantasmas, los errores quedan compensados. El único inconveniente será la falta de estos valores en las tablas finales de calibración
Detector	#6	Medición de Vmag	Prueba unitaria	Medir la tensión Vmag generada en función de la relación entre señal incidente y reflejada. Comparar la medición del controlador con el multímetro	Detector-Controlador-Multímetro	La tensión entregada debe estar en el rango de valores indicados en la hoja de datos del detector	2024	La tensión a la salida del detector (Vmag) corresponde con la relación entre la señal incidente y reflejada	
	#7	Caracterización de la curva de repuesta del detector	Prueba unitaria	Armar el banco de prueba intercalando los atenuadores en el camino de la señal reflejada, simulando cargas conectadas en el sistema bajo prueba. Medir la Vmag obtenida para cada paso de atenuación y para todo el rango de frecuencias del dispositivo (1-2GHz) en diferentes saltos de frecuencia	Detector-Controlador-PC-Generador-Atenuadores-Acoplador	Se esperan variaciones en la respuesta en función de las variaciones en los atenuadores medidas en la prueba #5	2024	Se obtuvo el resultado esperado en la respuesta del detector. También se observaron desviaciones en algunas frecuencias principalmente debida a las desadaptaciones (cables, pistas, conectores).	Se obtuvieron dos curvas, realizando varios barridos, y los resultados fueron muy aproximados a la respuesta indicada en la hoja de datos
Prototipo circuito detector	#8	Caracterización de la curva de repuesta del prototipo circuito detector	Prueba integral	Se realiza nuevamente la caracterización de la respuesta del detector realizada en la prueba #7, con la placa fabricada para observar si hay discrepancias respecto de las pruebas anteriores	Detector-Controlador-PC-Generador-Atenuadores-Acoplador	Se espera la misma respuesta que en las pruebas con alguna disminución en la dispersión de algunos valores	2024	Se obtuvieron las mismas curvas del detector que en las prueba #7. Por lo que, en primer lugar, el diseño de la etapa de detección no se vio notablemente modificada respecto a la placa que se usaba para las pruebas antes del diseño. Por otro lado, no se observaron disminuciones notables en las desviaciones de los valores a bajas frecuencias, por lo que se concluye que son debidas respuesta en frecuencia del detector, ya que se repitió la prueba #7 3 veces obteniendo las mismas curvas.	Las desviaciones en la lectura de la respuesta del detector tiene mayor influencia de 1-1,4GHz. Repitiendo las mediciones se verifica que es un error sistemático, descartando cualquier ruido/interferencia aleatoria
Interfaz grafica	#9	Verificación de comunicación	Prueba integral	Enviar mensajes y verificar la correcta recepción de los mismos	PC-Controlador-Generador-Detector-Acopladores	Comunicación correcta	2024	La comunicación UART se realiza de forma exitosa entre la PC y el microcontrolador ATmega328, en lugar de la comunicación USB integrada en la placa Arduino UNO utilizada para las pruebas	
	#10	Recepción y procesamiento de datos	Prueba integral	Verificar la correcta recepción y procesamiento de datos.	PC-Controlador-Generador-Detector-Acopladores	Obtener las curvas de Vmag y ROE esperadas para diferentes niveles de carga en el acoplador bidireccional	2024	Se obtienen respuestas esperadas con algunas desviaciones en los valores entre 1-1,4GHz debido a las desadaptaciones indicadas en la prueba #8	
	#11	Recepción y procesamiento de datos con tabla de calibración	Prueba integral	Verificar la correcta recepción y procesamiento de datos incorporando la tabla de calibración	PC-Controlador-Generador-Detector-Acopladores	Obtener las curvas de Vmag y ROE con menor error en las lecturas	2024	Se obtienen respuestas esperadas con mejoras en las lecturas, pero con respuestas erráticas hasta 1,4GHz producto de las desadaptaciones. De 1,4-2GHz el dispositivo responde correctamente dentro de los límites esperados	En los resultados finales de las pruebas se observan errores de medición mínimos producto de la operación en coma flotante del microcontrolador, pérdidas de inserción de los cables/atenuadores utilizados para la calibración y desadaptaciones de la placa fabricada

