

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“Diseño de método de caracterización y calibración
secuencial para módulos de recepción genéricos aplicado a
investigación académica”**

TESIS

Que para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias

Presenta:

Alfredo Espinoza Ortiz

Director de tesis:

Dr. Nicola Radnev Nedev

Codirector de tesis:

Dr. Mario Alberto Curiel Álvarez

Mexicali, B.C.

Enero 2025

Índice de contenido

Lista de Figuras	I
Lista de tablas	III
Dedicatoria	IV
1 Capítulo 1: Introducción al tema de investigación	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema de investigación.....	4
1.2.1 Descripción del problema	4
1.2.2 Formulación del problema	5
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos de la investigación	6
1.4.1 Objetivo general.....	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
2 Capítulo 2: Marco teórico de la investigación	8
2.1 Ecuaciones de Maxwell y su relación con la teoría de circuitos.....	8
2.2 Voltaje, corriente eléctrica, resistencia y potencia.....	9
2.3 Corriente alterna, valor RMS y potencia en corriente alterna	11
2.4 Impedancia y teorema de la máxima transferencia de potencia	12
2.5 Decibeles.....	13
2.6 Señales de radiofrecuencia.....	14
2.7 Teoría de líneas de transmisión y ejemplos	15
2.8 Acoplador direccional.....	17
2.9 Atenuadores	18
2.10 Generador de señales de radiofrecuencia.....	18
2.11 Switches de radiofrecuencia	19
2.12 Analizador de espectro de barrido	20
2.13 Combinadores y divisores de potencia	21
2.14 Amplificador de bajo ruido.....	22
2.15 Antenas	22
2.16 Filtros	23
2.17 Fuentes de voltaje de corriente directa y digitales	24

2.18	Concepto de módulo de recepción y sus características	25
2.19	Mediciones de caracterización: Parámetros-S, ganancias y pérdidas de retorno.....	26
2.20	Mediciones de caracterización: Punto de intercepción de tercer orden	27
2.21	Mediciones de caracterización: Figura de ruido	30
2.22	Sistema de caracterización	31
3	Capítulo 3: Diseño de rutina de caracterización, selección de módulo de recepción genérico, diseño y construcción de sistema de caracterización secuencial	32
3.1	Rutina de caracterización general para un módulo de recepción.....	33
3.2	Selección de módulo de recepción y su rutina de caracterización.....	33
3.3	Ejecución manual de rutina de caracterización con instrumentos de laboratorio.....	35
3.4	Diseño y construcción de sistema de caracterización secuencial utilizado	43
3.5	Software de interfaz gráfica y control de sistema de caracterización secuencial	47
3.6	Resultados de comparación entre ejecución de rutina de caracterización utilizando sistema diseñado y manualmente.....	49
4	Capítulo 4: Implementación y resultados de las mediciones en el sistema de caracterización	51
4.1	Implementación y resultados de mediciones de ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno.....	51
4.1.1	Medición de ganancia para frecuencia dentro de banda 3400-4000 MHz y corriente de consumo con el sistema de caracterización.....	52
4.1.2	Medición de pérdida de retorno en la entrada con sistema de caracterización	54
4.1.3	Medición de pérdida de retorno en la salida con sistema de caracterización.....	57
4.1.4	Resultados de pruebas de ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno.....	59
4.2	Implementación y resultados de mediciones de ganancia para una frecuencia fuera de la banda y punto de intercepción de tercer orden	61
4.2.1	Medición de ganancia para una frecuencia fuera de la banda 3400-4000 MHz con el sistema de caracterización	62
4.2.2	Medición del punto de intercepción de tercer orden con sistema	64
4.2.3	Resultados de mediciones de ganancia para una frecuencia fuera de la banda y el punto de intercepción de tercer orden	67
4.3	Implementación y resultados de mediciones de ganancia en reversa para una frecuencia dentro de la banda y figura de ruido	69
4.3.1	Medición de ganancia en reversa para una frecuencia dentro de la banda 3400-4000 MHz con el sistema de caracterización	70

4.3.2	Medición de figura de ruido.....	72
4.3.3	Resultados de pruebas de ganancia en reversa para una frecuencia dentro de la banda 3400-4000 MHz y figura de ruido.....	75

5 Capítulo 5: Diseño de rutina de calibración y resultados de calibrar el sistema de caracterización secuencial77

5.1	Selección de métodos de calibración Puente-Reflejante-Línea y reflectometría en el dominio de la frecuencia aplicados al sistema de caracterización.....	77
5.2	Secciones del sistema y mediciones de calibración.....	79
5.3	Medición 1: Onda reflejada en salida del acoplador direccional con circuito abierto..	81
5.4	Medición 2: Onda reflejada en red de entrada con circuito abierto.....	83
5.5	Medición 3: Onda reflejada en red de salida con circuito abierto.....	84
5.6	Medición 4: Onda reflejada en red de entrada con red de referencia.....	85
5.7	Medición 5: Onda reflejada en red de salida con red de referencia.....	87
5.8	Medición 6: Potencia de salida utilizando la red de referencia (atenuador en 0 dB)....	88
5.9	Medición 7: Potencia de salida utilizando la red de referencia (atenuador en 40 dB)..	89
5.10	Medición 8: Potencia de salida en reversa utilizando la red de referencia.....	89
5.11	Sistema de ecuaciones de rutina de calibración.....	91
5.12	Compensaciones y calibración de las mediciones de las mediciones en la rutina de caracterización.....	99
5.13	Resultados y comparación entre mediciones con o sin calibración con respecto a los datos de laboratorio.....	102

6 Capítulo 6: Estudio de la repetibilidad y reproducibilidad (Gage R&R) del sistema de caracterización secuencial y resultados obtenidos104

6.1	Tipos de interacción del usuario con la muestra considerados en el estudio de la medición de la repetibilidad y reproducibilidad.....	104
6.2	Métodos considerados para procesar los datos obtenidos en el estudio de la medición de la repetibilidad y reproducibilidad.....	105
6.3	Proceso de cálculos para determinar la variabilidad del sistema utilizando el método del análisis de la varianza (ANOVA).....	106
6.4	Diseño y condiciones del estudio de repetibilidad y reproducibilidad para el sistema de caracterización secuencial.....	110
6.5	Ejecución del estudio cruzado.....	111
6.6	Organización de los datos.....	111
6.7	Generación de tabla ANOVA para estudio realizado.....	113
6.8	Análisis de resultados del estudio Gage R&R.....	114

7	Capítulo 7: Conclusiones generales y trabajo futuro	117
7.1	Conclusiones de la investigación en base los objetivos propuestos	117
7.2	Trabajo futuro de la investigación	119
8	Bibliografía y referencias	120

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Voltaje y corriente en una resistencia.....	10
Figura 2.2 – Ejemplo de onda de voltaje senoidal de corriente alterna.	11
Figura 2.3 – Ejemplos de líneas de transmisión.	16
Figura 2.4 –Modelo RLGC de un segmento de una línea de transmisión.....	16
Figura 2.5 –Ejemplo esquemático de un acoplador direccional.....	17
Figura 2.6 –Ejemplo esquemático de un atenuador coaxial.	18
Figura 2.7 –Ejemplo esquemático de un generador de señales de radiofrecuencia.....	19
Figura 2.8 –Aplicación de un switch de un polo con doble tiro para un sistema de transmisión y recepción.	20
Figura 2.9 –Ejemplo esquemático de un analizador de espectro de barrido.	20
Figura 2.10 –Ejemplo de configuraciones de combinador y divisor de potencia.....	22
Figura 2.11 – Ejemplo de antenas operando como transmisora y receptora en comunicaciones inalámbricas.	23
Figura 2.12 – Tipos de filtros en función de su operación.	24
Figura 2.13 – Ejemplo de circuito de alta frecuencia con una fuente de voltaje de corriente directa y una digital. ...	25
Figura 2.14 – Módulo de recepción genérico como una porción de un sistema de recepción.....	25
Figura 2.15 – Módulo de recepción genérico de alta frecuencia modelado como red de 2 puertos.	26
Figura 2.16 – Espectro de frecuencia mostrando tonos principales, armónicos y productos de intermodulación.....	28
Figura 2.17 – Gráfica del punto de intercepción de tercer orden.....	29
Figura 2.18 – Ejemplo esquemático de un sistema de caracterización.....	31
Figura 3.1 – Ejemplo de diagrama a bloques simplificado de módulo de recepción genérico seleccionado conectado a una antena externa.	34
Figura 3.2 – Modulo de recepción seleccionado conectado a una antena externa.....	34
Figura 3.3 – Medición de ganancia del módulo de recepción con instrumentos manuales de laboratorio.	38
Figura 3.4 – Medición de la pérdida de retorno en entrada del módulo con instrumentos manuales de laboratorio. ...	39
Figura 3.5 – Medición de la pérdida de retorno en salida del módulo con instrumentos manuales de laboratorio. ...	39
Figura 3.6 – Medición del punto de intercepción de tercer orden con instrumentos manuales de laboratorio.	41
Figura 3.7 – Medición de figura de ruido con instrumentos manuales de laboratorio.....	42
Figura 3.8 – Sistema de caracterización secuencial diseñado para módulos de recepción genéricos.....	45
Figura 3.9 – Circuitos de caracterización e instrumentos del sistema construido.	46
Figura 3.10 – Vista lateral y superior del sistema de caracterización construido.	47
Figura 3.11 – Interfaz gráfica del sistema de caracterización secuencial.	48
Figura 4.1 – Sistema de caracterización secuencial configurado para medir la ganancia y corriente del dispositivo, incluyendo, etiquetas de programación y tabla de estados.	52
Figura 4.2 – Sistema de caracterización configurado para medir la pérdida de retorno en la entrada del dispositivo, incluyendo, etiquetas de programación y tabla de estados.	55

Figura 4.3 – Sistema de caracterización configurado para medir la pérdida de retorno en la salida del dispositivo, incluyendo, etiquetas de programación y tabla de estados.	57
Figura 4.4– Sistema de caracterización configurado para medir la ganancia para frecuencia fuera de banda.	62
Figura 4.5– Sistema de caracterización secuencial configurado para medir el punto de intercepción de tercer orden.	64
Figura 4.6– Captura del espectro con analizador mostrando los dos tonos de la señal y los respectivos productos. ..	66
Figura 4.7– Sistema de caracterización secuencial configurado para medir la ganancia en reversa para una frecuencia dentro de la banda 3400-4000 MHz.	70
Figura 4.8– Sistema de caracterización secuencial configurado para medir la figura de ruido.....	72
Figura 4.9– Configuración para medir la figura de ruido por el método de ruido térmico.	74
<i>Figura 5.1 – Foto de red de referencia utilizada para calibrar el sistema de caracterización secuencial.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.2 – Sistema de caracterización secuencial dividido en 5 secciones para rutina de calibración.</i>	<i>80</i>
Figura 5.3 – Sistema configurado para medición 1 de rutina de calibración. Las flechas rojas indican dirección saliente de los generadores y, las azules, las ondas reflejadas.	82
Figura 5.4 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 1 de calibración.	82
Figura 5.5 – Sistema configurado para medición 2 de rutina de calibración. Las flechas rojas indican dirección saliente de los generadores y, las azules, las ondas reflejadas.	83
Figura 5.6 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 2 de calibración.	84
Figura 5.7 – Sistema configurado para medición 3 de rutina de calibración.	84
Figura 5.8 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 3 de calibración.	85
Figura 5.9 – Sistema configurado para medición 4 de rutina de calibración. Las flechas rojas indican dirección saliente de los generadores y, las azules, las ondas reflejadas.	86
Figura 5.10 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 4 de calibración.	86
Figura 5.11 – Sistema configurado para medición 5 de rutina de calibración.	87
Figura 5.12 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 5 de calibración.	87
<i>Figura 5.13 – Sistema configurado para medición 6 de rutina de calibración. Las flechas rojas indican dirección saliente de los generadores.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5.14 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 6 de calibración.</i>	<i>89</i>
Figura 5.15 – Sistema configurado para medición 8 de rutina de calibración. Las flechas rojas indican dirección saliente de los generadores.	90
Figura 5.16 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 8 de calibración.	90
Figura 5.17 – Cuadro de dialogo de reporte de mediciones de calibración.	91
Figura 5.18 – Análisis de reflexiones múltiples en una red conectada a una carga estándar.	94
Figura 5.19 – Cuadro de dialogo de confirmación de generación de archivo de calibración.	99
Figura 5.20 – Captura de archivo de calibración.	99
Figura 6.1 – Tipos de interacción entre el usuario y la muestra para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad.	105
Figura 6.2 – Diseño del estudio cruzado elaborado para ambos usuarios (equipos).	111

Lista de tablas

Tabla 3.1 – Rutina de caracterización general para un módulo de recepción genérico de alta frecuencia.	33
Tabla 3.2 – Rutina de caracterización adaptada para el módulo de recepción genérico seleccionado.	35
Tabla 3.3 – Tabla con pasos y tiempos aproximados para realizar medición de ganancia ya sea en frecuencia dentro de la banda, fuera de la banda o en reversa.	36
Tabla 3.4 – Tabla con pasos y tiempos aproximados para realizar medición de pérdidas de retorno.	38
Tabla 3.5 – Tabla con pasos y tiempos aproximados para realizar medición del punto de intercepción de tercer orden.	40
Tabla 3.6 – Tabla con pasos y tiempos aproximados para realizar medición de figura de ruido en el módulo de recepción.	41
Tabla 3.7 – Tabla con la cantidad de pasos y tiempo total para realizar manualmente la rutina de caracterización.	43
Tabla 3.8 – Tabla con configuración de switches para las distintas mediciones de la rutina de caracterización.	45
Tabla 3.9 – Tabla con pasos manuales y tiempos aproximados para realizar la rutina de calibración y luego de caracterización con el sistema de caracterización secuencial.	49
Tabla 4.1 – Condiciones de ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno para sistema de caracterización.	51
Tabla 4.2 – Tabla de estados de los switches para realizar las mediciones de ganancia y pérdidas de retorno.	53
Tabla 4.3 – Resultados de mediciones de ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno para un ejemplar de referencia del tipo de módulo de recepción seleccionado.	59
Tabla 4.4– Condiciones de ganancia en frecuencia fuera de banda y punto de intercepción de tercer orden en los niveles de amplificación del módulo de recepción.	61
Tabla 4.5 – Tabla de estados de los switches para realizar las mediciones de ganancia para una frecuencia fuera de banda y punto de intercepción de tercer orden.	61
Tabla 4.6– Resultados de mediciones de ganancia para frecuencia fuera de banda y punto de intercepción de tercer orden para el ejemplar de referencia del módulo de recepción.	67
Tabla 4.7– Condiciones de ganancia en reversa y figura de ruido en los niveles de amplificación del dispositivo.	69
Tabla 4.8 – Tabla de estados de los switches para las mediciones de ganancia en reversa y figura de ruido.	69
Tabla 4.9 – Resultados de mediciones de ganancia en reversa y figura de ruido para el módulo de recepción medido con el sistema de caracterización secuencial sin calibrar y con el equipo manual de laboratorio calibrado.	76
Tabla 5.1 – Tabla de mediciones de rutina de calibración con las cargas estándar y posición de los switches.	81
Tabla 5.2 – Tabla de parámetros de calibración obtenidos del sistema de caracterización secuencial.	98
Tabla 5.3 – Tabla comparativa de las mediciones de la rutina de caracterización sin calibración, con calibración y datos de laboratorio para el ejemplar del módulo de recepción seleccionado.	102
Tabla 6.1 – Ejemplo de tabla “ANOVA”	107
Tabla 6.2 – Tabla de resultados del estudio en base al porcentaje de contribución del Gage R&R.	110
Tabla 6.3 – Tabla de datos de las mediciones en el nivel de baja amplificación.	112
Tabla 6.4 – Tabla ANOVA para algunas mediciones del nivel de baja amplificación.	113
Tabla 6.5 – Tabla de resultados del estudio Gage R&R basado en la desviación estándar.	115

Dedicatoria

A mi esposa, Monserrat.

A ti, siendo tú la que me ha apoyado a lo largo de este proceso, me ha brindado su paciencia y su amor dándome siempre fuerzas para seguir mejorándome como persona y profesionista. Muchas gracias por todo lo que has hecho por mí, te amo.

A mis padres, Alfredo y Silvia y, a mi hermano, Israel.

Muchas gracias por todo su amor incondicional, su apoyo y su cuidado a lo largo de toda mi vida, ustedes han sido la luz en mi camino todos estos años, siempre estando a mi lado cuando necesitaba ayuda. Todos mis logros y el profesionista que soy actualmente, se lo debo a ustedes, los amo.

A mis directores, Dr. Nicola y Dr. Mario.

Gracias por darme la oportunidad de lograr esta nueva meta. Agradezco enormemente cada enseñanza, consejo y apoyo que me dieron durante mis estudios, todo eso fue sumamente importante para mi formación como profesionista y persona.

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California.

Gracias por abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de estudiar un Doctorado en Ciencias en sus instalaciones, así como, por todo el apoyo para cumplir mis metas profesionales.

1 Capítulo 1: Introducción al tema de investigación

1.1 Antecedentes

Antes de tocar el tema de investigación referente al sistema de caracterización secuencial para medir módulos de recepción genéricos, se abordarán los antecedentes e historia referentes a estos conceptos, pasando desde la tecnología anteriormente utilizada en el siglo XX hasta lo actual. Gracias al progresivo avance tecnológico en el mundo, la sociedad ha tenido a su disposición una creciente cantidad de distintos dispositivos electrónicos cada vez más útiles o inteligentes que pueden desempeñar múltiples funciones, siendo utilizados en la adquisición de información, entretenimiento, seguridad, medicina e incontables aplicaciones en la vida diaria.

El desarrollo y creación de todos estos dispositivos, ha sido debido al progreso científico que la rama de la ingeniería electrónica ha aportado a la sociedad, elaborando dispositivos electrónicos con diseños cada vez más complejos y extensos para cubrir las necesidades de la sociedad. Sin embargo, en donde se ha visto un abrupto incremento a partir de los años 1980s, es en definitiva en el área de las comunicaciones inalámbricas y, principalmente, en el campo de los módulos de recepción para aplicaciones genéricas de todo tipo [1], pasando de métodos relativamente sencillos para modular señales, como la modulación analógica de amplitud, fase o frecuencia, utilizadas en la primera generación de comunicaciones móviles entre los años 1981-1988 [1, 2], hasta modulaciones digitales mucho más complejas aplicadas en la actualidad que proporcionan mejores tasas de transmisión de información. La razón de esto es que, el funcionamiento de la sociedad actual es altamente dependiente de las comunicaciones a distancia, ya sea del Internet, telefonía móvil, conexión entre dispositivos por Bluetooth, la radio, etc. [1], en donde, todos estos tipos de servicios o aplicaciones conllevan la integración de un módulo de recepción a un sistema que recibe las señales provenientes de cualquier fuente externa.

A partir de 1940 las comunicaciones inalámbricas y la radiofrecuencia cobraron relevancia en el mundo debido al desarrollo del radar en la segunda guerra mundial [1], por lo que, las aplicaciones de estas tecnologías eran únicamente para ejercicios militares. No fue hasta después de 1980, que se comenzaron a utilizar las comunicaciones inalámbricas empleando satélites y sistemas de recepción con fines civiles de entretenimiento como la televisión, en donde, inicialmente los módulos de recepción utilizaban un tipo de transistor conocido como de bajo ruido que trabajaba en frecuencias de 12,000 MHz, siendo esto, el principio en el crecimiento acelerado para la tecnología inalámbrica, dando surgimiento a otras posteriores como las comunicaciones móviles, así como, la mejora en el diseño de los módulos receptores empleando amplificadores de bajo ruido en vez de transistores individuales [3].

La alta demanda, la saturación de los servicios y, la necesidad por obtener más velocidad de recepción de datos, impulsó desde sus inicios a las tecnologías de las comunicaciones inalámbricas a diseñar constantemente nuevos sistemas de recepción, de modo que, entre los años 1980 hasta principios de los años 2010, entre la primera y tercera generación de comunicaciones móviles, la arquitectura de receptor mayormente utilizada fue la del receptor superheterodino. La cual, recibe

la señal de radiofrecuencia del aire, ejecuta dos conversiones consecutivas a baja frecuencia utilizando un oscilador local y, filtra los productos espurios en la señal proveniente de las conversiones para poder muestrearla para su digitalización y procesamiento [4].

Conforme fueron mejorando las comunicaciones móviles entre la primera y tercera generación, se fue optimizando el modelo del receptor superheterodino para emplear menos componentes analógicos que permitieran reducir el espacio necesario del circuito, obteniéndose diversas variaciones, como el receptor de conversión dual que aprovecha una frecuencia intermedia más alta para reducir el tamaño de los filtros; o, el de baja frecuencia intermedia y el de conversión directa de frecuencia intermedia, que utilizan solo una etapa de conversión decreciente de frecuencia para muestrear directamente y digitalizar la señal [4].

A partir del 2010 con la introducción de la cuarta y después, en 2019 con la quinta generación de comunicaciones móviles, los métodos de modulación para inyectar información en las señales de radiofrecuencia se volvieron tan complejos que fue muy complicado demodular con hardware analógico como se hacía con las generaciones anteriores, por lo que, se optó por la demodulación por procesamiento digital de señales utilizando software, denominando a estos sistemas receptores como de “radio definida por software”. La arquitectura de los sistemas receptores de radio definida por software, solo incluyen los componentes analógicos esenciales, como la antena, un amplificador de bajo ruido, un filtro pasa bandas, el mezclador y el oscilador local para hacer una sola conversión decreciente de frecuencia para la señal, el resto de la demodulación se realiza digitalmente por otro circuito y software [4].

Desde las arquitecturas de los receptores clásicos hasta los modernos, dado a que, manejan señales de radiofrecuencia, a lo largo de la historia se han conformado por distintos tipos de líneas de transmisión como los cables coaxiales, microstrip o stripline, también, componentes como acopladores direccionales, atenuadores, generadores de señales, switches para señales de alta frecuencia, entre otros [5-7]. Ahora bien, en conjunto con la evolución de los sistemas de recepción, proporcionalmente, también han ido evolucionando los equipos e instrumentación encargados de realizar la caracterización eléctrica y validación de los diseños en etapa de desarrollo e investigación de laboratorio.