D.3. Resultados

D.3.1. Curva de respuesta del detector

Para comprobar que la respuesta del detector es la indicada en la hoja de datos, se realizaron barridos en frecuencia para rango de funcionamiento del dispositivo (de 1 a 2GHz). Los atenuadores se usaron como carga fantasma, ya que se intercalaron en el camino de la señal reflejada de manera de poder obtener diferentes amplitudes de esta para una misma señal incidente. En este caso se utilizaron dos atenuadores en serie y se hizo la prueba de 0 a 30dB en pasos de 2dB. Para cada valor de atenuación se generó un barrido en frecuencia de 1 a 2GHz en pasos de 50MHz y se midió la respuesta del detector en magnitud (Vmag). Se procedió de la misma manera para cada valor de atenuación, obteniéndose curvas de Vmag vs Atenuación y agrupándolas luego en valores de Vmag vs Frecuencia. Luego se realizó un promedio de Vmag vs Frecuencia, para cada paso de frecuencia y finalmente se hizo un promedio sobre todo el rango, obteniéndose los siguientes resultados.

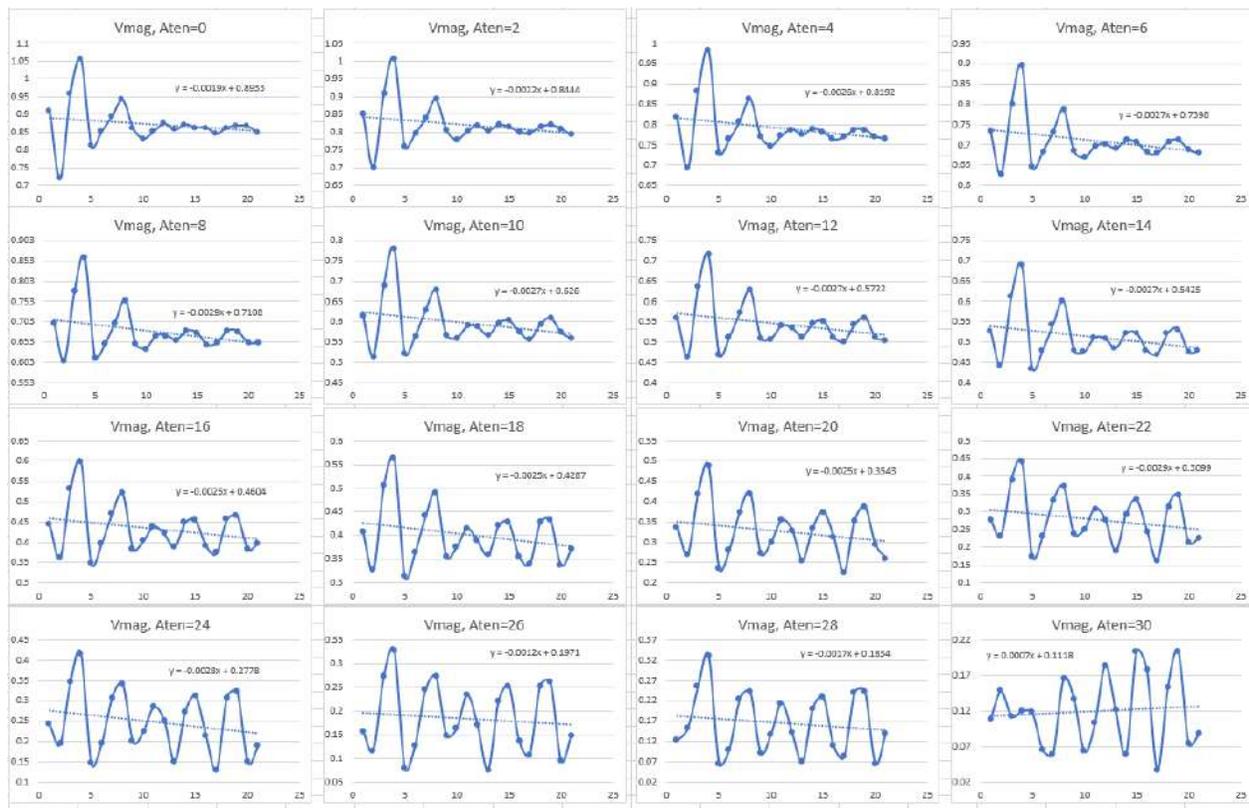


Figura D.2: Curvas Vmag vs frecuencia para diferentes pasos de atenuación.

Se observan fluctuaciones en los barridos de frecuencia debido a la precisión limitada del microcontrolador y a desadaptaciones, pero los valores están en torno a los valores medios esperados para estas pruebas.

Por otro lado, se obtuvieron todos los pasos de atenuación para cada frecuencia en particular, de manera de poder caracterizar la respuesta del detector en función de la atenuación y la frecuencia. Luego se realizó una regresión lineal sobre cada curva obtenida y sobre el total se realizó el promedio para obtener la curva de respuesta aproximada del detector.



Figura D.3: Curvas Vmag vs atenuación para cada paso de frecuencia.

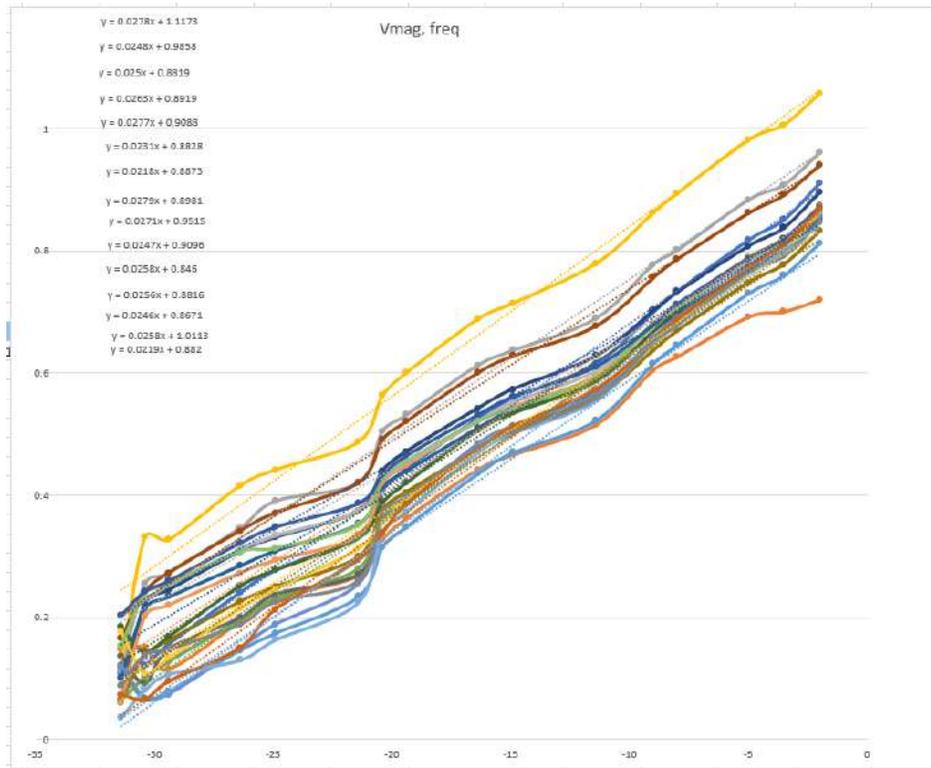


Figura D.4: Comparación curvas Vmag vs atenuación para cada frecuencia.



Figura D.5: Curvas real del detector (Vmag promedio vs atenuación promedio).

D.3.2. Resultados interfaz gráfica

A continuación, se muestran las curvas obtenidas mediante la interfaz gráfica luego del proceso de calibración. Este proceso es indispensable para tener una correspondencia directa entre V_{mag} , que es la salida del detector, y la atenuación entre señal incidente y reflejada. Se realizó la calibración y se obtuvo V_{mag} para cada valor de atenuación, valor que se utilizó posteriormente para el cálculo de la Relación de Onda Estacionaria (ROE).

Se midieron dos cargas para verificar el rango dinámico de funcionamiento. Circuito abierto, que representa una reflexión total y, por lo tanto, señales incidente y reflejada de aproximadamente la misma magnitud, obteniendo del detector una señal de unos 900mV.