Un caso muy concreto de esto fue la evolución de los analizadores de espectro, los cuales, inicialmente eran analizadores de espectro basados en bancos de filtros, los cuales, tenían una gran cantidad de filtros fijos para distintos rangos de frecuencias, de modo que, de esa forma podían analizar señales con diversos rangos en el espectro, sin embargo, resultaba complicado depender de múltiples filtros para realizar la tarea. Otra alternativa, fueron los analizadores de espectro de transformada de Fourier rápida, pero, estos eran aplicados generalmente a frecuencias más bajas dado a que, tenían que digitalizar la señal directamente para aplicar el algoritmo que separaba las componentes de frecuencia en vez de depender del hardware analógico como en los de bancos de filtros. Una mejora considerable al analizador de banco de filtros fue el analizador de onda individual, el cual, en vez de contar con múltiples filtros, solo tenía uno que era manualmente ajustable para medir específicamente una frecuencia deseada, sin embargo, no permitía muestrear diversas componentes de frecuencia fuera del ancho de banda del filtro [2, 10].

Finalmente, las ventajas de todas las versiones anteriores de analizadores de espectro fueron concebidas con la invención del analizador de espectro de barrido, el cual, se basa en la estructura de un receptor superheterodino y el analizador de onda, en donde, se tiene un circuito electrónico que permite realizar un barrido en un rango de frecuencia en el espectro ajustando un único filtro sintonizable, de forma que, nos ofrece información de todas las componentes que puede contener una señal medida. Así mismo, estos analizadores de espectro pueden muestrear un mayor rango de frecuencias y son los que se siguen utilizando en la actualidad [2, 10]. Con el pasar de los años, estos instrumentos fueron siendo integrados en sistemas de caracterización o equipo de prueba eléctrica automatizados, los cuales también evolucionaron por su cuenta.

Los primeros equipos de caracterización o equipos de prueba estuvieron basados en equipos conocidos como de mesa de trabajo, en los cuales, se contaba con un estante con diversos instrumentos modulares conectados. En la época de 1960, se comenzaron a distribuir los primeros equipos de caracterización automatizados, pero, solo estaban especializados para señales digitales. Después de alrededor de 6 años, se inventaron los primeros equipos de caracterización para señales analógicas de alta frecuencia, pero, estos fueron rápidamente reemplazados por los equipos de señal mixta a principios de la época de 1970, los cuales, podían realizar mediciones de señales analógicas y digitales en el mismo equipo [8].

A partir de 1980, aparecieron los equipos de caracterización automatizados que podían medir señales de radiofrecuencia, en donde estos, produjeron un gran impacto tanto en el diseño a nivel académico de laboratorio e investigación, como en la industria enfocada en comunicaciones inalámbricas. Fueron estos equipos que, a partir de 1995, sirvieron como base para evolucionar hasta los modernos actuales denominados como equipos de caracterización de radiofrecuencia y señal mixta que, son capaces de utilizar señales de radiofrecuencia, analógicas de baja frecuencia y digitales para caracterizar diseños de módulos de recepción complejos que operan bajo el régimen de las comunicaciones inalámbricas recientes [8].

Algo importante que aclarar de los equipos de caracterización mencionados es que, a pesar de que sean denominados como automatizados y pueden funcionar para el diseño o investigación en laboratorio, lo único automatizado es la ejecución de la captura de la medición eléctrica en los puertos de los instrumentos de medición del equipo, es decir, la preparación, la calibración, el posicionamiento y el armado del circuito externo para adecuar la medición es realizado manualmente por el usuario. Por otro lado, existen ciertos sistemas de caracterización que incluyen sus propios aditamentos o circuitos para medir automáticamente dispositivos sencillos o individuales como amplificadores, filtros, antenas, switches, pero, existen pocos para módulos complejos como los de recepción que cuentan con distintos elementos internos [21], en donde, las alternativas no tienen rutinas de calibración automatizadas o involucran equipos muy costosos con mucha instrumentación.

Así, en el ámbito científico de investigación académica, cuando se diseña un módulo de recepción, es necesario medir o caracterizar las propiedades eléctricas que definen el comportamiento del dispositivo, por lo que, el investigador involucrado realiza manualmente las calibraciones, conexiones y preparaciones pertinentes para conseguir los datos del dispositivo bajo desarrollo con el fin de confirmar que cumple con la funcionalidad esperada. Comúnmente, el proceso

mencionado demanda un tiempo considerable del investigador dado a que, los pasos de preparar, calibrar, conectar y medir con el equipo se vuelven muy repetitivos y cansados para el mismo. Aunado a esto, las acciones mencionadas son especialmente ejecutadas para medir un parámetro individual del dispositivo electrónico, de modo que, si se requiere medir otros parámetros de este, el investigador tendrá que repetir los pasos anteriores para adaptar el equipo de caracterización de laboratorio para medir el siguiente parámetro.

Así, si se está caracterizando un módulo de recepción con una complejidad que requiere medir cierta cantidad de parámetros eléctricos para obtener su comportamiento, entonces, el investigador tendrá que repetir la misma cantidad de veces las acciones de preparar, calibrar, conectar y medir en el equipo de caracterización, incrementando exponencialmente el tiempo requerido para realizar la evaluación del módulo de recepción y así, retrasando el desarrollo o investigación del dispositivo. Por estas razones, este trabajo de investigación pretende realizar el diseño de un método de caracterización secuencial para módulos de recepción genéricos, en donde, se incluya una rutina de calibración semiautomática, de modo que, se evite en lo mayor posible la intervención manual del investigador encargado de desarrollar dispositivos de este tipo. La aplicación de esta investigación ofrece un beneficio en la simplificación de la etapa de caracterización requerida para los módulos de recepción al ser medidos en laboratorio, acelerando su investigación y desarrollo en el ámbito académico.

1.2 Planteamiento del problema de investigación

En esta sección, se describe el planteamiento del problema de investigación que se abordara a lo largo de este trabajo.

1.2.1 Descripción del problema

Con el constante avance tecnológico y científico en la rama de la ingeniería electrónica, los dispositivos electrónicos desarrollados se han vuelto muy complejos y extensos en funcionalidad para cubrir la enorme capacidad tecnológica requerida por el mundo actual. Esto, aplica para todos los campos o subdisciplinas en los que se divide el estudio de la electrónica, sin embargo, una de las más demandadas es sin duda, la referente a las comunicaciones inalámbricas, en especial en el campo de los módulos de recepción para cualquier aplicación genérica. En donde, estos módulos, suelen venir integrados en cualquier sistema de recepción, que pueden ir desde un sistema de sensores inalámbricos, dispositivos conectados por Bluetooth o Wi-Fi, computadoras o hasta telefonía móvil.

De esta manera, la importancia de desarrollar módulos de recepción cada vez más complejos y diversos ha ido en aumento en los últimos años, siendo utilizados cada vez más en aplicaciones genéricas. Sin embargo, en el ámbito científico o académico de investigación y diseño, cuando se desarrolla un dispositivo electrónico de este tipo, es estrictamente necesario caracterizar sus propiedades eléctricas utilizando equipo de medición eléctrica de laboratorio, el cual, el investigador manualmente prepara, calibra, conecta y opera constantemente para obtener los datos deseados.

Este proceso, suele requerir tiempo considerable del investigador y, a su vez, se convierte en una tarea repetitiva dado a que, se deben de medir varios parámetros a los módulos de recepción, por lo que, los pasos de conectar, calibrar y operar deben hacerse individualmente para cada parámetro por medir. Así, si el dispositivo por caracterizar tiene una complejidad que conlleva medir “n” parámetros para describir su comportamiento eléctrico, del mismo modo, el investigador tendrá que repetir “n” veces el proceso de conectar, calibrar y medir, aumentando exponencialmente el tiempo necesario para la caracterización de cualquier módulo de recepción y con esto, retrasando el proceso de diseño o desarrollo de este.

Dicho esto, este trabajo de investigación pretende diseñar un método o sistema de caracterización secuencial que incluya una rutina de calibración semiautomática, para evaluar eléctricamente módulos de recepción genéricos mientras se evita en lo mayor posible el manejo manual de los instrumentos. De este modo, la aplicación de este trabajo beneficiará a los investigadores académicos que trabajan en laboratorios especializados en el desarrollo de módulos de recepción, puesto que, les ahorrará una gran cantidad de tiempo al evitar realizar la repetición constante de los pasos manuales de preparación, calibración y operación de los instrumentos de laboratorio.

1.2.2 Formulación del problema

A partir del problema descrito anteriormente, se puede formular una serie de preguntas que se buscan responder con los resultados obtenidos durante y al finalizar esta investigación:

- ¿Cuáles son los componentes más comunes en los módulos de recepción genéricos?
- ¿Qué tipo de mediciones son necesarias de ejecutar a los módulos de recepción para caracterizarlos eléctricamente?
- ¿Qué instrumentos de medición de laboratorio son necesarios para realizar la caracterización eléctrica adecuada?
- ¿Cómo se pueden replicar las mediciones realizadas por instrumentos manuales de laboratorio en un equipo de caracterización secuencial?
- ¿Qué elementos serán necesarios de implementar en el sistema de caracterización?
- ¿Cómo se puede implementar una rutina de calibración para el sistema de caracterización diseñado?
- ¿Cómo se evaluará que las mediciones del sistema de caracterización son consistentes con las realizadas utilizando instrumentos manuales de laboratorio?

1.3 Justificación

Como se mencionó anteriormente, este trabajo de investigación busca el realizar un diseño de un método o sistema de caracterización que ejecute secuencialmente aquellas mediciones eléctricas que sean requeridas para caracterizar el comportamiento eléctrico de un módulo de recepción genérico. A su vez, se pretende implementar en este sistema una rutina de calibración semiautomática, para que las mediciones realizadas sean coherentes con las que se ejecutan por instrumentación manual en el laboratorio por un investigador. De este modo, con una rutina de

caracterización secuencial y una de calibración semiautomática, se desea reducir en lo mayor posible la necesidad del investigador o usuario que trabaja en la caracterización, de realizar manualmente los procedimientos de conexión, calibración y operación de los instrumentos para obtener los datos eléctricos deseados del módulo de recepción a analizar.

Como los diseños de los módulos de recepción incluyen cada vez más funciones para cubrir las necesidades tecnológicas actuales, entre más complejos se vuelven, más parámetros eléctricos son necesarios de caracterizar. Por lo que, dado a que el investigador tiene que manualmente preparar, calibrar y operar los instrumentos de medición para obtener los datos eléctricos de cada parámetro individual por medir, entre más deban medirse, mucho más complicado será el proceso de caracterización del dispositivo. De este modo, la gran importancia de este trabajo radica en que, al emplear un sistema de caracterización que realice las mediciones necesarias de forma secuencial, se evitará el realizar la repetición constante de los preparativos manuales de los instrumentos, ahorrando una enorme cantidad de tiempo y posibilidades de cometer errores por parte del usuario durante el proceso de caracterización.

Finalmente, el evitar que la etapa de caracterización se vuelva muy compleja, beneficiará tanto al investigador como al desarrollo del diseño en general del módulo de recepción en que se está trabajando, puesto a que, se obtendrá rápidamente su comportamiento eléctrico para saber si es necesario realizar ajustes en el dispositivo. Estos beneficios, contribuirán a acelerar el avance en el ámbito académico para la investigación y diseño de los módulos de recepción, al reducir los tiempos empleados durante la etapa de caracterización evitando retrasos. También, se espera que este trabajo pueda servir como una guía o referencia para reducir la operación manual de los instrumentos para caracterización de otro tipo de dispositivos eléctricos.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un método o sistema de caracterización secuencial para medir eléctricamente módulos de recepción genéricos, incluyendo en este, una rutina de calibración semiautomática, con el fin de obtener métodos de medición automáticos para simplificar la etapa de caracterización de los dispositivos en el ámbito académico de investigación.

1.4.2 Objetivos específicos

En base al objetivo general, fue posible definir los objetivos específicos de la investigación:

1. Diseñar una rutina de caracterización que sea capaz de evaluar todos o la mayoría de los requerimientos principales de funcionalidad que se exige a los módulos de recepción genéricos.
2. Diseñar un sistema de caracterización secuencial que, cuente con los recursos necesarios para evaluar módulos de recepción genéricos y sea capaz de aproximar o replicar las

mediciones obtenidas con instrumentos manuales de laboratorio, comprobando que simplifica la etapa de caracterización.

3. Diseñar una rutina de calibración semiautomática para compensar las pérdidas internas del sistema de caracterización diseñado.
4. Validar que las mediciones obtenidas con el sistema de caracterización calibrado sean coherentes con las que proveen los instrumentos manuales de laboratorio durante la caracterización de los módulos de recepción.

2 Capítulo 2: Marco teórico de la investigación

Debido a que, el cuerpo de este trabajo de investigación está fundamentado principalmente en el análisis de las distintas mediciones que se aplican a los módulos de recepción genéricos durante su caracterización, es importante comenzar por describir la teoría involucrada en dichas mediciones. En donde, se tratarán temas desde los principios físicos de la teoría electromagnética como las ecuaciones de Maxwell hasta los conceptos de circuitos de alta frecuencia para radiofrecuencia y los instrumentos o elementos involucrados en ellos. Los conceptos y fundamentos teóricos presentados en este marco teórico van de acuerdo con la literatura [1-26].

2.1 Ecuaciones de Maxwell y su relación con la teoría de circuitos

Todos los fenómenos físicos relacionados a la electricidad y el magnetismo desde una perspectiva macroscópica pueden modelarse utilizando cuatro ecuaciones fundamentales en la teoría electromagnética, denominadas como “las ecuaciones de Maxwell”. La aportación de Maxwell a la ciencia con estas ecuaciones fue tal que, logro sintetizar todo lo conocido sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos basándose en los trabajos de Ampere, Faraday, Gauss, entre otros, concluyendo en solo cuatro ecuaciones que lo describen todo. A su vez, la formulación de estas ecuaciones dio margen a futuros descubrimientos como a la corriente de desplazamiento eléctrico, así como la deducción de las ecuaciones de la onda electromagnética y su propagación [1].

A continuación, se muestran las cuatro ecuaciones de Maxwell en su forma diferencial en el dominio del tiempo, que fundamentan la teoría de los campos electromagnéticos [1]:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{\mathcal{E}} &= -\frac{\partial \vec{\mathcal{B}}}{\partial t} - \vec{\mathcal{M}} \\ \nabla \times \vec{\mathcal{H}} &= \frac{\partial \vec{\mathcal{D}}}{\partial t} + \vec{j} \\ \nabla \cdot \vec{\mathcal{D}} &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{\mathcal{B}} &= 0\end{aligned}$$

En donde, aquellas variables con una flecha indican campos vectoriales que varían en las coordenadas espaciales (x, y, z), así como en el tiempo “t”. De forma que, se definen a continuación como:

- $\vec{\mathcal{E}}$ representa el campo eléctrico, medido en volts por metro (V/m).
- $\vec{\mathcal{B}}$ representa la densidad de flujo magnético, en webers por metro cuadrado (Wb/m²).
- $\vec{\mathcal{M}}$ representa la densidad de corriente magnética, medida en volts por metro cuadrado (V/m²), es importante mencionar que, este tipo de corriente es ficticia (no existe físicamente) y, solo se utiliza en la teoría para facilitar la solución matemática de algunos modelos físicos.
- $\vec{\mathcal{H}}$ es la intensidad del campo magnético, medida en amperes por metro (A/m).

- \vec{D} es la densidad de flujo eléctrico, medido en coulombs por metro cuadrado (C/m^2).
- \vec{J} es la densidad de corriente eléctrica, medida en amperes por metro cuadrado (A/m^2).
- ρ representa la densidad de carga eléctrica, medida en coulombs por metro cubico (C/m^3).

Las ecuaciones de Maxwell mostradas nos indican que, las fuentes originales que producen los campos electromagnéticos son la densidad de carga eléctrica “ ρ ” (campo eléctrico y densidad de flujo eléctrico) y la densidad de corriente eléctrica “ \vec{J} ” (intensidad de campo magnético y densidad de flujo magnético). Del mismo modo, nos muestran que, la variación en el tiempo del flujo magnético “ $-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ ” puede producir un campo eléctrico circulatorio “ $\nabla \times \vec{E}$ ” y del mismo modo, el cambio del flujo eléctrico con el tiempo “ $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ” puede generar un campo magnético circulatorio “ $\nabla \times \vec{H}$ ”. Esta última relación que existe entre el campo eléctrico y magnético, es lo que conlleva a la propagación del campo electromagnético (onda electromagnética) en el espacio.

En el campo de estudio de la radiofrecuencia, conocer el significado de las ecuaciones de Maxwell en la teoría de campos y su importancia es fundamental, sin embargo, debido a que la estructura de estas ecuaciones es de origen vectorial, diferencial o integral y nos brinda toda la información de un fenómeno en el espacio y tiempo, el análisis matemático se complica enormemente hasta volverse impráctico a la hora de tratar problemas comunes vistos en la ingeniería de electrónica de alta frecuencia. Es por esto que, la complejidad general de la teoría de campos suele reducirse al simplificar el fenómeno físico para ciertos casos especiales, como con la teoría de circuitos para campos de baja frecuencia en conductores o dispositivos eléctricos y, la teoría de líneas de transmisión para campos de alta frecuencia. De este modo, aplicando dichos casos a los circuitos y sistemas, es posible obtener parámetros como el voltaje, la corriente, impedancia o potencia, que son comúnmente utilizados en el campo de la ingeniería [1].

2.2 Voltaje, corriente eléctrica, resistencia y potencia

El primero de los parámetros eléctricos de interés en la teoría de circuitos es el voltaje, el cual, se mide en volts y también se le conoce por los nombres de diferencia de potencial eléctrico o fuerza electromotriz. El voltaje, es una fuerza eléctrica o bien, presión eléctrica que, produce que las cargas se muevan, ya sea en la materia o en un circuito eléctrico, dando origen a un flujo de cargas. También, el voltaje es una cantidad relativa porque otro punto de referencia debe ser dado para identificar la cantidad de voltaje o, dicho de otra forma, la “diferencia de potencial eléctrico” entre dos puntos, usualmente, al punto de referencia se le conoce como la tierra del sistema eléctrico [2].

Por otro lado, el concepto denominado como “corriente eléctrica” es nada más ni nada menos que el flujo de cargas eléctricas, en donde, su unidad de medida es el ampere; en un circuito eléctrico en la vida real, la cantidad de carga que fluye por los conductores, es decir, la corriente, está dada por el número de electrones que entran y salen de un punto dado en el circuito. Así, como la carga individual de cada electrón es de $-1.602 * 10^{-19}$ coulombs, un coulomb negativo de carga (-1C) es igual a $6.242 * 10^8$ electrones. Convencionalmente en la teoría de circuitos, un ampere de corriente se define como un coulomb positivo de carga que cruza un punto por segundo ($1A =$

+1C/s), lo cual nos indica que, en esta teoría, se supone que la corriente eléctrica está dada por un flujo de cargas positivas (en la realidad, es un flujo en sentido opuesto de cargas negativas, llamado corriente de electrones) [2].

El término “resistencia”, nos indica el grado de oposición al flujo de cargas (corriente) que presenta un elemento al aplicarle un voltaje en sus terminales. Un ejemplo de este tipo de dispositivos es una resistencia, la cual obedece la ley de Ohm [2]:

$$R = \frac{V}{I} \quad V = I * R \quad I = \frac{V}{R}$$

En donde, “R” es la resistencia del dispositivo, “V” es el voltaje entre sus terminales e “I” es la corriente que fluye por este. La ley de Ohm nos dice que, para un voltaje constante aplicado, la corriente que fluye por un elemento es inversamente proporcional a la resistencia del elemento. Visto de otra manera, para una corriente constante que circula por un elemento, el voltaje que se cae entre las terminales de dicho elemento (o bien, la diferencia de potencial entre sus terminales) es directamente proporcional a la resistencia. Cuando en un circuito la fuente suministra un voltaje y corrientes en un sentido fijo, se le conoce como un circuito de “corriente directa” o simplemente “CD”. En la siguiente figura, se puede apreciar los conceptos de voltaje, corriente y resistencia sobre un resistor:

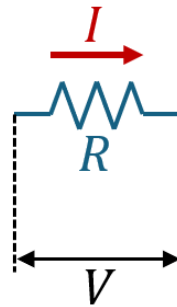


Figura 2.1 – Voltaje y corriente en una resistencia.