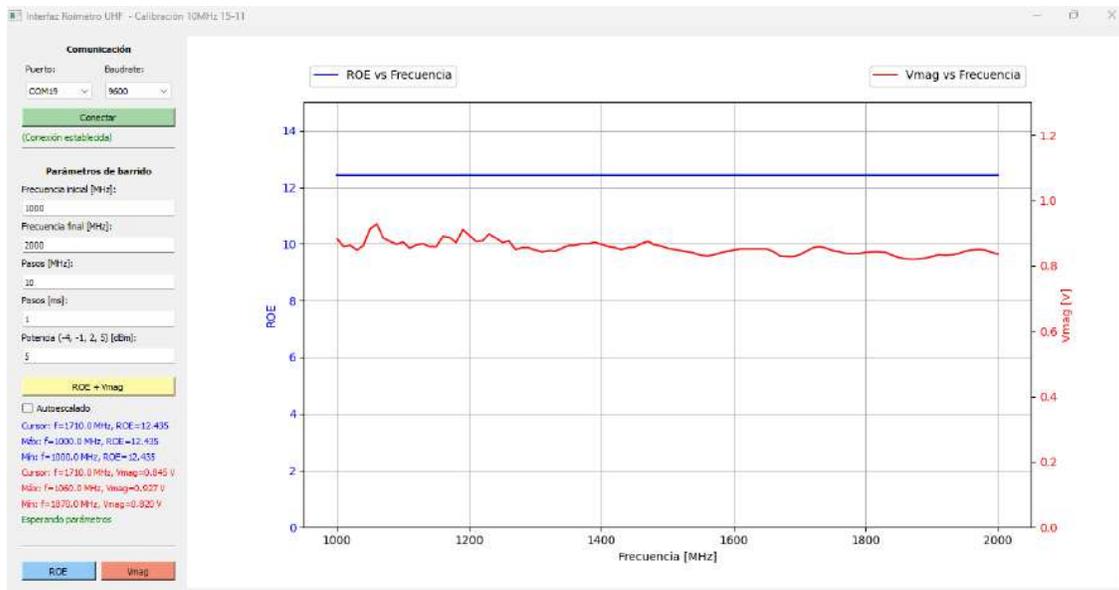


Figura D.6: Respuesta del roímetro para circuito abierto.

Se procedió de igual modo con una carga de 50Ω , que representa adaptación total, y que idealmente indica una señal incidente de mucha mayor amplitud que la señal reflejada.

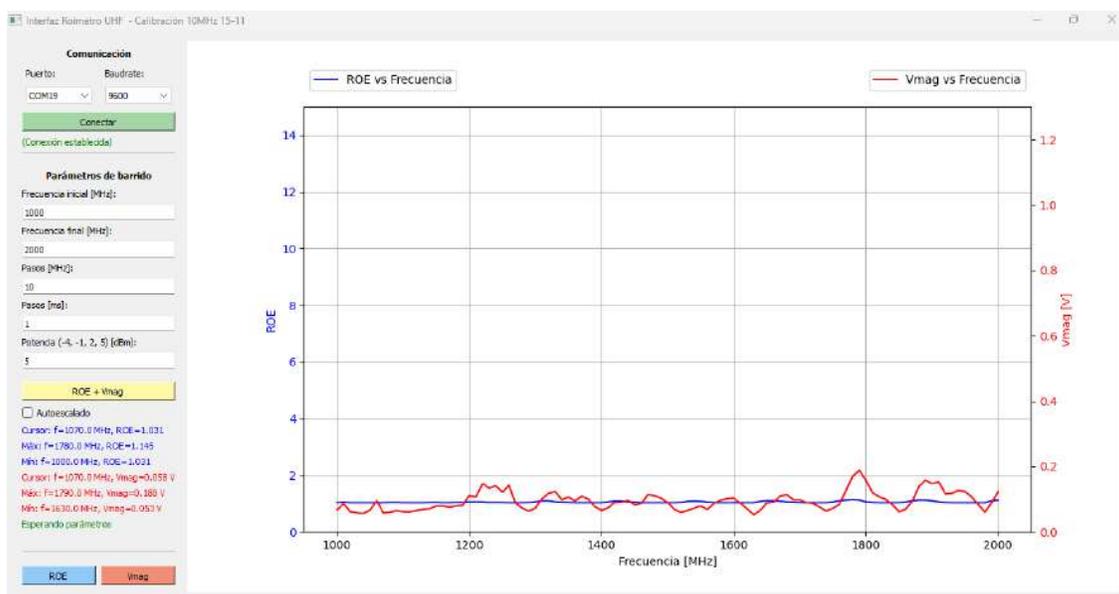


Figura D.7: Respuesta del roímetro para circuito adaptado (50Ω).