Por último, el concepto de “potencia eléctrica” se define como la tasa a la que la energía fluye de un circuito a otro, o que esta es utilizada por un elemento. Para el caso de un circuito conectado a un resistor, una fuente de voltaje transfiere energía por el circuito hasta llegar al resistor, en donde este, gasta la energía o bien, la disipa. La tasa a la que esta energía es disipada en el resistor, es decir, la potencia “P” que consume en un circuito de corriente directa, está dada por las siguientes ecuaciones [2]:

$$P = V * I \quad P = I^2 R \quad P = \frac{V^2}{R}$$

Nótese que, si existe una corriente muy alta, pero, la resistencia del elemento es prácticamente cero, entonces el voltaje que se cae entre sus terminales también es cero y la potencia transmitida al dispositivo es cero. Por otro lado, si el voltaje es muy alto pero la resistencia es casi infinita, la corriente tenderá a cero y a su vez la potencia que se transmite al dispositivo.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt}$$

A partir del voltaje RMS, la corriente RMS, se puede calcular con la ley de Ohm:

$$I_{RMS} = \frac{V_{RMS}}{R}$$

Con respecto a la potencia de corriente alterna, dado a que esta varía con el tiempo, se utiliza el concepto de potencia instantánea entregada “ $p(t)$ ” a un dispositivo para un instante “ t ”, dada por el voltaje instantáneo entre las terminales “ $v(t)$ ” y la corriente instantánea “ $i(t)$ ” que circula por este:

$$p(t) = v(t) * i(t)$$

El concepto de potencia instantánea no es muy útil debido a que, sigue siendo dependiente del tiempo, por lo que, en teoría de circuitos es deseable obtener la potencia promedio “ P ” transferida a un dispositivo a lo largo de un periodo de tiempo. Esto, se calcula por medio de:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) * i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{[v(t)]^2}{R} dt = \frac{1}{T * R} \int_0^T [v(t)]^2 dt = \frac{V_{RMS}^2}{R}$$

Finalmente, la potencia promedio transferida a un dispositivo por una onda arbitraria de corriente alterna puede representarse en función del valor RMS del voltaje y la corriente como [2]:

$$P = V_{RMS} * I_{RMS}$$

2.4 Impedancia y teorema de la máxima transferencia de potencia

Anteriormente, se definió el termino conocido como resistencia, el cual, define componentes que son puramente resistivos y que, su respuesta en corriente alterna es igual a su comportamiento en corriente directa, en donde, estos no alteran en fase el voltaje o la corriente. Sin embargo, existen otros tipos de componentes en los circuitos, como los capacitores (componente capacitivo) y los inductores (componente inductivo), denominados como componentes “reactivos” dado a que reaccionan de manera distinta a los cambios de voltaje y corriente en el tiempo, produciendo un cambio de fase entre estos al aplicar corriente alterna sobre ellos.

Similarmente al concepto de resistencia, el cual por la ley de Ohm está dado por $R = V/I$ y solo hace referencia a componentes puramente resistivos, existe una expansión de este concepto conocido como “impedancia” o “impedancia compleja”, en donde, un dispositivo eléctrico puede ser parcialmente resistivo y reactivo. Por lo tanto, la impedancia se determina como un numero complejo, en el cual, su parte real está dada por la componente resistiva y la parte imaginaria por la componente reactiva del dispositivo. Así, si consideramos el voltaje de corriente alterna como un fasor del tipo “ $V_p \angle \theta_v$ ” con voltaje pico “ V_p ” y con un ángulo de fase inicial en $t=0$ como “ θ_v ”, así como, la corriente fasorial “ $I_p \angle \theta_i$ ” con corriente pico “ I_p ” y ángulo de fase inicial en $t=0$ como “ θ_i ”, obtendremos la ley de Ohm para la impedancia “ Z ” en su forma polar [2, 3]:

$$Z = \frac{V_P \angle \theta_V}{I_P \angle \theta_I} = \frac{V_P}{I_P} \angle \theta_Z$$

También, es posible representar a la impedancia compleja en su forma rectangular, en donde, “ R ” es la componente resistiva, “ j ” es la unidad imaginaria y “ X ” es la componente reactiva:

$$Z = R + jX$$

En el diseño de circuitos, es muy importante analizar la cantidad de potencia transferida desde la fuente de voltaje hasta un dispositivo con impedancia “ Z ”. Dado a que, la potencia promedio está en función del voltaje y la corriente RMS como $P = V_{RMS} * I_{RMS}$, un voltaje o corriente máximas no garantizan que se está transfiriendo la mayor cantidad de potencia posible al dispositivo. Es por esto, que existe un teorema conocido como “teorema de la máxima transferencia de potencia” que nos dice que, una fuente con una impedancia incluida “ Z_F ” transferirá la mayor cantidad de potencia posible a un dispositivo o carga conectada con impedancia “ Z_C ” cuando ambas impedancias tengan la misma componente resistiva, mientras que sus partes reactivas sean de la misma magnitud y de signo opuesto [2]. Es decir, si la impedancia de la fuente es $Z_F = 50 + j10$ ohms, para que se cumpla el teorema, la impedancia de la carga deberá ser $Z_C = 50 - j10$ ohms, usualmente, en los sistemas de alta frecuencia se maneja un estándar de impedancia de 50 ohms para aplicar el teorema de la máxima transferencia de potencia a lo largo de todo el circuito.

2.5 Decibeles

En electrónica, es muy común describir cantidades eléctricas en unas unidades logarítmicas conocidas como “decibeles”. La utilidad de usar este tipo de unidades radica en que, se pueden expresar cantidades muy pequeñas (por ejemplo, micro watts, mili watts) en la misma escala que cantidades muy grandes (por ejemplo, kilo watts, mega watts), de forma que puedan ser fácilmente apreciables para la persona que analice los datos. También, dado a que, se utilizan para comparar potencias o voltajes en una escala logarítmica, las unidades en decibeles facilitan los cálculos de pérdidas y ganancias, así como su suma y resta a lo largo de un circuito electrónico, reduciendo operaciones matemáticas de multiplicación o división con unidades lineales a simples sumas y restas con unidades logarítmicas [2].

Los decibeles “dB” normalmente se calculan como diez veces el logaritmo base diez del cociente de dos potencias, en donde, la potencia lineal “ P ” en el numerador es la que se busca comparar mientras que, la del denominador, es la potencia lineal de referencia “ P_0 ” con la que se esta comparando la cantidad anterior. De forma que, la potencia en decibeles “ $P_{(dB)}$ ” está dada por la siguiente ecuación [2]:

$$P_{(dB)} = 10 * \log_{10} \left[\frac{P}{P_0} \right]$$

Si en vez de un cociente de potencias, tenemos uno de dos voltajes, el que se desea comparar “ V ” y el de referencia “ V_0 ”, también se puede calcular la potencia equivalente en decibeles como [2]:

$$P_{(dB)} = 10 * \log_{10} \left[\frac{V^2/Z}{V_0^2/Z} \right] = 10 * \log_{10} \left[\frac{V}{V_0} \right]^2 = 20 * \log_{10} \left[\frac{V}{V_0} \right]$$

Normalmente, las unidades absolutas de decibeles “dB” se utilizan para comparar dos potencias en las cuales la potencia de referencia “ P_0 ” puede cambiar, es por eso por lo que, los decibeles “dB” son comúnmente utilizados para describir mediciones relativas como la ganancia, la atenuación, las pérdidas de retorno, etc. Sin embargo, en muchos casos, solamente se desea medir la potencia de salida de un circuito sin comparar con alguna otra específica, para estos casos, se suele tomar como referencia global una potencia lineal de un mili watt (1mW), $P_0 = 1mW$, en donde, las unidades en decibeles ahora son identificadas como “dBm” para indicar que hacen referencia a un mili watt. Así, la ecuación para calcular la potencia en decibeles dBm “ $P_{(dBm)}$ ” es la siguiente:

$$P_{(dBm)} = 10 * \log_{10} \left[\frac{P_{(mW)}}{1mW} \right] = 10 * \log_{10} \left[\frac{P_{(W)}}{0.001 W} \right]$$

En donde, “ $P_{(mW)}$ ” es la potencia lineal por comparar en mili watts, “ $P_{(W)}$ ” es la potencia por comparar en unidades de watts. Ahora bien, si se desea convertir una cantidad en decibeles “dB” o “dBm” a su equivalente en potencia lineal, se tendrán que aplicar las siguientes ecuaciones exponenciales con base 10 para cada caso respectivo [2]:

$$P = P_0 * 10^{\left(\frac{P_{(dB)}}{10}\right)} \quad \text{o bien,} \quad P_{(mW)} = (1mW) * 10^{\left(\frac{P_{(dBm)}}{10}\right)}$$

Similarmente, si se desea obtener el voltaje lineal a partir de una potencia en decibeles, se deberá utilizar la siguiente ecuación:

$$V = V_0 * 10^{\left(\frac{P_{(dB)}}{20}\right)}$$

A la hora de conseguir un instrumento de medición electrónica, como un osciloscopio o un analizador de espectro, es muy común que algunas especificaciones estén descritas en unidades de decibeles, algunas de estas pudieran ser como la máxima potencia que permite el receptor, el rango dinámico, el piso de ruido del instrumento de medición, etc.

2.6 Señales de radiofrecuencia

Cuando estudiamos el campo de señales de alta frecuencia, un sector muy importante es el de las señales de radiofrecuencia, en donde, estas comprenden el análisis de señales de corriente alterna que cuentan con frecuencias en el rango desde 3 Hz hasta 300 GHz, sin embargo, las señales mayormente utilizadas están por encima de los 100 MHz. Comúnmente, una señal de radiofrecuencia es una que se genera en un sistema de radiofrecuencia por alguna fuente y suele agregársele información por medio de algún método de modulación para ser radiada por una antena transmisora. Después, esta señal se propaga por el espacio o aire para ser recolectada por una antena de recepción, en donde, dicha antena está conectada a un sistema de recepción que se

encarga de amplificar la señal captada para poder demodularla y extraer la información que se encuentra en ella [1, 4].

El espectro de las señales de radiofrecuencia es una sección del espectro electromagnético que se utiliza principalmente para comunicaciones inalámbricas. En donde, de los 3 Hz a 300 GHz asignados como de radiofrecuencia, se derivan el espectro de microondas que comprende de entre 300 MHz hasta 300 GHz y el de onda milimétrica desde 110 GHz hasta 300 GHz, a partir de los 300 GHz, se considera espectro infrarrojo y este cae en otro sector ajeno a la radiofrecuencia [4]. Regularmente, cuando se habla de frecuencias en el rango de microondas, se hace referencia a que el tamaño físico del circuito electrónico en el cual estas viajan, es comparable con la longitud de onda de la señal, tomándose como referencia que si el circuito tiene guías de onda, caminos o componentes mayores a un veinteavo ($1/20$) de la longitud de onda de la señal, entonces se deberá considerar dicho circuito como uno de microondas y por lo tanto, modelarse con la teoría de líneas de transmisión para tomar en consideración los efectos de elementos distribuidos y la propagación de las ondas en ellos [1, 4].

2.7 Teoría de líneas de transmisión y ejemplos

Una línea de transmisión es un circuito o parte de uno que, funciona como un medio de propagación o guía para una señal de alta frecuencia que se comporta como una onda electromagnética. Usualmente, las líneas de transmisión más básicas cuentan con dos conductores (uno para la señal y otro para referencia o tierra) y un dieléctrico entre ambos. En una línea de transmisión se almacena energía magnética y eléctrica en forma de campo, en donde, para una señal de alta frecuencia que viaja por ella, la energía es convertida de eléctrica a magnética o viceversa, en los diversos puntos de la línea conforme pasa el tiempo, produciendo la propagación electromagnética de la señal en su interior. La interpretación física de una línea de transmisión nos dice que sus conductores y el dieléctrico confinan y guían el campo electromagnético, en donde, es el campo en sí el que contiene y transmite la energía de la señal, por lo que, la energía en sí no está dentro de los conductores o en la corriente de estos [5].

Así, una línea de transmisión es un circuito que se compone de resistencias que producen pérdidas resistivas o disipativas de la potencia de la señal (atenuación), capacitores para el efecto de almacenamiento del campo eléctrico (energía eléctrica) e inductores para el efecto de almacenamiento del campo magnético (energía magnética). Usualmente, el estudio de las líneas de transmisión se lleva a cabo utilizando el análisis en el dominio de la frecuencia a partir del uso de fasores, así como ciertos modelos teóricos para obtener las características eléctricas de estas.

Un factor determinante para saber si un circuito deberá analizarse por medio de la teoría de circuitos o, si es necesario utilizar la teoría de líneas de transmisión, se define por el hecho de si el valor de la señal aplicada varía notablemente con la posición física en el circuito para un instante específico del tiempo. Si la señal no varía notablemente con la posición en el circuito, entonces se puede utilizar teoría de circuitos, sin embargo, si sus valores si cambian considerablemente a lo largo de la posición física del circuito, entonces se deberá modelar por medio de la teoría de líneas de transmisión. Un criterio típico utilizado es que, si el circuito y sus componentes tienen una

longitud física superior a un veinteavo ($1/20$) de la longitud de onda de la señal aplicada, entonces, se deberá utilizar la teoría de líneas de transmisión dado a que, cualquier cambio de voltaje en una sección del circuito tomará un tiempo finito (y, apreciable por la instrumentación de medición) para propagarse hasta otro punto o componente [5].

A continuación, en la siguiente figura se muestran algunos ejemplos de líneas de transmisión, para este trabajo de investigación, se utilizarán mayormente la línea coaxial en los cables coaxiales, así como la microstrip y stripline en los circuitos impresos de los componentes que utiliza el sistema:

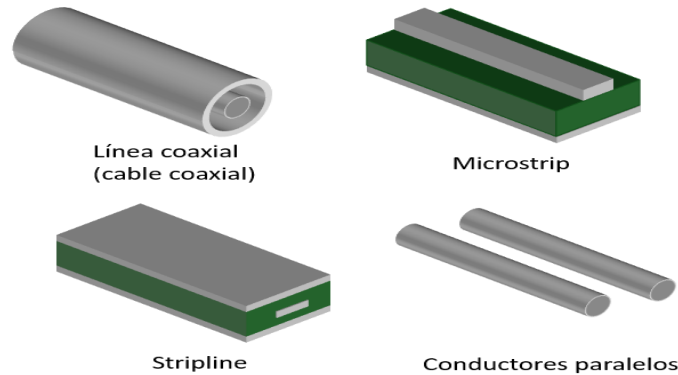


Figura 2.3 – Ejemplos de líneas de transmisión.

Existen diversos modelos teóricos para representar a las líneas de transmisión, sin embargo, el más común es el modelo RLGC o modelo de elementos agrupados, en donde, sin importar la estructura de la línea de transmisión, es posible modelar un segmento uniforme con longitud " Δz " de ella. En este segmento modelado, se considera la resistencia " R " en (Ω/m) y la inductancia " L " en (H/m) a lo largo de la línea, así como, la conductancia " G " en (S/m) y la capacitancia " C " en (F/m) en paralelo de la línea, todos estos parámetros considerados en su valor por unidad de longitud. Los parámetros RLGC están en función de la geometría de la línea de transmisión y las propiedades de los conductores y dieléctricos que la constituyen [5]. A continuación, en la siguiente figura se muestra el modelo del segmento de línea de transmisión:

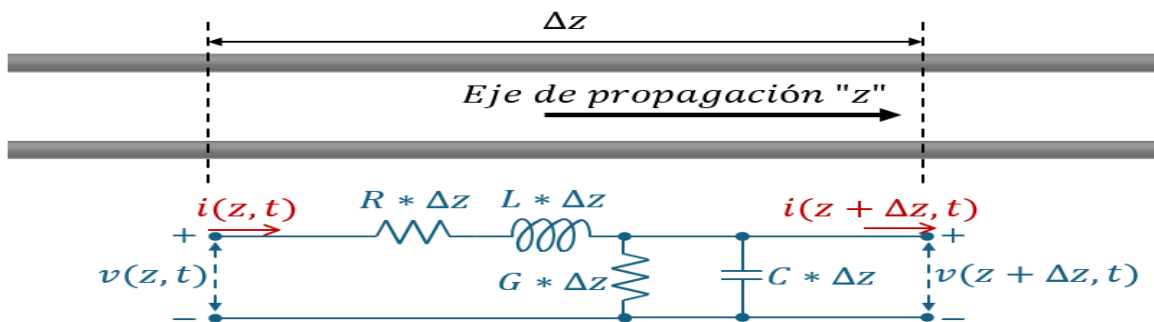


Figura 2.4 – Modelo RLGC de un segmento de una línea de transmisión.

Así, la capacitancia " C " describe su habilidad para almacenar energía eléctrica por el campo eléctrico, estando esta característica ligada a las propiedades del dieléctrico utilizado. A su vez, la conductancia " G " considera la pérdida debido a la conducción a través del dieléctrico (cuando no

es perfecto) y, a la pérdida por relajamiento dieléctrico que ocurre con el desplazamiento de un lado a otro de los átomos en el dieléctrico al ser sometidos a un campo eléctrico cambiante. En el relajamiento dieléctrico, la variación periódica del campo eléctrico circulante transfiere energía desde el campo electromagnético a la estructura atómica del dieléctrico, convirtiendo su energía en vibraciones mecánicas en la estructura que se convierten en calor.

Por otro lado, la resistencia “ R ” se debe básicamente por la conductividad del metal mientras que, la inductancia “ L ” esta estrechamente relacionada con la geometría de la línea dado a que los materiales usados suelen almacenar la misma energía magnética que el vacío, es decir, tienen una permeabilidad magnética igual a la del vacío. Lo más común es que en las líneas de transmisión, los efectos de la capacitancia y la inductancia sean los dominantes, debido a que, la resistencia en serie y la conductancia en paralelo suelen ser bajas. Todos los factores mencionados en el modelo RLGC de la línea de transmisión determinan su impedancia característica “ Z_0 ”, la cual, siempre se busca sea de 50 ohms en los sistemas de radiofrecuencia, esta, se puede calcular por medio de la siguiente expresión en base a los parámetros RLGC y la frecuencia angular “ ω ” de la señal aplicada [5]:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

2.8 Acoplador direccional

Un acoplador direccional es un elemento en un circuito que, aplica el efecto de acoplamiento entre un campo electromagnético y un conductor para captar una señal que viaja por una línea de transmisión principal en otra línea secundaria, a pesar de que no estén físicamente conectadas entre sí. Comúnmente, los acopladores direccionales son construidos utilizando líneas de transmisión del tipo de microstrip, en los cuales, se tienen dos líneas paralelas de señal en las que, los campos magnéticos y eléctricos de la señal en la línea principal inducen corrientes y voltajes en la secundaria, en donde, esta última debe tener como mínimo un tamaño físico de un cuarto de la longitud de onda de la señal que se desea acoplar mientras que, si se desea tener más ancho de banda, se puede aumentar más la longitud de la línea secundaria [5]. En la siguiente figura, se muestra un diagrama esquemático de un acoplador direccional, mostrando sus líneas de transmisión y puertos:

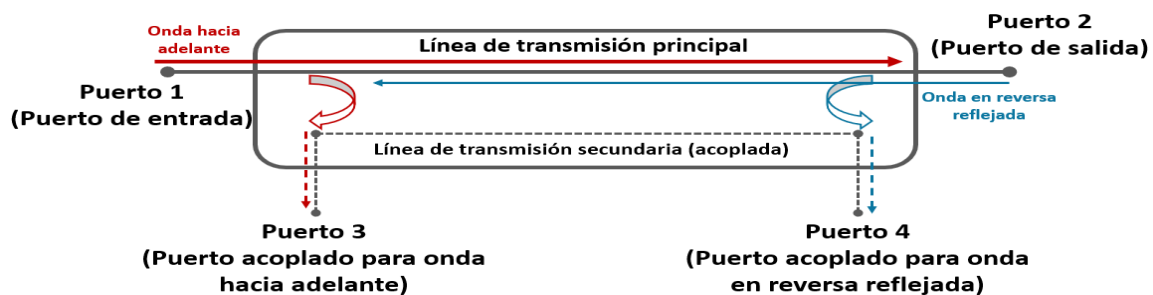


Figura 2.5 –Ejemplo esquemático de un acoplador direccional.

Por los motivos mencionados, un acoplador direccional se utiliza para muestrear o monitorear una onda electromagnética que viaja en la línea principal al inducir una porción de esta en su línea secundaria acoplada. Esto, puede realizarse tanto para las ondas que viajan hacia adelante o en reversa (ondas reflejadas), separándolas en distintas secciones de los puertos del acoplador direccional. Normalmente, la señal acoplada tiene una pérdida controlada y cuantificada en decibeles en el diseño del acoplador direccional, denominada como “factor de acoplamiento”, la cual, puede rondar entre los -10 dB, -20dB o -30dB, dependiendo del modelo de acoplador direccional.

2.9 Atenuadores

Un atenuador es un dispositivo de dos puertos que se utiliza para reducir la amplitud de una señal aplicada, en donde, el atenuador absorbe una porción de la potencia de la señal sin distorsionarla. Existen diversos tipos de atenuadores, algunos con atenuación fija, otros con atenuación escalonada o continuamente variable, dependiendo de la necesidad que se requiera, sin embargo, algo que todos los atenuadores comparten es que su puerto de entrada y salida siempre tienen la misma impedancia (50 ohms para sistema de radiofrecuencia) para evitar reflexiones indeseadas [6]. De este modo, la selección de un atenuador usualmente está basada en su rango de frecuencia de operación, el nivel de potencia aplicado que soporta y su nivel de atenuación (conocido también como pérdida por inserción). A continuación, se muestra una figura como ejemplo esquemático de un atenuador coaxial fijo:

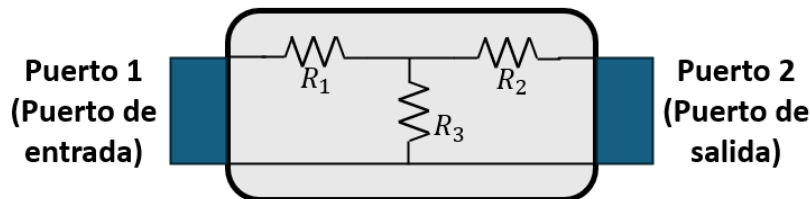


Figura 2.6 –Ejemplo esquemático de un atenuador coaxial.

2.10 Generador de señales de radiofrecuencia

El dispositivo conocido como generador de señales de radiofrecuencia, es un instrumento que está enfocado en ejercer un estímulo de prueba para circuitos de radiofrecuencia o módulos receptores, en donde, aplica una señal senoidal u otra forma de onda (si existe modulación) en un rango de frecuencia deseado. Normalmente, los generadores de señales proveen de la opción de aplicar modulación analógica o digital a la onda original que proporcionan, sirviendo para distintos propósitos, como los de caracterizar componentes y circuitos o bien, replicar el funcionamiento de algún dispositivo utilizado para comunicaciones inalámbricas. Para un generador de este tipo, es muy importante tener una alta precisión tanto en frecuencia como en amplitud de la señal, tener una buena pureza espectral de la señal (que no esté contaminada con armónicos o ruido indeseado) y baja fuga de señal entre sus terminales [2].

En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de un diagrama general de un generador de señales de radiofrecuencia:

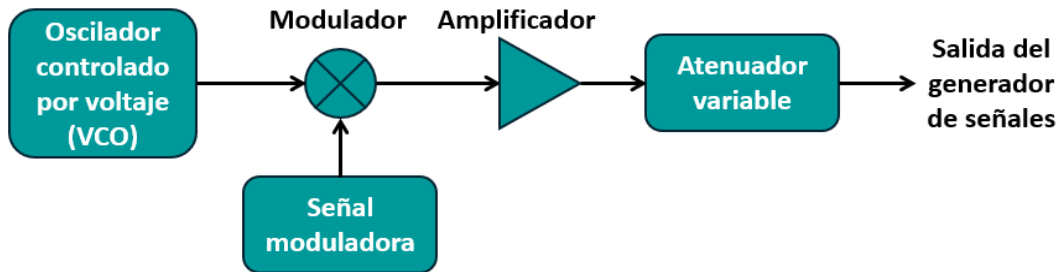


Figura 2.7 –Ejemplo esquemático de un generador de señales de radiofrecuencia.

Como puede observarse en el diagrama esquemático, el elemento más importante y que provee de la señal de alta frecuencia es el oscilador controlado por voltaje (VCO, por sus siglas en inglés), el VCO, aumenta o reduce la frecuencia de la señal en su salida en función del voltaje de control que se le aplica [2, 25]. El siguiente componente es el modulador, el cual, se encarga de variar y multiplicar la señal de alta frecuencia que sale del VCO (señal portadora) por una señal moduladora que contiene la información a inyectar en la portadora, esta etapa es opcional en base al criterio del usuario y la aplicación en la que se utilice el generador de señales. Después, la señal modulada (si es que, se aplicó modulación) pasa por una etapa de amplificación y atenuación controlada para proveer de la amplitud correcta en la salida del generador de señales [2].

2.11 Switches de radiofrecuencia

Los switches de radiofrecuencia son dispositivos comúnmente utilizados para guiar a las ondas electromagnéticas por un camino deseado dentro de un circuito, en aplicaciones de comunicaciones inalámbricas, es muy común introducir switches para cambiar el modo de operación de un sistema entre transmisión o recepción compartiendo la misma antena. También, en comunicaciones móviles, se suelen utilizar los switches para conectar la antena a un transmisor, receptor o un banco de filtros, amplificadores o atenuadores en específico, en función de la frecuencia, modulación, amplitud y otras características de las señales que está manejando el sistema [7].

Por otro lado, un switch puede ser construido de diversas formas, siendo la más común, utilizando dispositivos de estado sólido como FETs para abrir o cerrar un camino para la señal, sin embargo, también pueden utilizar distintos métodos como los sistemas microelectromecánicos (MEMS), diodos PIN o switches manuales mecánicos [7]. A su vez, los switches pueden brindar distintas opciones para la interconexión (tiros), por ejemplo, para abrir o cerrar un circuito de una sola vía o entrada (polo), se tienen los switches de un polo, un tiro; sin embargo, también hay opciones como dos polos con un tiro, un polo con doble tiro, doble polo con doble tiro, un polo con cuatro tiros, etc. A continuación, se muestra un ejemplo de la aplicación de un switch de un polo con doble tiro para transmitir o recibir una señal en un sistema:

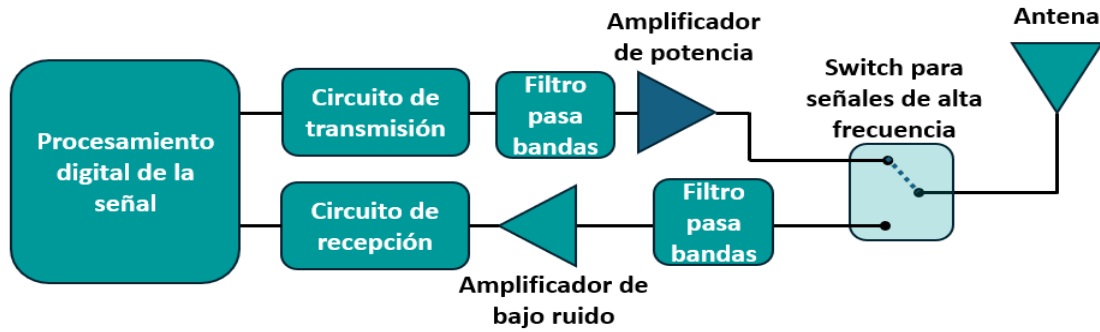


Figura 2.8 –Aplicación de un switch de un polo con doble tiro para un sistema de transmisión y recepción.

2.12 Analizador de espectro de barrido

Una señal puede ser medida y analizada en el dominio de la frecuencia en vez del tiempo y, uno de los instrumentos más eficaces para esta tarea son los analizadores de espectro. Un analizador de espectro es un instrumento que, caracterizada una forma de onda en el dominio de la frecuencia, en donde, la señal al ser recibida en el dominio del tiempo es muestreada por ciertos detectores del instrumento de forma que, es posible determinar sus componentes de frecuencia. De este modo, en la pantalla de un analizador de espectro, en el eje horizontal (eje x) se mostrará el rango de frecuencia en el que estamos midiendo mientras que, en el eje vertical (eje y), se apreciará el nivel de potencia (usualmente, en unidades de dBm) asignado a cada componente de frecuencia [2].

En el pasado, los analizadores de espectro clásicos solo podían medir una frecuencia al mismo tiempo, en donde, dependían de diversos bancos de filtros que eran intercambiados para medir distintas frecuencias. Sin embargo, en la actualidad, los analizadores de espectro modernos contienen un circuito que les permite sintonizar o ajustar la frecuencia a medir sin la necesidad de un banco de filtros, ejecutando un barrido continuo en un rango de frecuencia deseado, a este tipo de analizador de espectro se le conoce como “analizador de espectro de barrido” [2]. La siguiente figura, muestra un diagrama conceptual de un analizador de espectro de barrido:

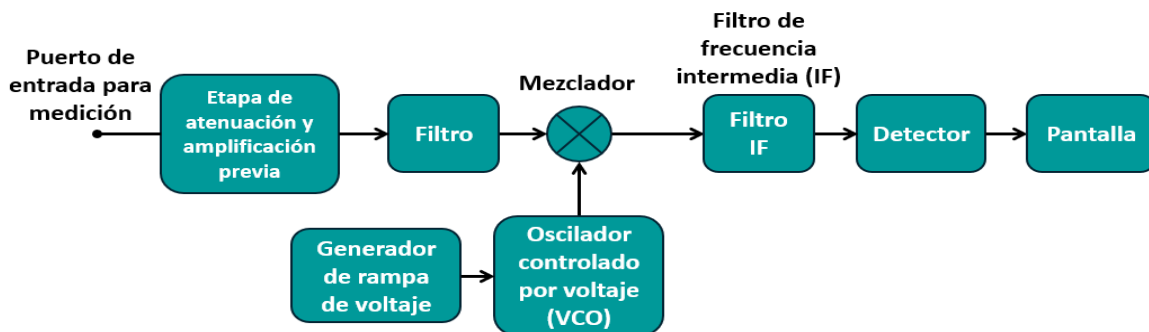


Figura 2.9 –Ejemplo esquemático de un analizador de espectro de barrido.

Como puede verse en la figura anterior, la señal de alta frecuencia a caracterizar es medida en el puerto de entrada, en donde, en base a las opciones seleccionadas en el analizador de espectro, esta es amplificada o atenuada y filtrada en la sección posterior. Después, la señal pasa por un

mezclador que está conectado a un oscilador controlado por voltaje que es manipulado por un generador de rampa produciendo el efecto de barrido de frecuencia. En la etapa del mezclador, ocurre una conversión de frecuencia decreciente, puesto a que, la frecuencia de la señal es restada de la frecuencia del oscilador, obteniéndose como resultado una señal proporcional a la muestreada, pero con una frecuencia intermedia.

De este modo, solo la componente de frecuencia que cae justo dentro del ancho de banda del filtro de frecuencia intermedia pasa hasta el detector, en donde este, produce un nivel de voltaje que es proporcional a la potencia de la señal, enviando este voltaje a la pantalla para mostrar la amplitud de la potencia en función de la frecuencia y así, mostrando las componentes en el espectro de frecuencia. Dentro de las opciones y especificaciones en un analizador de espectro, hay algunas que son sumamente importantes para su utilización. Una de ellas es el ancho de banda (bandwidth, en inglés), en donde, en el analizador de espectro se detalla como el rango de frecuencia que abarca la señal que estamos midiendo, esto, nos indica desde que frecuencia inicial y hasta cual frecuencia final aplicaremos el barrido para analizar las componentes espectrales de la señal [2, 10].

Otra especificación importante es la resolución del ancho de banda del muestreo (resolution bandwidth, en inglés), en donde, este parámetro es igual al ancho de banda del filtro de frecuencia intermedia y determina la resolución para detectar distintas frecuencias en la señal analizada por el instrumento. Normalmente, los analizadores de espectro tienen varias opciones seleccionables de resolución de ancho de banda (ajustando respectivamente el filtro de frecuencia intermedia), en donde, la resolución más fina es la que te proporciona más información de la señal, sin embargo, entre más fina sea la resolución de ancho de banda, más tiempo le tomará al instrumento ejecutar el mismo barrido de frecuencia en la captura de la señal, por lo que, es recomendable encontrar un punto intermedio entre la precisión que deseamos de la señal y el tiempo esperado de captura de barrido por el instrumento [2, 10].

Otro factor importante para considerar en un analizador de espectro es el rango dinámico, en donde, se define como la diferencia entre la señal más grande que este puede medir con respecto a la señal más pequeña que puede medir al mismo tiempo, esta diferencia, normalmente se identifica en unidades de decibeles dB. El rango dinámico, en comparación con los otros parámetros mencionados, comúnmente no es ajustable y viene determinado por la eficiencia de los componentes del instrumento. Así, al seleccionar un nivel de referencia máximo que se espera medir en una señal, se debe cuidar que, si se desea medir otra señal de magnitud muy pequeña en comparación, el rango dinámico sea lo suficientemente amplio como para que la señal de baja potencia no caiga por debajo del ruido interno mínimo del instrumento (piso de ruido del instrumento) dado a que, si eso sucediera, la señal sería indetectable [2, 10].

2.13 Combinadores y divisores de potencia

Un combinador es un dispositivo utilizado para combinar o sumar dos señales. Usualmente, los combinadores son elementos de tres puertos, en donde, dos de ellos son usados para aplicar las señales que se desean sumar mientras que, en el tercero, se obtiene la suma de ellas y este, se utilizará para la aplicación deseada en otro circuito. Por otro lado, el divisor de potencia es el

mismo dispositivo que un combinador, sin embargo, los puertos se acomodan de tal forma que, solo se utiliza un puerto para aplicar una única señal y los dos puertos restantes se utilizan para alimentar diferentes secciones de un circuito. Estos dispositivos, suelen diseñarse en configuración “delta” o en configuración “Y” (estrella) y siempre se busca que, en todos sus puertos, exista un acoplamiento de impedancia de 50 ohms para evitar reflexiones indeseadas en las redes [2]. A continuación, se muestran las configuraciones mencionadas y la operación como combinador o divisor de potencia [2]:

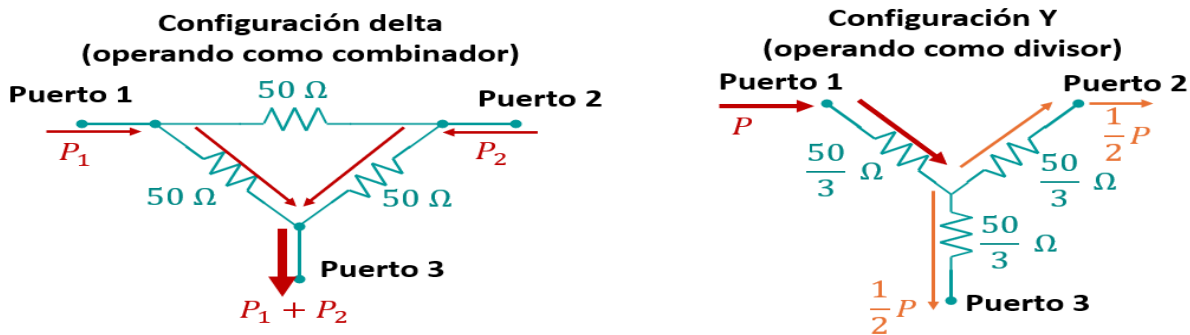


Figura 2.10 –Ejemplo de configuraciones de combinador y divisor de potencia.

2.14 Amplificador de bajo ruido

Un amplificador de bajo ruido es un elemento en un circuito de radiofrecuencia que, busca amplificar una señal débil con una ganancia moderada mientras que, procura agregar muy poca potencia de ruido que pudiera contaminar la señal que se está amplificando. Los amplificadores de bajo ruido son comúnmente encontrados en los sistemas de comunicaciones inalámbricas para recepción, estando relativamente cerca de la antena receptora, utilizándose para amplificar las señales débiles captadas. A parte de la estabilidad y ganancia que se buscan en el diseño de un amplificador en general, el cuidado de la figura de ruido es muy importante, característica en la que resaltan los amplificadores de bajo ruido con respecto a otros tipos [9].

La gran importancia de un amplificador de bajo ruido radica en que, la primera etapa de un sistema de radiofrecuencia tiene el efecto dominante en el desempeño general del ruido en el sistema, es por esto, que en la recepción se busca tener un amplificador con la menor figura de ruido posible. A su vez, es importante recordar que, en los diseños de amplificadores, no se puede tener una ganancia y estabilidad máximas sin comprometer el efecto en la figura de ruido, por lo tanto, se mantiene un equilibrio priorizando la figura de ruido en el diseño de estos dispositivos [1, 9].

2.15 Antenas

Una antena es un elemento que sirve como interfaz entre un circuito y un medio de propagación como el aire o el vacío, en donde, puede operar como antena transmisora o receptora. Cuando una señal de alta frecuencia en forma de onda es guiada por una línea de transmisión y esta, al llegar a la antena es convertida en una onda electromagnética que se propaga por el espacio, se dice que la antena está operando como transmisora. Por otro lado, si la antena capta una onda electromagnética

en el espacio y sirve de transductor para convertirla a una onda guiada en la línea de transmisión hasta llegar a un circuito de recepción, se dice que la antena opera como receptora. Dependiendo del sistema, se puede utilizar la misma antena como receptora o transmisora, o bien, se utiliza una para transmisión y otra para recepción, en base a las necesidades o aplicaciones requeridas [4].

A todo el camino utilizado en el proceso de transmisión y recepción, se le conoce como el “enlace de radiofrecuencia” (RF link, en inglés), en donde, este comprende desde la salida del circuito de transmisión hasta la entrada del circuito de recepción, incluyendo el cable desde el circuito de transmisión hasta la antena transmisora, la antena transmisora en sí, el camino de propagación en el espacio o aire, la antena receptora y el cable que conecta la antena con el circuito de recepción. Es importante mencionar que, la señal recibida es muy pequeña en comparación con la transmitida, dado a que, en su propagación por el espacio se pierde mucha potencia [4]. En la siguiente figura, se muestra un ejemplo de la operación de una antena transmisora y una receptora:

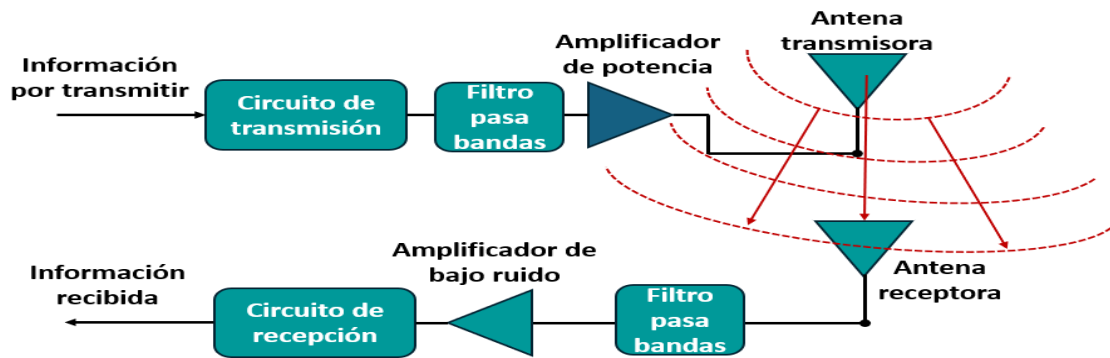


Figura 2.11 – Ejemplo de antenas operando como transmisora y receptora en comunicaciones inalámbricas.

2.16 Filtros

Los filtros son elementos muy importantes en los sistemas de radiofrecuencia y su finalidad es la de atenuar o eliminar señales con frecuencias indeseadas en un circuito. Los filtros poseen elementos que almacenan energía y tienen características dependientes de la frecuencia de la señal que pasa por ellos. De este modo, estos dispositivos son utilizados para diversos propósitos, como para descartar señales con frecuencias fuera de una banda de operación en un sistema de recepción, eliminar señales residuales como los armónicos en la salida de los amplificadores de potencia antes de transmitirlos o bien, para reducir la propagación de ruido en frecuencias fuera de las bandas deseadas en un circuito de radiofrecuencia. Dependiendo de la aplicación, los filtros se dividen en cuatro grupos principales en base a su funcionalidad:

- Filtros pasa bandas: Estos filtros, permiten el paso a aquellas frecuencias dentro de un rango determinado de frecuencia, denominado como banda. Las señales fuera de este rango son atenuadas enormemente.
- Filtros rechaza bandas: Estos, hacen lo opuesto a los pasa bandas, se encargan de atenuar únicamente las señales que caen dentro de un rango determinado de frecuencias.

- Filtros pasa altas: Los pasa altas permiten el paso de las señales que tengan una frecuencia por encima de la frecuencia de corte " f_c " determinada por el filtro, si las señales están por debajo, entonces son bloqueadas.
- Filtros pasa bajas: Realizan lo puesto a los filtros pasa altas, es decir, permiten el paso de señales únicamente con frecuencias por debajo de la frecuencia de corte " f_c ".

A continuación, se muestra una figura que indica el comportamiento grafico de cada clase de filtro:

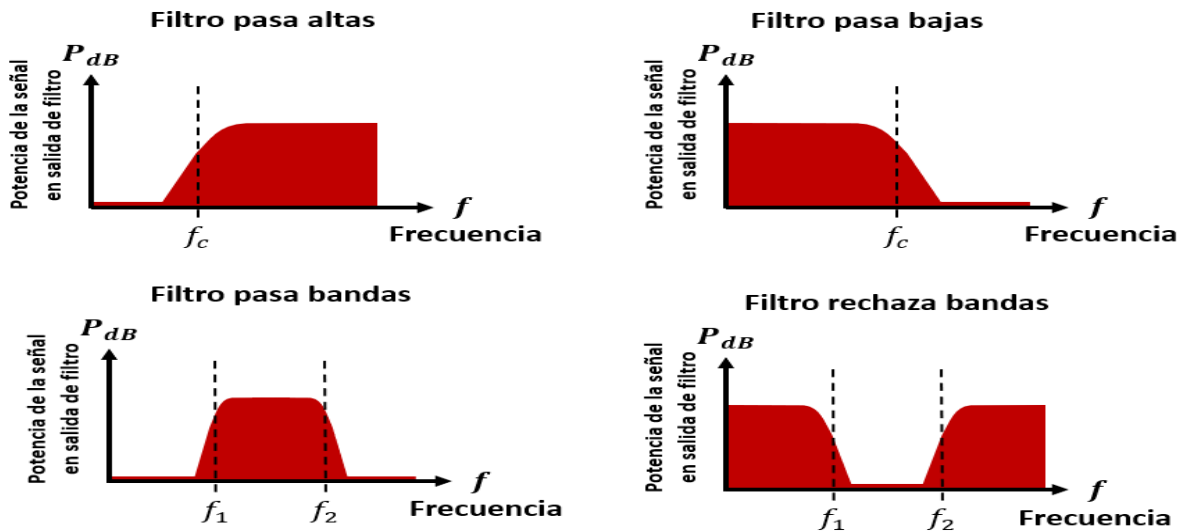


Figura 2.12 – Tipos de filtros en función de su operación.

2.17 Fuentes de voltaje de corriente directa y digitales

La energía eléctrica suministrada por fuentes de voltaje de corriente directa y digitales son necesarias en la mayoría de los circuitos electrónicos, incluso en los circuitos de alta frecuencia es necesario utilizar fuentes de corriente directa para alimentar amplificadores y algunos elementos de estado sólido como transistores, mientras que, las fuentes digitales son utilizadas para aplicar voltajes bajos o altos (0 y 1, respectivamente) para configurar switches u otros elementos. Las fuentes de voltaje de corriente directa suelen ser variables, para que el usuario pueda adaptarlas a las necesidades y especificaciones correspondientes de cada componente, a su vez, muchas de ellas cuentan con limitadores de corriente para evitar proporcionar más corriente de la deseada en caso de algún problema de corto circuito. Estas, por lo general, no cuentan con muchos puertos en paralelo con voltajes variables distintos, lo más común, es que tengan uno o dos dado que, esto implicaría dividir la capacidad de potencia total del instrumento en varios canales.