Luego de esta verificación se realizaron mediciones con cargas diferentes que representan tres valores distintos de ROE y se obtuvieron los siguientes resultados.

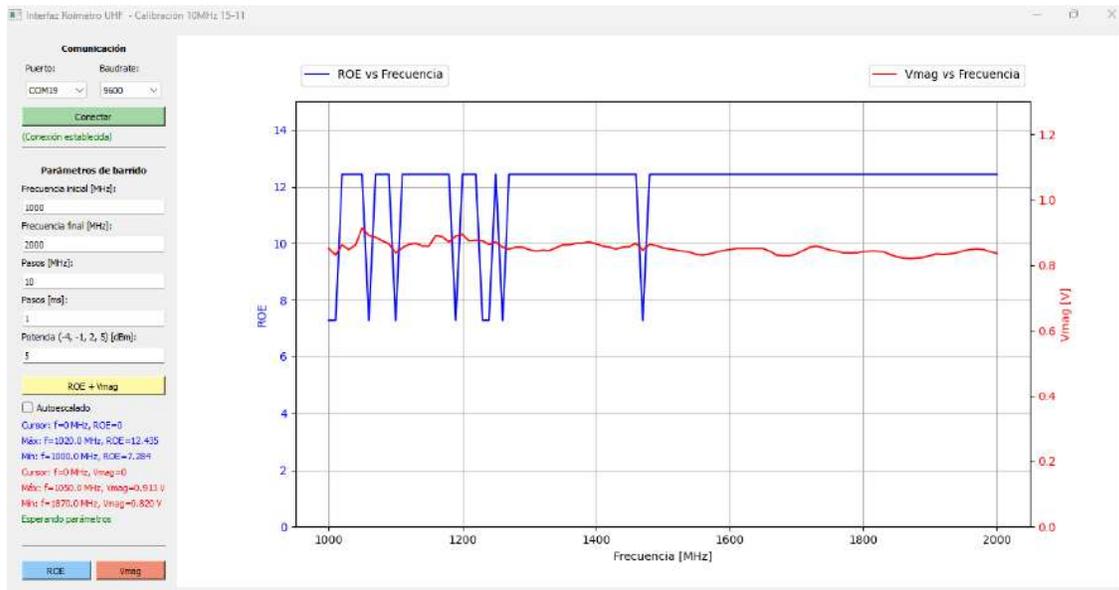


Figura D.8: Respuesta del roímetro para una carga de 10kΩ.