Por otro lado, las fuentes digitales, tienen únicamente dos valores discretos de voltaje, que son el valor bajo (normalmente 0V, puesta a tierra) y valor alto, que es el voltaje máximo que acepta un control digital siendo un valor muy común 5 volts. Sin embargo, dado a que, la finalidad de las fuentes digitales no es alimentar un circuito de alto consumo de potencia, solo suministran voltaje discreto con muy poca capacidad de corriente para los elementos digitales en los circuitos, y es por esto, que como cada uno de sus puertos o canales consumirá una potencia muy reducida, las

fuentes digitales si pueden contar con una mayor cantidad de canales en comparación con las fuentes de voltaje variable. A continuación, se puede observar una figura que muestra como una fuente de voltaje de corriente directa alimenta a un amplificador de potencia utilizando uno de sus puertos, mientras que, una fuente digital se encarga de controlar la posición de un switch utilizando varios de sus puertos digitales de control:

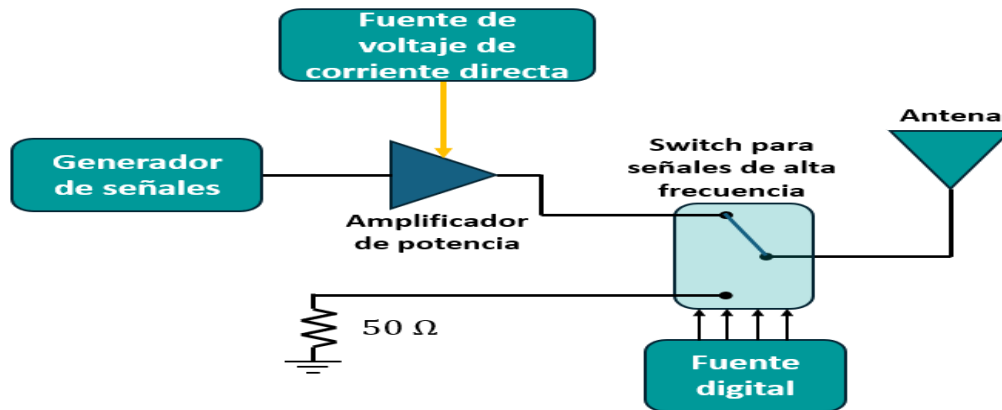


Figura 2.13 – Ejemplo de circuito de alta frecuencia con una fuente de voltaje de corriente directa y una digital.

2.18 Concepto de módulo de recepción y sus características

Un módulo de recepción hace referencia a un dispositivo de alta frecuencia que se ubica entre la antena y el procesamiento de demodulación digital de la señal recibida. Por lo tanto, este, suele incluir únicamente una antena, filtros pasa bandas y amplificadores de bajo ruido; usualmente, en estos módulos se deja la etapa de mezcladores, osciladores locales y conversión a baja frecuencia para otro circuito integrado como es común en los sistemas de recepción para radio definida por software, utilizados en comunicaciones móviles de cuarta y quinta generación [4, 12, 13, 26]. Para propósitos de este trabajo de investigación, el enfoque del módulo de recepción genérico es únicamente para recibir señales, por lo que, el amplificador a tomar en cuenta será del tipo de bajo ruido, como se muestra en la siguiente figura:

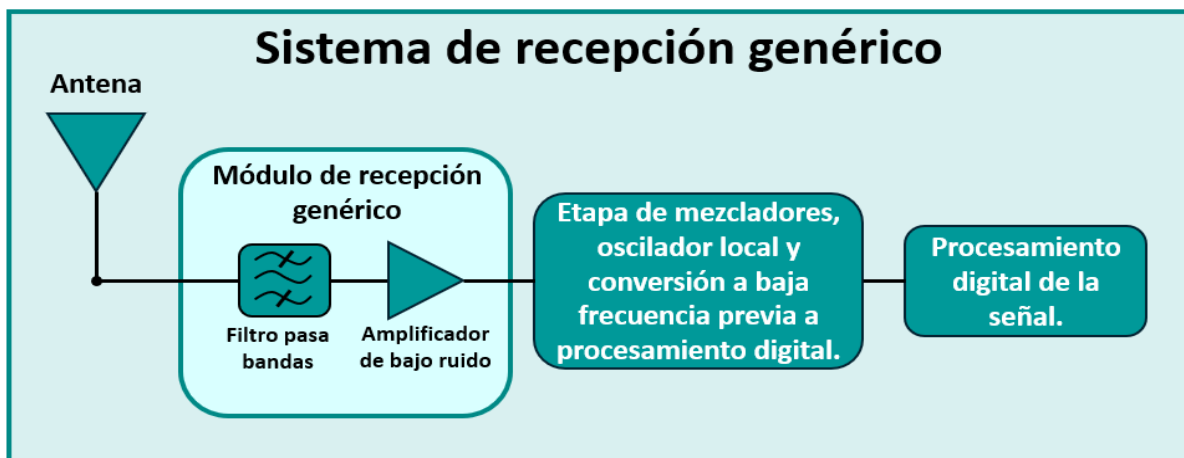


Figura 2.14 – Módulo de recepción genérico como una porción de un sistema de recepción.

Dicho esto, el módulo de recepción genérico en su configuración general constará de un puerto para conectar una antena externa, de un filtro pasa bandas y un amplificador de bajo ruido; en donde, se espera que estos componentes puedan cumplir con los siguientes propósitos:

- La antena externa conectada al módulo deberá ser capaz de sintonizar señales de radiofrecuencia para ciertas bandas específicas en función de su diseño o aplicación, de modo que, aproveche la mayor porción posible de potencia de la señal captada y a su vez, el puerto que la conecta al módulo de recepción deberá de proveer de un camino con baja pérdida de transmisión y reflexión para conducir a la señal a la siguiente etapa [11, 14].
- El filtro pasa bandas debe ser capaz de atenuar considerablemente aquellas señales con frecuencias que caen fuera de la banda de operación deseada, evitando que, estas produzcan efectos indeseables en el sistema de recepción [15, 16].
- El amplificador de bajo ruido deberá amplificar las señales captadas por la antena de recepción agregando el mínimo ruido y distorsión posible a esta, al trabajar en cada una de sus configuraciones o modos de operación programados. También, es importante mencionar que, el amplificador debe contar con una excelente linealidad en su operación al variar la potencia de entrada o la frecuencia [11, 14-16, 25, 26].

2.19 Mediciones de caracterización: Parámetros-S, ganancias y pérdidas de retorno

Los parámetros de dispersión, también conocidos como “parámetros-S” son unos coeficientes con una parte real e imaginaria (complejos) que nos ayudan a determinar la transmisión y reflexión de la potencia o voltaje de las ondas electromagnéticas al interactuar con una red eléctrica que tiene una cantidad “n” de puertos. La teoría de estos parámetros se fundamenta en el principio que, sin importar el tipo de dispositivo eléctrico que estemos analizando, este puede ser modelado como una red, en la cual, al conocer sus parámetros de dispersión, podremos descifrar su comportamiento al interactuar con señales de alta frecuencia [1, 17]. De este modo, es posible modelar un módulo de recepción genérico como una red de dos puertos, como se muestra en la siguiente figura:

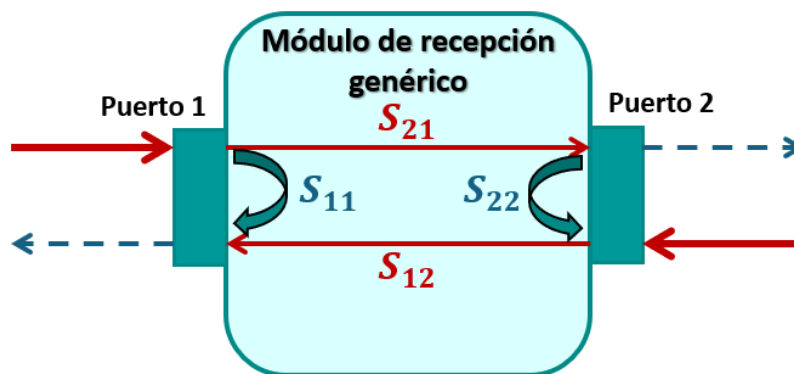


Figura 2.15 – Módulo de recepción genérico de alta frecuencia modelado como red de 2 puertos.

Es importante mencionar que, los parámetros-S, están determinados conforme a las ondas de voltajes incidentes y las reflejadas; pero, en los sistemas de radiofrecuencia, es más conveniente utilizar la potencia promedio de los dispositivos para evitar la dependencia en la posición física en el circuito, de tal modo que, los parámetros-S expresados en voltaje, deben elevarse al cuadrado para indicar unidades de potencia. Por otro lado, también resulta muy útil el trabajar con unidades de carácter logarítmico como son los decibeles (dB), en lugar de usar unidades lineales como los watts para describir la potencia, debido al fácil manejo de los cálculos en los circuitos. Dicho esto, al transformar los parámetros de dispersión a su representación en decibeles, obtendremos los términos conocidos como la ganancia hacia adelante o en reversa utilizando los coeficientes de transmisión y las pérdidas de retorno a partir de los de reflexión, como se indica a continuación [1]:

- Ganancia en sentido hacia adelante o directa del dispositivo (o, simplemente, ganancia):

$$\mathbf{Ganancia}_{(dB)} = 10\log_{10}|S_{21}|^2 = 20\log_{10}|S_{21}|$$

- Ganancia en sentido reverso del dispositivo:

$$\mathbf{GananciaReversa}_{(dB)} = 10\log_{10}|S_{12}|^2 = 20\log_{10}|S_{12}|$$

- Pérdida de retorno en la entrada del dispositivo:

$$\mathbf{Pérdida\ de\ retorno\ entrada}_{(dB)} = 10\log_{10}|S_{11}|^2 = 20\log_{10}|S_{11}|$$

- Pérdida de retorno en la salida del dispositivo:

$$\mathbf{Pérdida\ de\ retorno\ salida}_{(dB)} = 10\log_{10}|S_{22}|^2 = 20\log_{10}|S_{22}|$$

2.20 Mediciones de caracterización: Punto de intercepción de tercer orden

Un amplificador de bajo ruido, como ya se ha mencionado anteriormente, es un dispositivo que se especializa en amplificar señales con baja potencia mediante una ganancia moderada y aportando muy poco ruido extra para no deformar la señal incidente. Sin embargo, otro aspecto muy importante que debe tener un amplificador de este tipo, es la distorsión que agrega a dicha señal, en donde esta, se puede definir como la contaminación con armónicos o productos de intermodulación que agregan componentes de frecuencia indeseables en la señal amplificada. Dado a que, ningún amplificador en el mundo real es perfecto, todos estos agregarán en cierta medida un nivel de distorsión, por lo que, este normalmente es cuantificado en el diseño y, medido en sistemas de caracterización para comprobar que la distorsión no excede algún valor permitido.

Un método o medición muy común para cuantificar la distorsión de un amplificador de bajo ruido, es mediante el punto de intercepción de tercer orden, en donde, se aplica una señal compuesta de dos tonos (frecuencias) en la entrada de un amplificador y, se observa la respuesta en frecuencia de unas componentes conocidas como “productos de intermodulación de tercer orden”. Sean los tonos de la señal “ F_1 ” y “ F_2 ”, se espera que los armónicos y los productos de intermodulación generados a partir de la distorsión propia del amplificador sean los siguientes [1, 16, 18]:

- Armónicos de segundo orden, compuestos por las frecuencias “ $2F_1$ ” y “ $2F_2$ ”.
- Productos de intermodulación de segundo orden, compuestos por las frecuencias “ $F_1 + F_2$ ” y “ $F_2 - F_1$ ”.
- Armónicos de tercer orden, compuestos por las frecuencias “ $3F_1$ ” y “ $3F_2$ ”.
- Productos de intermodulación de tercer orden, compuestos por las frecuencias “ $2F_1 + F_2$ ”, “ $2F_2 + F_1$ ”, “ $2F_1 - F_2$ ”, y “ $2F_2 - F_1$ ”.

La distribución en el espectro de frecuencia para estas componentes se muestra a continuación:

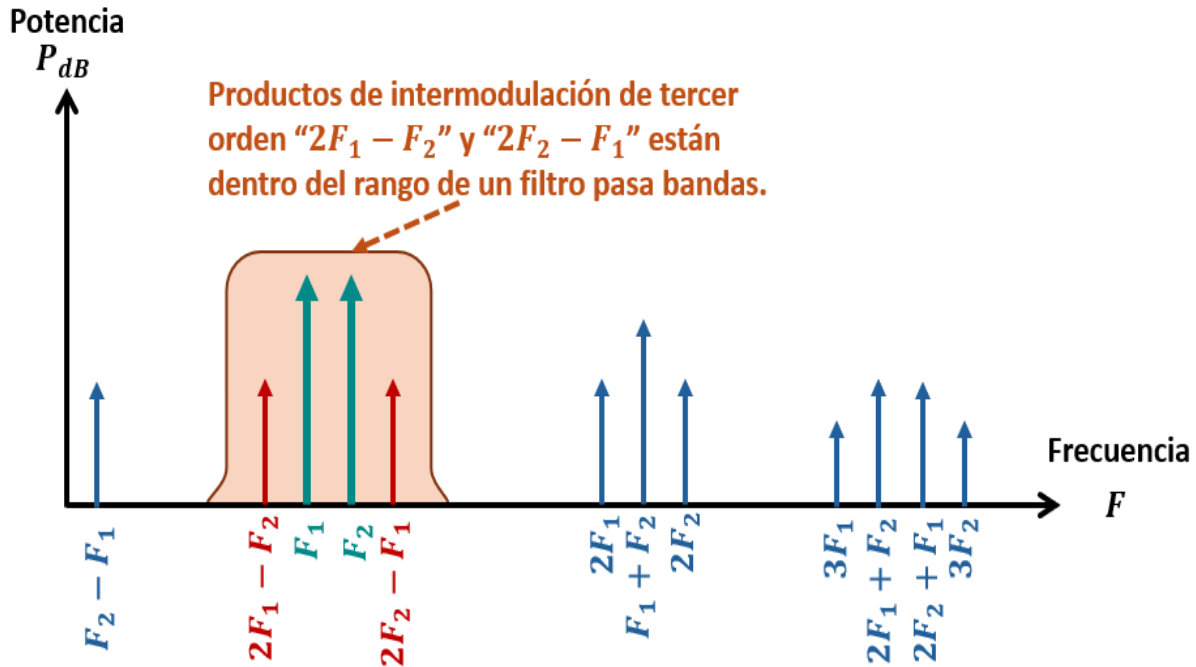


Figura 2.16 – Espectro de frecuencia mostrando tonos principales, armónicos y productos de intermodulación.

Como puede observarse, casi todos los armónicos y productos de intermodulación pueden filtrarse al utilizar un filtro pasa bandas, lo que evitaría el problema de distorsión, sin embargo, los productos de intermodulación de tercer orden del tipo “ $2F_1 - F_2$ ”, y “ $2F_2 - F_1$ ” están muy cerca a los tonos principales de la señal y caen dentro del rango de la banda del filtro, por lo que, estos no pueden eliminarse por medio de algún método de filtrado y es un nivel de distorsión con lo que se tendrá que contar al utilizar el amplificador de bajo ruido. Es por esto, que la medición del punto de intercepción de tercer orden busca caracterizar el comportamiento de estas componentes de frecuencia para asegurarse que no sobrepasaran algún nivel deseado.

Ahora bien, si estuviéramos monitoreando la potencia de salida del amplificador al aplicarle una señal con una potencia de entrada deseada, notaríamos que, conforme incrementamos esa potencia de entrada, la respuesta de los tonos principales aumentará en la misma proporción. Sin embargo, la potencia de los productos de intermodulación de tercer orden anteriormente mencionados, aumentará alrededor de tres veces más rápido en comparación, por lo que, teóricamente, podríamos aumentar la potencia de entrada hasta un punto en el que, los productos de intermodulación interceptarían la potencia de los tonos principales, es este mismo punto, el que llamamos “punto

de intercepción de tercer orden” y, el valor reportado por la medición es el de la potencia de entrada en la que ocurre [1, 16, 18].

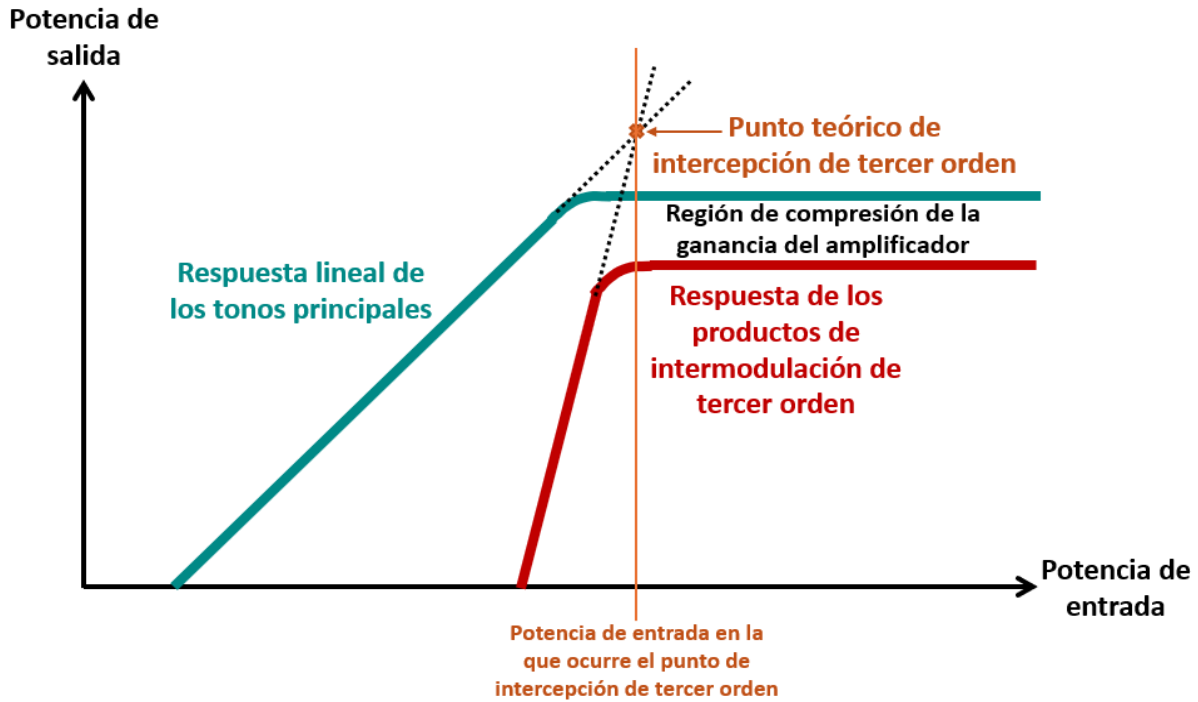


Figura 2.17 – Gráfica del punto de intercepción de tercer orden.

Nótese que, el punto de intercepción de tercer orden es un punto teórico, dado a que, en la realidad, si aumentamos la potencia de entrada continuamente, haremos que el amplificador llegue a la región de compresión de ganancia antes de alcanzar el punto de intercepción de tercer orden. A pesar de que, el punto de intercepción de tercer orden no ocurre en la práctica, su estimación teórica es un muy buen indicador del grado de linealidad y distorsión que tiene el amplificador que se está caracterizando. Normalmente, para obtener el punto teórico de intercepción de tercer orden, se aplica una señal con una potencia de entrada “ $P_{entrada(dBm)}$ ” que asegure que el amplificador está operando en la región lineal y se toma una captura del espectro en frecuencia de su respuesta de salida, en donde, se analiza la potencia de los tonos principales “ $P_{salida_{f_1f_2}(dBm)}$ ” y, la potencia del producto de intermodulación de tercer orden más alto dentro de la banda “ $P_{IM3(dBm)}$ ”, de forma que, la potencia de entrada en la que ocurriría el punto de intercepción de tercer orden “ $PI3_{(dBm)}$ ” se calcula como:

$$PI3_{(dBm)} = P_{entrada(dBm)} + \frac{P_{salida_{f_1f_2}(dBm)} - P_{IM3(dBm)}}{2}$$

A partir de esta expresión y las figuras anteriormente mostradas, podemos concluir que, entre más grande sea la potencia de entrada que se necesita para llegar al punto teórico de intercepción de tercer orden, menor será la distorsión del amplificador, indicando una mejor linealidad.

2.21 Mediciones de caracterización: Figura de ruido

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, dentro de un módulo de recepción, es de suma importancia contar con un amplificador de bajo ruido para que sea capaz de amplificar señales muy débiles captadas por la antena mientras agrega la mínima cantidad posible de ruido. Por lo que, es de alta importancia caracterizar el nivel de ruido agregado que aporta el módulo de recepción a una señal que fue amplificada por su amplificador de bajo ruido interno. El método más común para obtener información sobre el ruido agregado por un dispositivo, de acuerdo a la literatura [1, 19, 20], es por medio de la medición del factor de ruido y su conversión a figura de ruido, en donde, el factor de ruido “ F ” se basa en la comparación de que tanto se deteriora o empeora la relación que existe entre la potencia de la señal deseada (usable) “ $S_{entrada}$ ” con respecto el ruido mezclado en ella “ $R_{entrada}$ ” antes de entrar al dispositivo “ $SR_{entrada}$ ” y, después de salir de este “ SR_{salida} ”. Siendo “ S_{salida} ” y “ R_{salida} ” la potencia de la señal y del ruido en la salida respectivamente. Nótese que, el factor de ruido siempre será igual o mayor que uno:

$$F = \frac{\frac{S_{entrada}}{R_{entrada}}}{\frac{S_{salida}}{R_{salida}}}$$
$$F = \frac{SR_{entrada}}{SR_{salida}} \geq 1$$

Ahora bien, para obtener la figura de ruido “ $FiguraRuido_{(dB)}$ ”, simplemente convertimos a decibeles “dB” el factor de ruido por medio de la siguiente formula:

$$FiguraRuido_{(dB)} = 10 \log_{10}(F)$$

Existen diversos métodos para medir la figura de ruido, los dos más comunes son el del Factor-Y, en donde, se utiliza una fuente de ruido caracterizada y el segundo, es el método de la medición del ruido térmico, en el cual, se utiliza el ruido natural causado por la temperatura y la fluctuación de las cargas en el interior de una resistencia de 50 ohms. En el caso del ruido térmico de entrada “ $R_{entrada}$ ”, este suele calcularse por medio de la constante de Boltzmann “ k_B ”, la temperatura absoluta en Kelvin “ T ” y, el ancho de banda del espectro que vamos a analizar “ B ”:

$$R_{entrada} = k_B T B$$

Para ambos métodos, suele utilizarse un analizador de espectro como instrumento de la medición de la potencia en el espectro de frecuencia, en donde, primeramente, se conecta el analizador a la fuente de ruido únicamente para obtener el factor de ruido individual del instrumento. Posteriormente, se incluye el dispositivo el cual queremos caracterizar, así como otros elementos en el circuito y, por medio de la ecuación de ruido en cascada de Friis, se obtiene el factor de ruido del dispositivo y su conversión a figura de ruido en decibeles. La ecuación de Friis para un sistema en cascada típico de tres elementos (considerando el analizador de espectro) está dada por la siguiente expresión:

$$F_{sistema} = F_1 + \frac{(F_2 - 1)}{G_1} + \frac{(F_{analizador} - 1)}{G_1 G_2}$$

En donde, “ $F_{sistema}$ ” es el factor de ruido del sistema total incluyendo todos los elementos en conjunto con el analizador, “ F_1 ” y “ F_2 ” son los factores de ruido del primer y segundo elemento respectivamente y “ G_1 ” y “ G_2 ” sus ganancias. También, “ $F_{analizador}$ ” es el factor de ruido del analizador de espectro. Si estamos interesados en el factor de ruido y figura de ruido de algún elemento en particular, normalmente, mediríamos el del analizador de espectro primero, el del sistema en segundo lugar y, por último, el del otro elemento restante, así como las ganancias respectivas, de modo que, simplemente despejamos el factor de ruido deseado de la ecuación de Friis para hacer la conversión respectiva a figura de ruido.

2.22 Sistema de caracterización

Un sistema de caracterización es un equipo que se conforma por un conjunto de diversas fuentes de poder e instrumentos de medición que trabajan en conjunto para elaborar una medición en específico a un dispositivo por caracterizar. Generalmente, los instrumentos de medición en un sistema de caracterización son los mismos instrumentos modulares o individuales de laboratorio que se utilizan manualmente por un usuario, sin embargo, en un sistema de este tipo, estos interactúan entre si gracias a que tienen comunicación con una computadora que se encarga de controlarlos por medio de software. Para el caso de un sistema de caracterización enfocado en medir módulos de recepción, el sistema de caracterización tendrá que contar con generadores de señales de radiofrecuencia, diversas fuentes de voltaje tanto analógico como digital, amperímetros y un analizador de espectro o de redes para verificar el comportamiento en frecuencia del módulo por caracterizar. En la siguiente figura, se muestra un ejemplo esquemático de un sistema de caracterización:

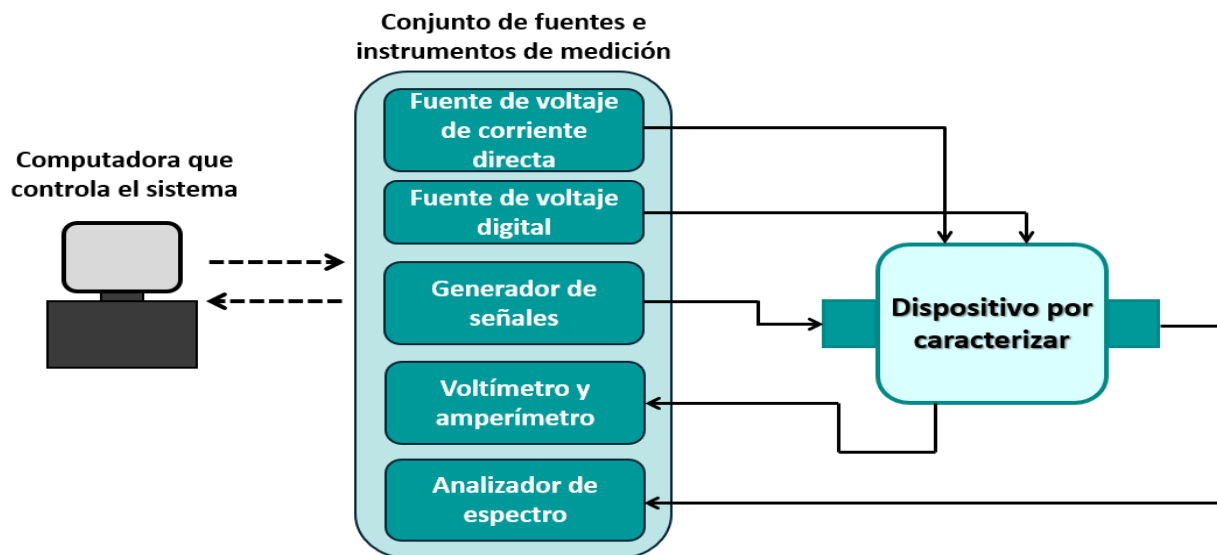


Figura 2.18 – Ejemplo esquemático de un sistema de caracterización.

3 Capítulo 3: Diseño de rutina de caracterización, selección de módulo de recepción genérico, diseño y construcción de sistema de caracterización secuencial

La primera etapa de este trabajo de investigación, se basó en el diseño de una rutina de caracterización general para evaluar las características operacionales de módulos de recepción genéricos. En donde, como se mencionó en el marco teórico, la finalidad de un módulo de recepción genérico será el recibir la señal de alta frecuencia, filtrarla en función de la banda de operación y amplificarla para que pueda ser analizada correctamente por el sistema receptor, por lo que, será primordial el asegurarse que cada uno de sus componentes internos cumplan con sus propósitos específicos de diseño. Así, para un módulo de recepción genérico, en función de los propósitos mencionados, es requerido caracterizar los siguientes datos del dispositivo mediante la ejecución de la rutina de caracterización diseñada, la cual, se efectuará mediante equipo de caracterización [11, 14-17]:

- a) Verificar pérdidas de potencia por reflexión en la entrada (conexión con la antena externa) y salida del dispositivo (salida del amplificador).
- b) Caracterizar ganancia del dispositivo para señales con frecuencias dentro de la banda deseada en los distintos modos de operación del amplificador, ya sea en sentido desde el puerto de entrada hacia la salida (ganancia hacia adelante) o desde la salida hacia la entrada (ganancia en reversa).
- c) Comprobar ganancia para señales con frecuencias fuera de la banda deseada (señales filtradas).
- d) Conseguir la corriente de consumo del amplificador de bajo ruido en sus distintos modos de operación.
- e) Caracterización de linealidad (o, distorsión) del amplificador de bajo ruido en sus distintas configuraciones de operación.
- f) Caracterizar el nivel de ruido agregado a la señal incidente durante la amplificación.

Con esta información, en conjunto con las características sobre los módulos de recepción y las distintas mediciones previamente investigadas en la literatura, se encontraron diversos tipos de pruebas que permiten evaluar las características mencionadas en los incisos desde a) a la f), en donde, como se menciona en el marco teórico, una de las formas más eficientes de caracterización de dispositivos de radiofrecuencia, es mediante la obtención de los parámetros-S o bien, las mediciones derivadas de estos, como la ganancia, pérdidas de retorno, ganancia en reversa, etc. De este modo, mediante la medición de las pérdidas de retorno en la entrada y salida, podremos verificar las características del módulo de recepción genérico indicadas en el inciso a), así como por medio de la medición de la ganancia hacia adelante dentro o fuera de la banda y ganancia en reversa caracterizamos los incisos b) y c).

Por otro lado, para medir la corriente de consumo en los distintos modos de operación del amplificador de bajo ruido como se indica en el inciso d), se midió la caída de voltaje en un circuito que monitorea la corriente, obteniéndose a partir de este, la corriente de consumo. En el caso del inciso e), para cuantificar la linealidad o distorsión de un amplificador de bajo ruido, fue conveniente considerar la medición del punto de intercepción de tercer orden en la rutina de caracterización. Finalmente, para obtener el nivel de ruido agregado por el módulo de recepción, se optó por utilizar la medición de figura de ruido.

3.1 Rutina de caracterización general para un módulo de recepción

Ahora que, hasta este punto, encontramos todas las pruebas y mediciones que cubren los requerimientos de caracterización mencionados en los incisos de a) hasta f), como también, obtuvimos información sobre los módulos de recepción y sus características en la investigación previa, fue posible diseñar el prototipo de rutina de caracterización general para módulos de recepción genéricos [15-17, 25, 26]. Es importante mencionar que, la rutina de caracterización generada se ejecutó mediante un sistema de caracterización secuencial diseñado como se detallará en secciones posteriores de este trabajo, puesto que, ese fue el objetivo del trabajo final de investigación. Así, de forma general, la rutina diseñada es como la indicada en la tabla siguiente:

Tabla 3.1 – Rutina de caracterización general para un módulo de recepción genérico de alta frecuencia.

Mediciones de caracterización por ejecutar a un módulo de recepción genérico
Ganancia en frecuencia de banda
Ganancia en reversa en frecuencia de banda
Ganancia para frecuencia fuera de banda
Pérdida de retorno en la entrada
Pérdida de retorno en la salida
Corriente de consumo
Punto de intercepción de tercer orden
Figura de ruido

3.2 Selección de módulo de recepción y su rutina de caracterización

Para la selección del dispositivo con el que se trabajaría en la investigación, fue posible conseguir ejemplares de un módulo de recepción genérico disponible en el mercado que, opera únicamente en el rango de frecuencias de 3400 MHz a 4000 MHz, teniendo como frecuencia central 3700 MHz. Cabe mencionar que, este dispositivo cuenta con tres niveles de amplificación (bajo, medio y alto) y, a su vez, contiene un filtro que ayuda a atenuar las frecuencias que estén fuera del espectro que ocupa el rango de 3400-4000 MHz.

A continuación, en la siguiente figura, se muestra un diagrama a bloques general y simplificado, del módulo de recepción genérico seleccionado conectado a una antena externa:

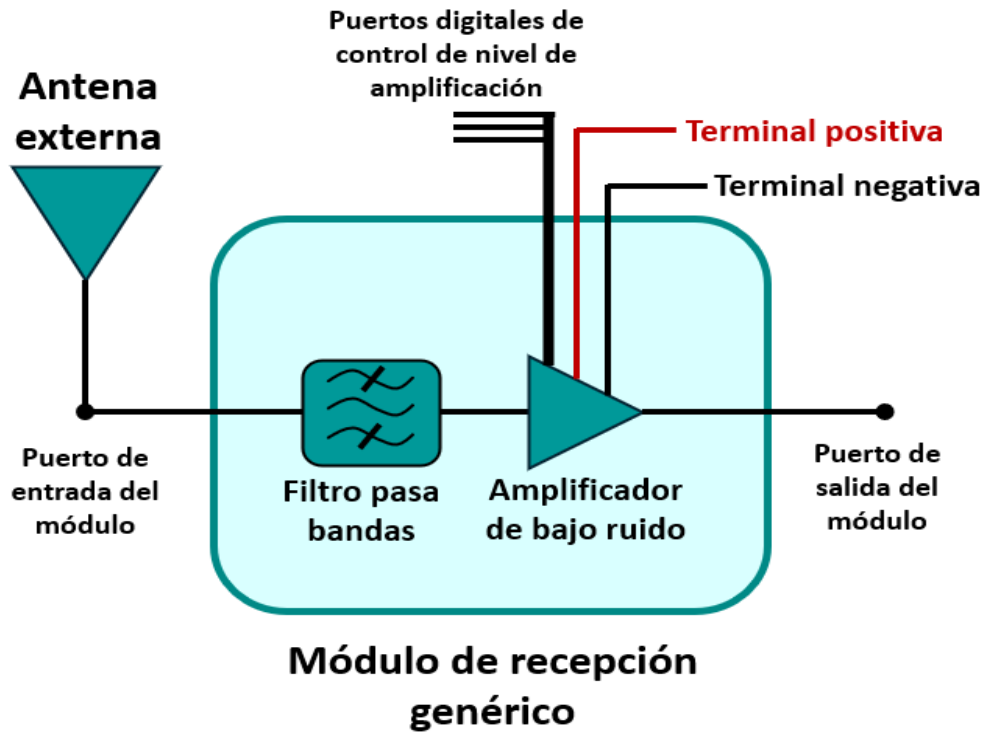


Figura 3.1 – Ejemplo de diagrama a bloques simplificado de módulo de recepción genérico seleccionado conectado a una antena externa.

Físicamente, el módulo de recepción seleccionado conectado a una antena externa se muestra en la siguiente figura, en donde, se puede notar que contiene los componentes mostrados en el esquema anterior:

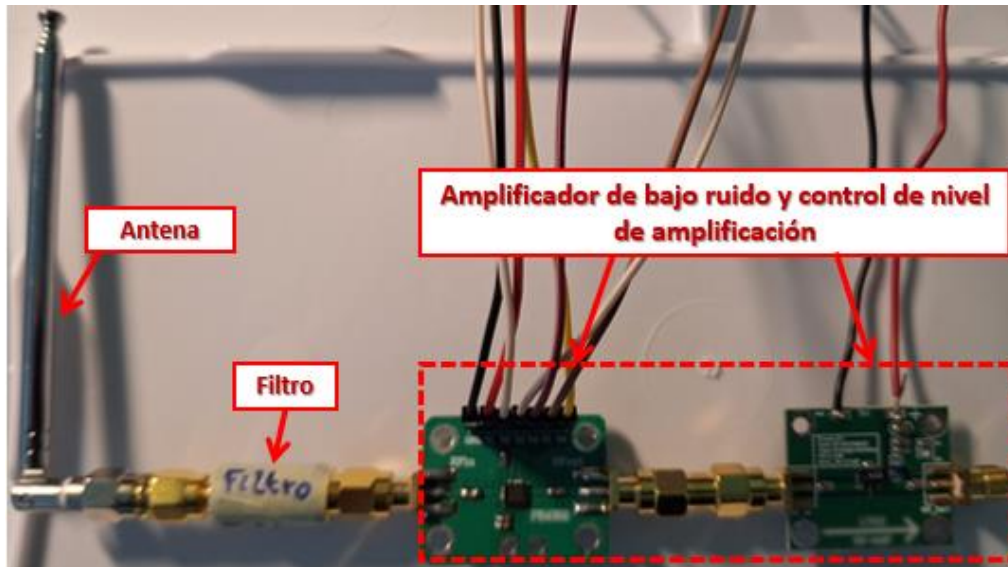


Figura 3.2 – Módulo de recepción seleccionado conectado a una antena externa.

Por lo anterior, la rutina de caracterización general adaptada al módulo de recepción genérico seleccionado, quedaría como la siguiente tabla:

Tabla 3.2 – Rutina de caracterización adaptada para el módulo de recepción genérico seleccionado.

Mediciones de caracterización	Frecuencia	Nivel de amplificación
Ganancia en frecuencia de banda	3700 MHz	Baja amplificación
Ganancia en reversa en frecuencia de banda	3700 MHz	
Ganancia para frecuencia fuera de banda	4700 MHz	
Pérdida de retorno en la entrada	3700 MHz	
Pérdida de retorno en la salida	3700 MHz	
Corriente de consumo	3700 MHz	
Punto de intercepción de tercer orden	3700 MHz/3701 MHz	
Figura de ruido	3700 MHz	
Ganancia en frecuencia de banda	3700 MHz	Mediana amplificación
Ganancia en reversa en frecuencia de banda	3700 MHz	
Ganancia para frecuencia fuera de banda	4700 MHz	
Pérdida de retorno en la entrada	3700 MHz	
Pérdida de retorno en la salida	3700 MHz	
Corriente de consumo	3700 MHz	
Punto de intercepción de tercer orden	3700 MHz/3701 MHz	
Figura de ruido	3700 MHz	
Ganancia en frecuencia de banda	3700 MHz	Alta amplificación
Ganancia en reversa en frecuencia de banda	3700 MHz	
Ganancia para frecuencia fuera de banda	4700 MHz	
Pérdida de retorno en la entrada	3700 MHz	
Pérdida de retorno en la salida	3700 MHz	
Corriente de consumo	3700 MHz	
Punto de intercepción de tercer orden	3700 MHz/3701 MHz	
Figura de ruido	3700 MHz	

3.3 Ejecución manual de rutina de caracterización con instrumentos de laboratorio

Para lograr la caracterización en laboratorio del módulo de recepción genérico seleccionado, se realizaron todas las mediciones de la rutina de caracterización utilizando los siguientes elementos:

- **Generadores de señales_1 y 2:** Estos servirán para aplicar señales de radiofrecuencia al módulo de recepción seleccionado a caracterizar. Estos instrumentos, pueden aplicar señales desde 24 MHz hasta 6000 MHz.
- **Fuente de voltaje de corriente directa y fuente digital:** Las fuentes servirán para energizar el módulo de recepción, así como para ajustar el nivel de amplificación de este.
- **Carga de 50 ohms:** Se utilizó una carga de 50 ohms para terminar los puertos del módulo de recepción con la impedancia característica estándar para las mediciones de pérdida de retorno y figura de ruido (proporcionar ruido térmico).
- **Analizador de espectro:** El analizador de espectro es el instrumento que se usará para medir las señales de alta frecuencia y descomponerlas en el dominio de la frecuencia, mostrando la contribución en potencia de cada componente de frecuencia. En donde, se utilizó el modelo de analizador de espectro TinySA Ultra. Este instrumento, soporta hasta 6 dBm de potencia de entrada, tiene un detector de potencia con una resolución de 0.5 dB, una precisión de potencia absoluta de $\pm 2dB$, puede medir señales tan bajas como -102 dBm sin amplificación interna, tiene un rango dinámico de alrededor de 90+ dB, cuenta con resoluciones de ancho de banda seleccionables desde 200 Hz hasta 850kHz y puede medir el espectro de frecuencia entre 100kHz hasta 6000MHz.
- **Atenuador fijo:** Se utilizó un atenuador fijo de -30dB para atenuar la señal amplificada por el módulo de recepción para evitar sobrepasar los límites del analizador de espectro.
- **Acoplador direccional:** Se utilizó un acoplador direccional genérico, para medir las señales reflejadas en las mediciones de pérdidas de retorno.
- **Amplificador de bajo ruido externo:** Este tipo de amplificador se utilizó para amplificar la señal de ruido proveniente del módulo de recepción con el fin de elevarla a un nivel que sea fácilmente captada por el analizador de espectro, su ganancia es de alrededor de 18 dB para las frecuencias utilizadas en la caracterización.
- **Combinador:** Se hizo uso de un combinador de potencia genérico para sumar las señales de ambos generadores de señales para la medición del punto de intercepción de tercer orden.
- **Amperímetro:** Se utilizó un amperímetro para medir la corriente que consumía el módulo de recepción.

Ahora bien, contemplando los elementos mencionados, se realizaron las mediciones de la rutina de caracterización una por una. Para la medición de ganancia para una frecuencia dentro de la banda (junto con la corriente de consumo), para una frecuencia fuera de la banda, así como para la de ganancia en reversa, se siguió el procedimiento y tiempos aproximados para hacer las etapas calibración del circuito y caracterización del módulo de recepción como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 3.3 – Tabla con pasos y tiempos aproximados para realizar medición de ganancia ya sea en frecuencia dentro de la banda, fuera de la banda o en reversa.

Número de paso	Pasos para realizar la medición de cada tipo de ganancia y corriente de consumo en niveles de amplificación bajo, medio y alto del módulo de recepción	Etapa de preparación	Tiempo aproximado (segundos)
1	Conectar generador de señales con cable coaxial a atenuador fijo y analizador de espectro.	Calibración	30
2	Configurar en analizador de espectro el rango de frecuencia a medir, nivel máximo de referencia y resolución de ancho de banda.	Calibración	20
3	Encender generador de señales y aplicar señal de 0.01mW con frecuencia de 3700 MHz (o, 4700 MHz para ganancia fuera de banda).	Calibración	20
4	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal con la frecuencia deseada.	Calibración	20
5	Realizar manualmente el cálculo de las pérdidas en el cable coaxial y atenuador fijo.	Calibración	120
6	Apagar generador de señales y agregar módulo de recepción a circuito.	Calibración	10
7	Conectar módulo de recepción a fuente de corriente directa y fuente digital para energizarlo y ajustar nivel de amplificación a bajo. Agregar amperímetro en la conexión con la fuente de voltaje.	Caracterización	40
8	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal de salida del módulo de recepción en nivel bajo y su corriente de consumo (solo en ganancia para frecuencia dentro de la banda).	Caracterización	20
9	Realizar manualmente el cálculo de la ganancia respectiva para el nivel de amplificación bajo, considerando las pérdidas en el cable coaxial y atenuador fijo.	Caracterización	120
10	Configurar módulo de recepción en nivel de amplificación medio.	Caracterización	10
11	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal de salida del módulo de recepción en nivel medio y su corriente de consumo (solo en ganancia para frecuencia dentro de la banda).	Caracterización	20
12	Repetir cálculo de la ganancia respectiva pero ahora para nivel de amplificación medio.	Caracterización	40
13	Configurar módulo de recepción en nivel de amplificación alto.	Caracterización	10
14	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal de salida del módulo de recepción en nivel alto y su corriente de consumo (solo en ganancia para frecuencia dentro de la banda).	Caracterización	20
15	Repetir cálculo de la ganancia respectiva pero ahora para nivel de amplificación alto.	Caracterización	40
Tiempo total por medición individual de ganancia:			540

De este modo, la medición de ganancia para una frecuencia dentro de la banda para los tres niveles de amplificación del módulo de recepción requirió de ejecutar 15 pasos manuales y de 540 segundos (9 minutos) de tiempo del usuario, en donde, la corriente de consumo también se mide en paralelo en este caso. Para la medición de la ganancia para la frecuencia fuera de la banda tomó aproximadamente el mismo procedimiento y similarmente para la ganancia en reversa con la única diferencia que el módulo de recepción se conecta en otra orientación, sin embargo, para todas estas, fue necesario el ejecutar los pasos mostrados en la tabla anterior. A continuación, se muestra una imagen de la preparación realizada para medir estas ganancias utilizando la instrumentación manual de laboratorio:

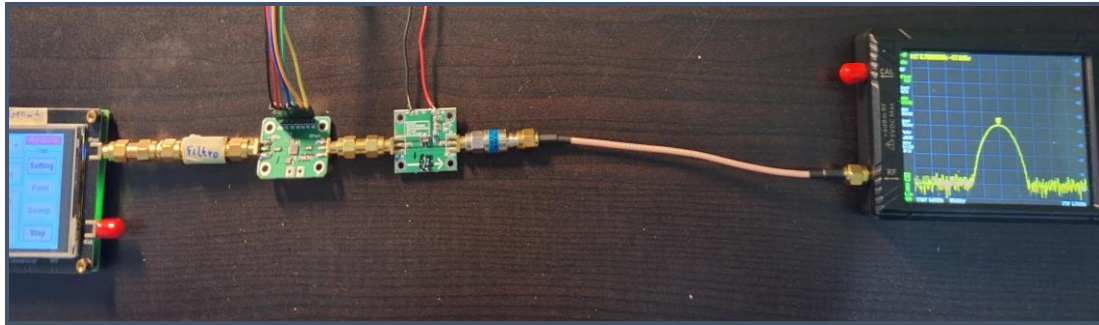


Figura 3.3 – Medición de ganancia del módulo de recepción con instrumentos manuales de laboratorio.