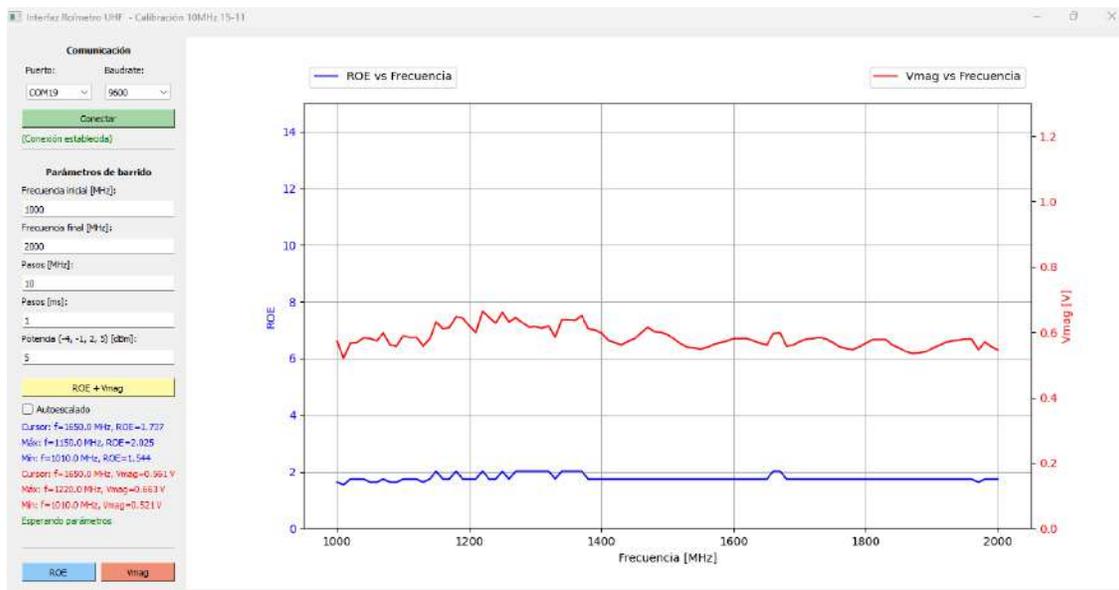


Figura D.9: Respuesta del roímetro para una carga de 100Ω.

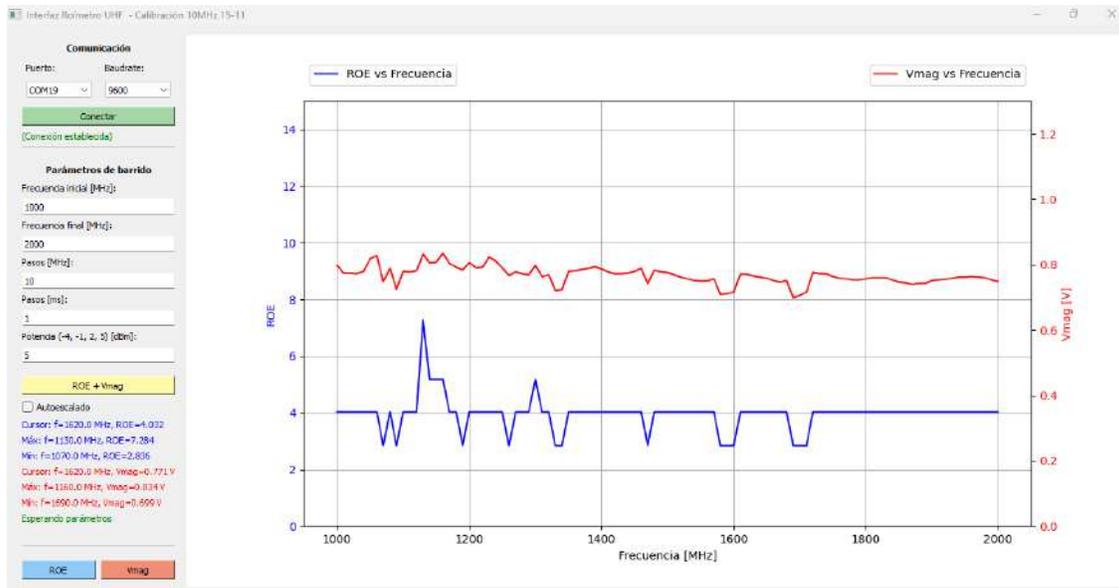


Figura D.10: Respuesta del roímetro para una carga de 10Ω .

En los casos de valores resistivos más altos, se observaron mayores fluctuaciones en la medición debido a los pasos de atenuación utilizados, ya que, al ser una relación exponencial, variaciones pequeñas de V_{mag} implican variaciones de mayor amplitud en la ROE obtenida. Por otro lado, la calibración se realizó con pasos de atenuación de 1dB, lo cual limita la resolución de la ROE obtenida.

En el caso de la carga de 10k las fluctuaciones en las lecturas obtenidas se deben a que los dos valores más grandes que se pueden obtener, con la tabla de calibración obtenida, son 7 y 12 aproximadamente, lo cual limita la lectura de valores de ROE intermedios como así también amplía los errores en la medición cuando se tiene que aproximar la medición a uno de estos dos.

El rango máximo de medición está limitado principalmente por las características técnicas del detector. En particular, el piso de ruido del este, en conjunto con las pérdidas de inserción de los cables y conectores fijaran un valor mínimo del coeficiente de reflexión que se traduce en el máximo valor de ROE que se puede obtener.