Por otro lado, para las mediciones de pérdida de retorno en la entrada y salida del módulo a caracterizar, se siguió el procedimiento mostrado en la tabla siguiente:

Tabla 3.4 – Tabla con pasos y tiempos aproximados para realizar medición de pérdidas de retorno.

Número de paso	Pasos para realizar la medición de pérdida de retorno en la entrada y en la salida del módulo de recepción para los niveles de amplificación bajo, medio y alto	Etapa de preparación	Tiempo aproximado (segundos)
1	Conectar generador de señales con entrada de acoplador direccional y el puerto de salida de este a circuito abierto.	Calibración	30
2	Agregar cable coaxial en puerto secundario de retorno y conectar analizador de espectro.	Calibración	15
3	Configurar en analizador de espectro el rango de frecuencia a medir, nivel máximo de referencia y resolución de ancho de banda.	Calibración	20
4	Encender generador de señales y configurar para aplicar señal de 0.01mW con frecuencia de 3700 MHz.	Calibración	20
5	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal reflejada en la frecuencia deseada.	Calibración	20
6	Realizar manualmente el cálculo de las pérdidas en el cable coaxial, pérdida del acoplador direccional en su puerto principal y calcular su factor de acoplamiento.	Calibración	130
7	Apagar generador de señales, agregar módulo de recepción a circuito en la salida del acoplador direccional, conectar carga de 50 ohms en el puerto libre del módulo a caracterizar.	Calibración	20
8	Conectar módulo de recepción a fuente de corriente directa y fuente digital para energizarlo y ajustar amplificación a nivel bajo.	Caracterización	40
9	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal reflejada con la frecuencia deseada para el módulo en nivel bajo de amplificación.	Caracterización	20
10	Realizar manualmente el cálculo de la pérdida de retorno respectiva para el nivel bajo de amplificación, considerando las pérdidas en el cable coaxial, del puerto principal del acoplador direccional y su factor de acoplamiento.	Caracterización	130
11	Configurar módulo de recepción en nivel de amplificación medio.	Caracterización	10
12	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal reflejada con la frecuencia deseada para el módulo en nivel medio de amplificación.	Caracterización	20
13	Repetir cálculo de la pérdida de retorno respectiva pero ahora para nivel de amplificación medio.	Caracterización	40
14	Configurar módulo de recepción en nivel de amplificación alto.	Caracterización	10

15	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal reflejada con la frecuencia deseada para el módulo en nivel alto de amplificación.	Caracterización	20
16	Repetir cálculo de la pérdida de retorno respectiva pero ahora para nivel de amplificación alto.	Caracterización	40
Tiempo total por medición individual de pérdida de retorno:			585

Considerando los pasos mostrados en la tabla, es notable que, las mediciones de la pérdida de retorno ya sea en la entrada o la salida del módulo de recepción para los tres niveles de amplificación en cada una, requieren de más tiempo que las de ganancia debido a que el acoplador direccional conlleva de más consideraciones que complican las conexiones y los cálculos. De este modo, para la medición de la pérdida de retorno en la entrada realizaremos 16 pasos que nos tomaran aproximadamente 585 segundos (9.75 minutos) y para otra medición, se requerirá de invertir el mismo esfuerzo y tiempo por parte del usuario. Dicho esto, las siguientes dos figuras muestran las conexiones realizadas para ejecutar la medición de la pérdida de retorno en la entrada y salida, respectivamente.

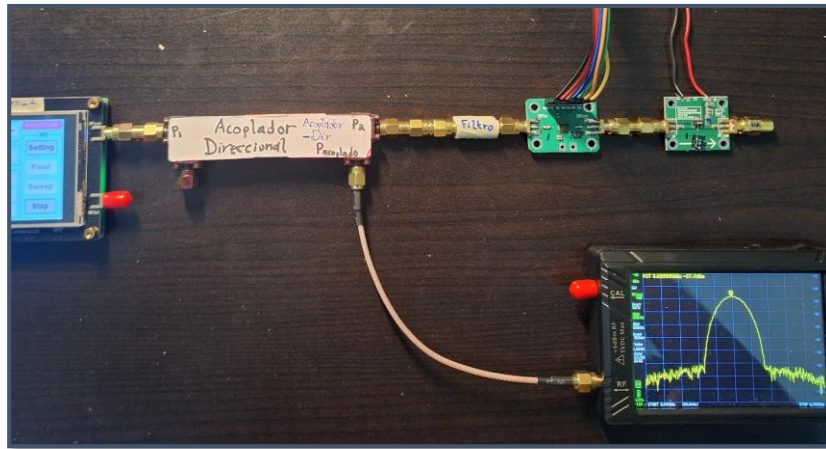


Figura 3.4 – Medición de la pérdida de retorno en entrada del módulo con instrumentos manuales de laboratorio.

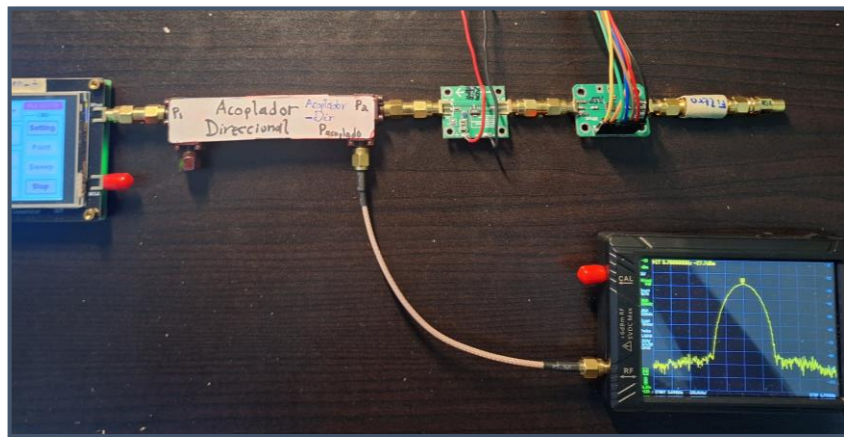


Figura 3.5 – Medición de la pérdida de retorno en salida del módulo con instrumentos manuales de laboratorio.

Para el caso de la medición del punto de intercepción de tercer orden, al requerirse de utilizar ambos generadores de señales, se siguió una metodología distinta a las anteriores, la cual, se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 3.5 – Tabla con pasos y tiempos aproximados para realizar medición del punto de intercepción de tercer orden.

Número de paso	Pasos para realizar la medición del punto de intercepción de tercer orden del módulo de recepción en sus niveles bajo, medio y alto de amplificación	Etapa de preparación	Tiempo aproximado (segundos)
1	Conectar generadores de señales 1 y 2 con combinador.	Calibración	15
2	Conectar salida de combinador con cable coaxial, atenuador fijo y analizador de espectro.	Calibración	20
3	Configurar en analizador de espectro el rango de frecuencia a medir, nivel máximo de referencia y resolución de ancho de banda.	Calibración	20
4	Encender generador de señales 1 y configurar para aplicar señal de 0.01mW con la frecuencia del primer tono en 3700 MHz.	Calibración	15
5	Encender generador de señales 2 y configurar para aplicar señal de 0.01mW con la frecuencia del segundo tono en 3701 MHz.	Calibración	15
6	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal con los dos tonos deseados y los productos de intermodulación incluidos por el propio analizador de espectro en un rango de 3697-3704 MHz.	Calibración	25
7	Realizar manualmente el cálculo de las pérdidas en el cable coaxial y atenuador fijo contemplando ambos tonos y productos de intermodulación.	Calibración	140
8	Apagar ambos generadores de señales y agregar módulo de recepción a circuito.	Calibración	15
9	Conectar módulo de recepción a fuente de corriente directa y fuente digital para energizarlo y ajustar nivel de amplificación a bajo.	Caracterización	40
10	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal con los dos tonos y los productos de intermodulación producidos por el módulo en nivel de amplificación bajo en un rango de 3697-3704 MHz.	Caracterización	30
11	Identificar producto de intermodulación con mayor potencia y realizar manualmente el cálculo del punto de intercepción de tercer orden para el nivel bajo de amplificación, considerando las pérdidas en el cable coaxial y atenuador fijo.	Caracterización	140
12	Configurar módulo de recepción en nivel de amplificación medio.	Caracterización	10
13	Medir de nuevo con analizador de espectro para el nivel de amplificación medio.	Caracterización	20
14	Repetir cálculo del punto de intercepción de tercer orden, pero ahora para nivel de amplificación medio.	Caracterización	40
15	Configurar módulo de recepción para el nivel de amplificación alto.	Caracterización	10
16	Medir de nuevo con analizador de espectro para el nivel de amplificación alto.	Caracterización	20
17	Repetir cálculo del punto de intercepción de tercer orden, pero ahora para nivel de amplificación alto.	Caracterización	40
Tiempo total por medición individual del punto de intercepción de tercer orden:			615

Como se observa en la tabla, solamente la medición del punto de intercepción de tercer orden para los niveles bajo, medio y alto de amplificación del módulo nos tomara 615 segundos (10.25

minutos) y 17 pasos para su elaboración, en donde, lo que toma más tiempo es el análisis y cálculos que debe de realizar el usuario al observar la distribución de potencia en el espectro en el dominio de la frecuencia para identificar los distintos tonos y productos de intermodulación. En la siguiente figura, se puede observar la configuración manual utilizada para realizar la medición del punto de intercepción de tercer orden:

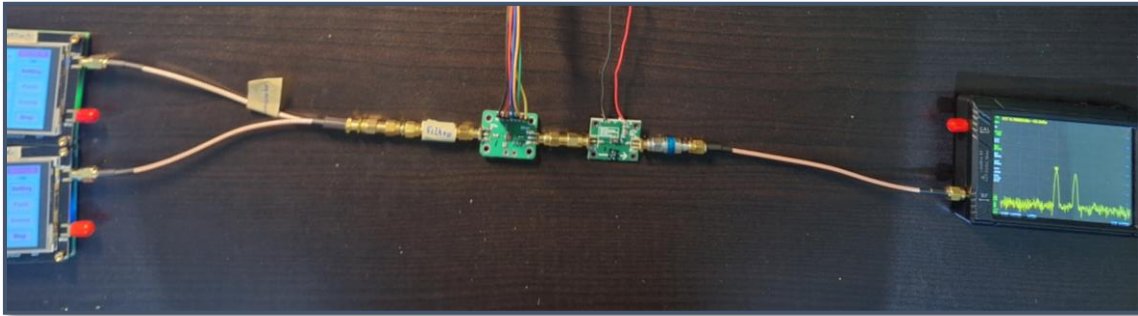


Figura 3.6 – Medición del punto de intercepción de tercer orden con instrumentos manuales de laboratorio.

Por último, para la medición de la figura de ruido, no se utilizará el generador de señales dado a que, la fuente de señal será el ruido térmico proveniente de una carga resistiva de 50 ohms, en donde, se agregará una etapa de amplificación extra al módulo de recepción para adecuar la señal para que pueda ser muestreada por el analizador de espectro. Los pasos para realizar dicha medición se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.6 – Tabla con pasos y tiempos aproximados para realizar medición de figura de ruido en el módulo de recepción.

Número de paso	Pasos para realizar la medición de la figura de ruido del módulo de recepción en sus niveles bajo, medio y alto de amplificación	Etapas de preparación	Tiempo aproximado (segundos)
1	Conectar generador de señales con cable coaxial y analizador de espectro.	Calibración	15
2	Configurar en analizador de espectro el rango de frecuencia a medir, nivel máximo de referencia y resolución de ancho de banda.	Calibración	20
3	Encender generador de señales y configurar para aplicar señal de 0.01mW con frecuencia de 3700 MHz.	Calibración	20
4	Medir con analizador de espectro la potencia de la señal en la frecuencia deseada.	Calibración	20
5	Realizar manualmente el cálculo de las pérdidas en el cable coaxial.	Calibración	30
6	Apagar generador de señales y conectar carga resistiva de 50 ohms en entrada de cable coaxial.	Calibración	15
7	Medir con analizador de espectro la distribución de la potencia del ruido térmico en el espectro de frecuencia para determinar el factor de ruido del circuito incluyendo el analizador de espectro.	Calibración	160
8	Agregar módulo de recepción al circuito, conectando la carga de 50 ohms en su entrada y el cable coaxial con el analizador de espectro en su salida.	Caracterización	20
9	Conectar módulo de recepción a fuente de corriente directa y fuente digital para energizarlo y ajustar nivel de amplificación a bajo.	Caracterización	40
10	Medir con analizador de espectro la distribución de la potencia del ruido amplificado en el espectro de frecuencia para determinar el factor	Caracterización	160

	de ruido del circuito anterior incluyendo ahora el módulo de recepción en nivel bajo de amplificación, considerando la ganancia previamente medida del módulo.		
11	Utilizar ecuación de Friis para obtener el factor de ruido individual del módulo en nivel bajo de amplificación a partir del factor total del sistema y convertir a figura de ruido en decibeles.	Caracterización	130
12	Configurar módulo de recepción en nivel de amplificación medio.	Caracterización	10
13	Medir de nuevo con analizador de espectro para el nivel de amplificación medio.	Caracterización	20
14	Repetir cálculos requeridos para la figura de ruido, pero ahora para nivel de amplificación medio.	Caracterización	60
15	Configurar módulo de recepción en nivel de amplificación alto.	Caracterización	10
16	Medir de nuevo con analizador de espectro para el nivel de amplificación alto.	Caracterización	20
17	Repetir cálculos requeridos para la figura de ruido, pero ahora para nivel de amplificación alto.	Caracterización	60
Tiempo total por medición individual de figura de ruido:			810

Considerando los pasos de la tabla para la figura de ruido medida en los tres niveles de amplificación del módulo de recepción, puede notarse que, es una medición relativamente laboriosa dado a que necesita 17 pasos y consume un tiempo de 810 segundos (13.5 minutos) por parte del usuario. También, la medición de la figura de ruido requiere de haber medido previamente la ganancia del módulo de recepción para determinar la amplificación del ruido térmico por parte del dispositivo, de forma que, después de obtener el factor de ruido total del circuito de medición, se tiene que realizar un procedimiento de cálculo manual por medio de la ecuación de Friis para obtener el factor de ruido individual del módulo y después su respectiva conversión a figura de ruido. Las conexiones para realizar la medición de la figura de ruido con la instrumentación manual de laboratorio se muestran en la siguiente figura:

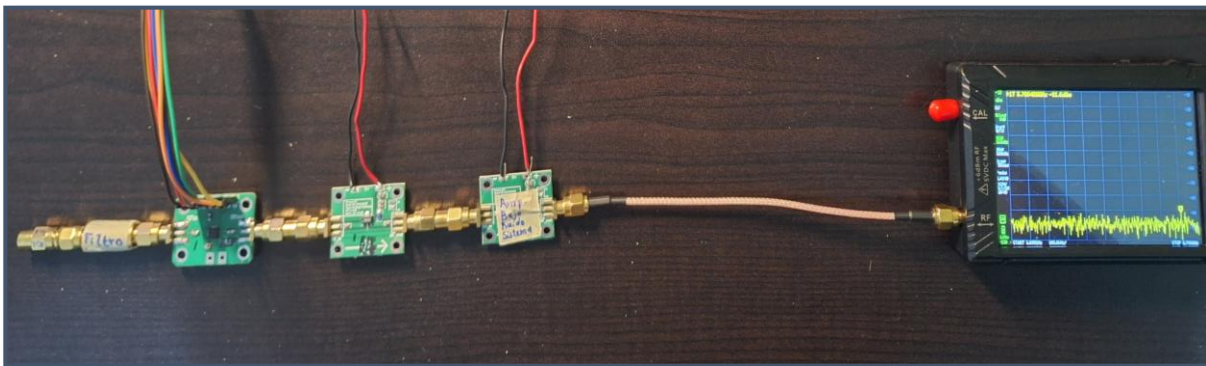


Figura 3.7 – Medición de figura de ruido con instrumentos manuales de laboratorio.

Ahora que se han explicado los pasos para cada medición individual de la rutina de caracterización contemplado los niveles bajo, medio y alto de amplificación del módulo de recepción seleccionado, se realizó una tabla en donde se detalla la cantidad total de pasos y el tiempo requerido por parte del usuario para hacer todas las mediciones manualmente. En donde, como

puede notarse en la tabla siguiente, se necesitan 111 pasos manuales y 4215 segundos (equivalente a 70.25 minutos) para poder realizar la rutina de caracterización completa de manera manual, lo cual, es muy cansado y laborioso para el investigador que requiere caracterizar un dispositivo de este tipo, siendo necesario de un sistema de caracterización secuencial que reduzca la cantidad de pasos y tiempo que necesiten ser invertidos en el proceso de medición.

Tabla 3.7 – Tabla con la cantidad de pasos y tiempo total para realizar manualmente la rutina de caracterización.

Mediciones de rutina de caracterización	Pasos totales por medición	Tiempo (segundos)	Nivel de amplificación medidos
Ganancia en frecuencia de banda	15	540	Bajo, medio y alto
Ganancia en reversa en frecuencia de banda	15	540	
Ganancia para frecuencia fuera de banda	15	540	
Pérdida de retorno en la entrada	16	585	
Pérdida de retorno en la salida	16	585	
Corriente de consumo	N/A	N/A	
Punto de intercepción de tercer orden	17	615	
Figura de ruido	17	810	
Pasos y tiempo totales de la rutina de caracterización:	111	4215	

3.4 Diseño y construcción de sistema de caracterización secuencial utilizado

Con la información mostrada, en conjunto con las configuraciones estudiadas en la literatura para la medición de la ganancia, pérdidas de retorno tanto en la entrada como en la salida del dispositivo a caracterizar, la ganancia para una frecuencia fuera de la banda, ganancia en reversa, punto de intercepción de tercer orden y figura de ruido [1, 16-20, 23, 27, 28], fue posible adaptar los diferentes circuitos independientes en un solo circuito de caracterización, de tal manera que, en conjunto con los instrumentos de medición y la computadora, se obtuvo un único diseño de sistema de caracterización secuencial capaz de realizar las mediciones mencionadas, sin tener que requerir de circuitos adicionales para caracterizar el módulo de recepción genérico que opera en el rango de frecuencia de 3400-4000 MHz.

Es importante mencionar que, el sistema de caracterización secuencial está compuesto por los mismos instrumentos individuales o manuales que se utilizaron en laboratorio, sin embargo, estos ahora están interconectados entre sí a un circuito de caracterización y a una computadora que se encarga de controlarlos por software. La función principal del circuito de caracterización

conectado entre los instrumentos manuales es adaptar la configuración física del circuito general del sistema para poder realizar las distintas mediciones requeridas por la rutina de caracterización. Tanto el circuito de caracterización como los instrumentos son controlados por la computadora para que puedan trabajar en sincronía, evitando la necesidad del usuario de intervenir para reemplazar componentes eléctricos manualmente cuando se requiera ejecutar alguna otra medición de la rutina de caracterización. Durante el diseño, para los componentes e instrumentación utilizada en este circuito, se designó una etiqueta virtual para cada uno, la cual, sería utilizada en la programación del equipo de caracterización secuencial mediante el uso del software de computadora encargado de enviar los comandos pertinentes.

De esta manera, aparte de elementos para hacer conexiones como cables coaxiales, conectores, cables y un protoboard, los instrumentos, dispositivos electrónicos y etiquetas virtuales designadas para el sistema de caracterización secuencial diseñado fueron las siguientes:

- **Gen_1/Gen_2:** Generadores de señales 1 y 2 genéricos, respectivamente, ambos con rango de operación dentro de 3400-4000 MHz.
- **Fuente_CD:** Fuente de corriente directa programable, con circuito de amperímetro incluido. Se utilizó Arduino Uno como fuente de voltaje de corriente directa.
- **Fuente_Dig:** Fuente de corriente directa para señales digitales de control. Se utilizó Arduino Uno como fuente digital.
- **S_1/S_2/S_3/S_4/S_5/S_6:** Switches genéricos para señales de alta frecuencia, su posición es controlada mediante la fuente de señales digitales.
- **Carga1_50/Carga2_50:** Cargas características resistivas genéricas de 50 ohms.
- **Sistema:** Es la computadora en donde se realiza la programación, se corre el software y se mandan a ejecutar las instrucciones de los instrumentos.
- **Analizador_Espectro:** Analizador de espectro utilizado para medir la potencia de las señales en el dominio de la frecuencia, en nuestro caso, se usó el mismo modelo TinySA Ultra al igual que en las mediciones manuales de laboratorio.
- **Atenuador_Var:** Atenuador variable genérico, utilizado para disminuir la potencia en el circuito.
- **Acoplador_Dir:** Acoplador direccional genérico, se utiliza para capturar una señal de alta frecuencia que circula en cierta dirección dentro del circuito.
- **Amp_Bajo_Ruido:** Amplificador de bajo ruido genérico, utilizado para amplificar la potencia de las señales débiles que salen del módulo de recepción en el circuito, con el fin de que pueda ser correctamente captada por el analizador de espectro.
- **Combinador:** Combinador genérico utilizado para sumar las señales provenientes de los dos generadores de señales.

A continuación, en la siguiente figura, se muestra el diagrama del sistema de caracterización secuencial diseñado para ejecutar la rutina de caracterización elaborada:

Sistema de caracterización para módulos de recepción genéricos

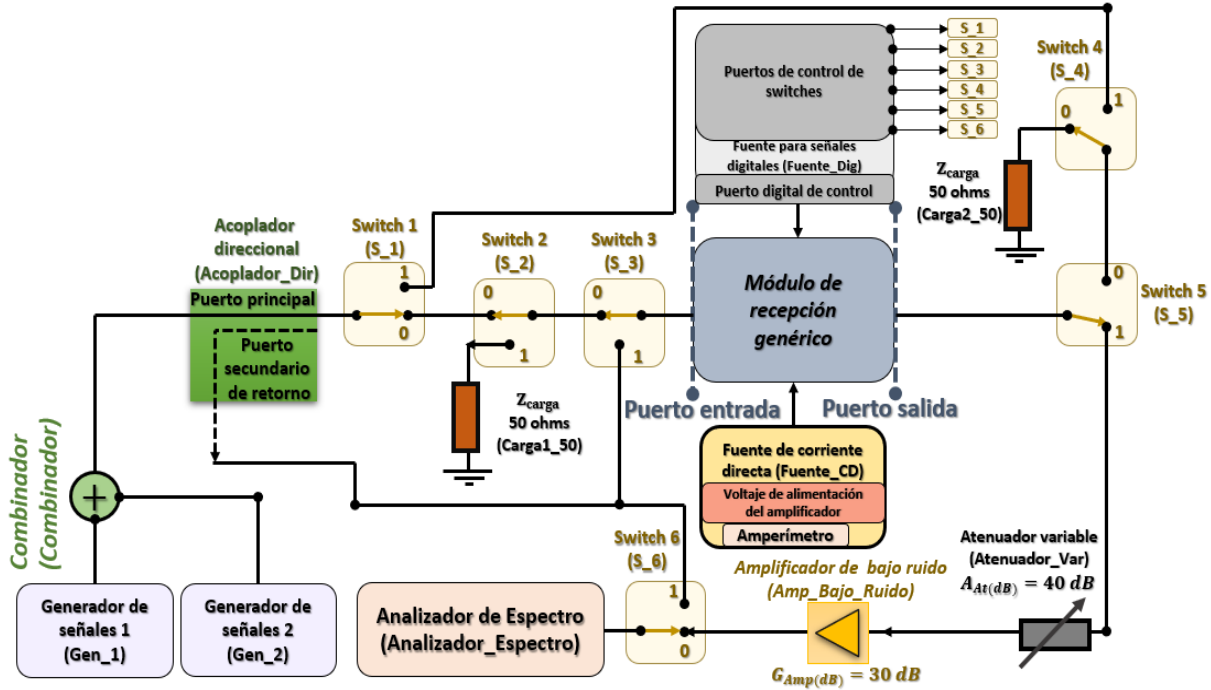


Figura 3.8 – Sistema de caracterización secuencial diseñado para módulos de recepción genéricos.

Ahora bien, como se muestra en el diagrama del sistema, en base al ajuste en la posición de los switches, será posible guiar la señal aplicada por los generadores de señales de modo que esta, llegue al módulo de recepción genérico a caracterizar en sus respectivos puertos, mientras que, la señal de salida o respuesta del módulo es guiada por el respectivo camino en función del tipo de medición para ser captada por el analizador de espectro. En la siguiente tabla, se muestra la configuración de los switches para ejecutar cada una de las mediciones:

Tabla 3.8 – Tabla con configuración de switches para las distintas mediciones de la rutina de caracterización.

Configuración	Switch 1	Switch 2	Switch 3	Switch 4	Switch 5	Switch 6
Ganancia/Corriente de consumo	0	0	0	0	1	0
Pérdida de retorno en entrada	0	0	0	0	0	1
Pérdida de retorno en salida	1	1	0	1	0	1
Ganancia para frecuencia fuera de banda	0	0	0	0	1	0
Punto de intercepción de tercer orden	0	0	0	0	1	0
Ganancia en reversa	1	0	1	1	0	1
Figura de ruido	0	1	0	0	1	0

Con respecto al ensamble del sistema, el esquemático mostrado del diseño del sistema de caracterización y la lista de elementos mencionados anteriormente, se utilizaron como base para la construcción y armado de los circuitos de caracterización e interconexiones con los instrumentos de medición y fuentes. En la siguiente figura, se muestra una foto de los circuitos y los elementos

electrónicos utilizados en el sistema construido, en donde, se identifica con una etiqueta a cada uno de los componentes:

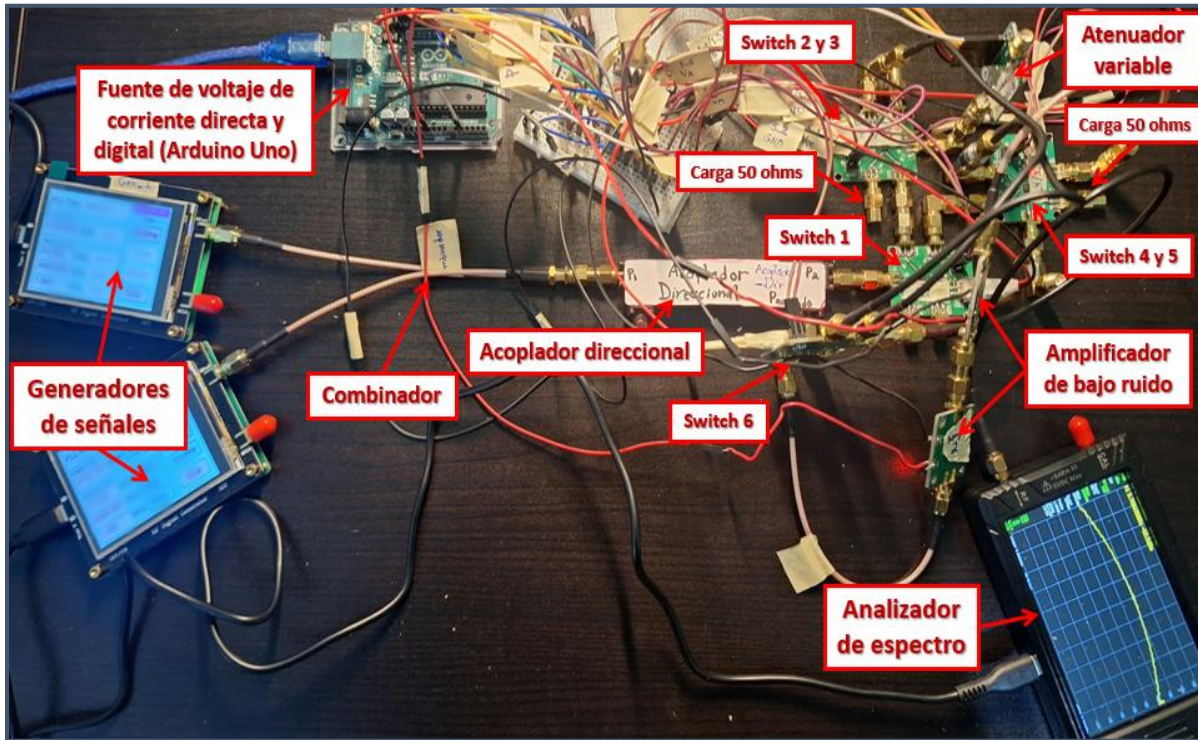


Figura 3.9 – Circuitos de caracterización e instrumentos del sistema construido.

Dado a que, el circuito de caracterización y los instrumentos utilizados en el sistema mostrado estaban muy expuestos al movimiento y al ambiente, se decidió tomar medidas con el fin de protegerlos en un gabinete de acrílico con unas dimensiones de 36cm x 28 cm x 15.5 cm. Este gabinete, se preparó para que, en su interior, contuviera el circuito de caracterización incluyendo los switches, combinador, distintos cables coaxiales, acoplador direccional, el Arduino Uno y el protoboard utilizado para las conexiones eléctricas, en donde, la superficie del contenedor fue acondicionada agregando esquineras y aditamentos para colocar fijamente los instrumentos como los dos generadores de señales y el analizador de espectro. También, la superficie del gabinete fue perforada a la medida de los conectores para que los cables coaxiales del circuito de caracterización se conectaran con los instrumentos colocados en la superficie, esto mismo, se aplicó con las conexiones tanto de radiofrecuencia como de corriente directa y digitales del módulo de recepción a caracterizar.

Por último, para proteger a los circuitos del ruido electromagnético y señales externas indeseadas en el rango de frecuencias de comunicaciones móviles, Wi-Fi, Bluetooth, etc., se colocó una tela de blindaje comercial y cinta adhesiva con recubrimiento de cobre, reduciendo alrededor de 40 dB estas señales externas en el sistema de caracterización. A continuación, en la siguiente figura, se muestran dos fotos de la vista lateral y superior del sistema de caracterización construido:

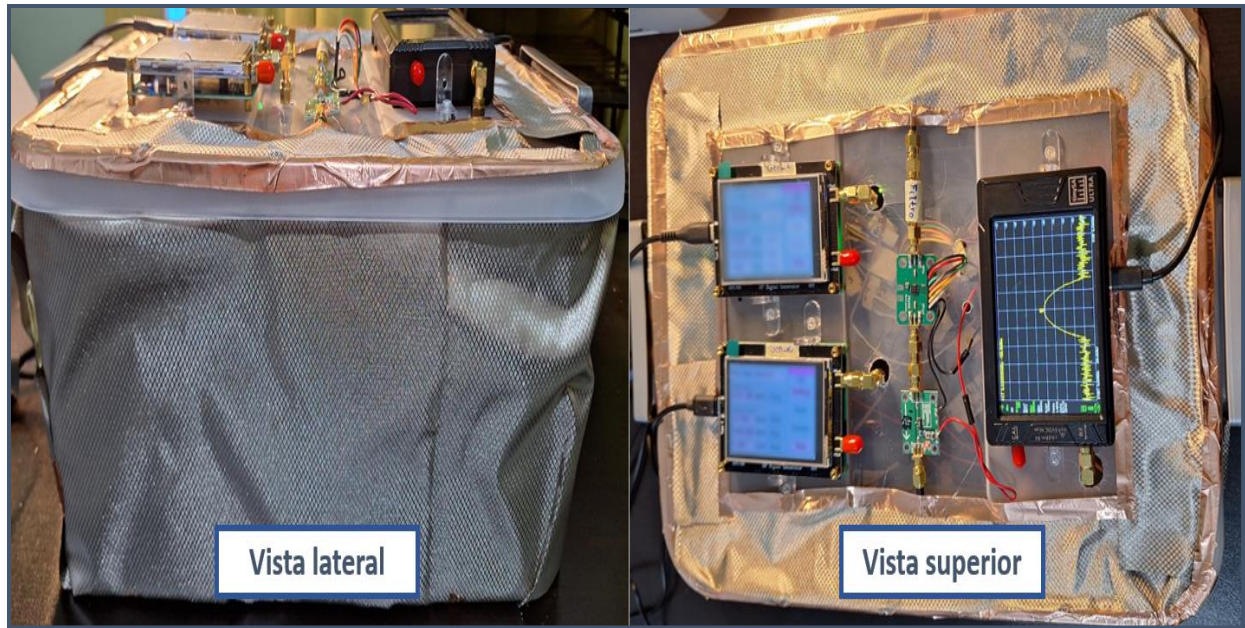


Figura 3.10 – Vista lateral y superior del sistema de caracterización construido.

3.5 Software de interfaz gráfica y control de sistema de caracterización secuencial

Con respecto al software y la interfaz gráfica en la computadora para controlar el sistema de caracterización secuencial, se utilizó el lenguaje de programación Python para la elaboración de todo el programa. En donde, se hace uso de la librería “tkinter” para realizar el desarrollo de toda la interfaz gráfica, los botones y el accionamiento de las diversas funciones, desde correr la rutina de caracterización, la rutina de calibración o bien, cada medición individualmente ajustando el rango de frecuencia deseado a medir y el nivel de amplificación del módulo de recepción que está bajo caracterización. También, se utilizaron librerías como “math” para realizar los cálculos matemáticos requeridos en las diversas conversiones entre cantidades lineales y logarítmicas, la librería “datetime” para obtener la fecha y hora en que se ejecuta la rutina de caracterización, la librería “pandas” y “pandastable” para la manipulación de datos, realizar gráficas, leer o escribir archivos en formato de tabla Excel y generar arreglos de datos para ser mostrados en la interfaz gráfica del usuario.

Por otro lado, para manipular la fuente de voltaje de corriente directa y la fuente digital, en donde, ambas estaban conformadas por Arduino Uno, se utilizó la librería de “pyfirmata” con el fin de utilizar el protocolo de comunicación “Universal Serial Bus” o, simplemente “USB” (por sus siglas en inglés) para manipular y programar los voltajes analógicos o digitales en el Arduino Uno. De este modo, Arduino Uno se encargaba de aplicar los voltajes analógicos requeridos en los distintos elementos del sistema, mientras que, utilizaba voltajes digitales de alto o bajo (1 o 0, respectivamente) para manipular las posiciones de los switches de acuerdo con la medición de caracterización que se debía realizar en cada momento. Aunado a esto, pyfirmata también nos

ayudó a tomar lecturas de voltajes e indirectamente la corriente, para hacer que Arduino Uno funcionara como amperímetro para la medición de corriente de consumo del módulo de recepción.

Por último, para el control del analizador de espectro TinySA Ultra por medio del protocolo de comunicación USB, se utilizaron las librerías “tinySA” y “os” para enviar comandos al instrumento de medición, así como, guardar archivos de datos de las capturas en el espectro y configurar los rangos, niveles y resolución de las mediciones en el espectro de frecuencia, todo esto, operando en conjunto con la interfaz gráfica del sistema de caracterización sin manipular físicamente las opciones del analizador de espectro. De este modo, todas las librerías mencionadas operando en conjunto en un solo programa en Python, fueron capaces de controlar el sistema, sus instrumentos y el circuito de caracterización para ejecutar la rutina de calibración o de caracterización según desee el usuario, en donde, una vez realizadas las mediciones, se muestra el reporte al usuario en la interfaz gráfica. A continuación, en la siguiente figura se observa una captura de la interfaz gráfica mostrando los resultados de la rutina de caracterización ejecutada para un módulo de recepción:



Figura 3.11 – Interfaz gráfica del sistema de caracterización secuencial.

3.6 Resultados de comparación entre ejecución de rutina de caracterización utilizando sistema diseñado y manualmente

Ahora que, se ha descrito el diseño del sistema de caracterización secuencial, sus elementos que lo conforman y la interfaz gráfica, por medio del programa en Python, se tomaron los tiempos y pasos que se requerían para correr primeramente la rutina de calibración y después la rutina de caracterización con el fin de hacer una comparativa entre la simplificación del proceso de caracterización al usar el sistema en comparación de cuando esta es realizada con instrumentación manual de laboratorio. A continuación, se muestra la tabla describiendo los pasos manuales y los tiempos necesarios cuando se utiliza el sistema de caracterización:

Tabla 3.9 – Tabla con pasos manuales y tiempos aproximados para realizar la rutina de calibración y luego de caracterización con el sistema de caracterización secuencial.

Pasos	Pasos para realizar la rutina de calibración y de caracterización con sistema de caracterización secuencial	Etapa de preparación	Tiempo (segundos)
1	Instrucción 1: Encender generador de señales y aplicar señal de frecuencia 3700 MHz, configurar analizador de espectro con resolución de ancho de banda de 100kHz y máximo nivel de referencia en -10 dBm. Dejar carga de circuito abierto.	Calibración	30.6
N/A	Ejecución de medición 1 de calibración automáticamente por sistema.	Calibración	15.8
2	Instrucción 2: Dejar carga de circuito abierto en sistema.	Calibración	5.1
N/A	Ejecución de medición 2 de calibración automáticamente por sistema.	Calibración	15.7
3	Instrucción 3: Dejar carga de circuito abierto en sistema.	Calibración	5.0
N/A	Ejecución de medición 3 de calibración automáticamente por sistema.	Calibración	15.8
4	Instrucción 4: Conectar carga de red de referencia.	Calibración	20
N/A	Ejecución de medición 4 de calibración automáticamente por sistema.	Calibración	16
5	Instrucción 5: Dejar carga de red de referencia conectada.	Calibración	5.4
N/A	Ejecución de medición 5 de calibración automáticamente por sistema.	Calibración	15.9
6	Instrucción 6: Dejar carga de red de referencia conectada.	Calibración	5.2
N/A	Ejecución de medición 6 de calibración automáticamente por sistema.	Calibración	15.7
7	Instrucción 7: Dejar carga de red de referencia conectada.	Calibración	5.0
N/A	Ejecución de medición 7 de calibración automáticamente por sistema.	Calibración	16
8	Instrucción 8: Dejar carga de red de referencia conectada.	Calibración	5.2
N/A	Ejecución de medición 8 de calibración automáticamente por sistema.	Calibración	16.1
9	Instrucción 9: Dejar carga de red de referencia conectada y apagar generador.	Calibración	15
N/A	Ejecución de medición de ruido térmico del sistema para calibración.	Calibración	15.9
10	Instrucción 10: Conectar módulo de recepción a sistema de caracterización y encender generador de señales 1 en frecuencia de 3700 MHz.	Caracterización	20.0
N/A	Ejecución de la medición de la ganancia para frecuencia dentro de la banda y corriente de consumo para los niveles alto, medio y bajo de amplificación del módulo.	Caracterización	44.5
N/A	Ejecución de la medición de la pérdida de retorno en la entrada para los niveles alto, medio y bajo de amplificación del módulo.	Caracterización	65.1
N/A	Ejecución de la medición de la pérdida de retorno en la salida para los niveles alto, medio y bajo de amplificación del módulo.	Caracterización	65.6
N/A	Ejecución de la medición de la ganancia en reversa para los niveles alto, medio y bajo de amplificación del módulo.	Caracterización	32.4
11	Instrucción 11: Encender generador de señales 2 en frecuencia de 3702 MHz.	Caracterización	20.3
N/A	Ejecución de la medición del punto de intercepción de tercer orden para los niveles alto, medio y bajo de amplificación del módulo.	Caracterización	45.1

12	Instrucción 12: Apagar generador de señales 2 y cambiar frecuencia de generador de señales 1 a 4700 MHz.	Caracterización	25
N/A	Ejecución de la medición de la ganancia para frecuencia fuera de la banda para los niveles alto, medio y bajo de amplificación del módulo.	Caracterización	32.5
13	Instrucción 13: Apagar generador de señales 1.	Caracterización	15
N/A	Ejecución de la medición de la figura de ruido para los niveles alto, medio y bajo de amplificación del módulo.	Caracterización	88.7
13	Cantidad total de pasos manuales (instrucciones) y tiempo total		693.6

A partir de la tabla anterior que muestra los pasos y tiempos totales del sistema de caracterización secuencial, podemos notar que, el tiempo incluyendo la calibración del sistema y la caracterización del módulo de recepción nos toma un total de 693.6 segundos (11.56 minutos), en donde, solo se realizan 13 pasos manuales en total, siendo 9 para la calibración y 4 para la caracterización. De modo que, si lo comparamos contra los 4215 segundos (70.25 minutos) y 111 pasos manuales que requiere el método manual utilizando equipo de laboratorio, encontraremos que el sistema de caracterización nos brinda una gran ventaja. En donde, el tiempo total de calibración y caracterización con el sistema solo representa un 16.45% del tiempo necesario para realizarlo de manera manual y, al mismo tiempo, la cantidad de pasos requeridos son solo el 11.71%, reduciendo enormemente el tiempo y esfuerzo que el investigador tiene que invertir en la etapa de caracterización de un módulo de recepción como el que seleccionamos para esta investigación, evidenciando así, que el sistema diseñado simplifica en gran medida la caracterización en comparación con el método tradicional manual.

4 Capítulo 4: Implementación y resultados de las mediciones en el sistema de caracterización

Ahora que se mostró el diseño de la rutina de caracterización, el módulo de recepción genérico seleccionado y, el sistema de caracterización secuencial diseñado, se explicaran los medios para implementar y ejecutar las mediciones de la rutina de caracterización en el sistema diseñado, así como los resultados obtenidos de estas.

4.1 Implementación y resultados de mediciones de ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno

Para ejecutar las mediciones de ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno en el dispositivo utilizando el sistema de caracterización, primeramente, se establecieron las condiciones de las pruebas de forma similar a las utilizadas en el método manual de laboratorio, definiendo así, la frecuencia de la señal, la potencia de entrada al dispositivo y el modo de operación en el que se está trabajando. En donde, tanto para las mediciones de ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno de entrada o salida, se aplicó al dispositivo una señal de 0.01mW de potencia con una frecuencia de 3700 MHz en cada uno de los niveles de amplificación del dispositivo. Dicho esto, las condiciones quedaron definidas como en la siguiente tabla:

Tabla 4.1 – Condiciones de ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno para sistema de caracterización.

Mediciones de caracterización	Potencia promedio de entrada aplicada	Frecuencia de operación	Nivel de amplificación
Ganancia para frecuencia dentro de banda	0.01mW	3700 MHz	Baja amplificación
Corriente de consumo	0.01mW	3700 MHz	
Pérdida de retorno en la entrada	0.01mW	3700 MHz	
Pérdida de retorno en la salida	0.01mW	3700 MHz	
Ganancia para frecuencia dentro de banda	0.01mW	3700 MHz	Mediana amplificación
Corriente de consumo	0.01mW	3700 MHz	
Pérdida de retorno en la entrada	0.01mW	3700 MHz	
Pérdida de retorno en la salida	0.01mW	3700 MHz	
Ganancia para frecuencia dentro de banda	0.01mW	3700 MHz	Alta amplificación
Corriente de consumo	0.01mW	3700 MHz	
Pérdida de retorno en la entrada	0.01mW	3700 MHz	
Pérdida de retorno en la salida	0.01mW	3700 MHz	

Es importante mencionar que, la potencia de entrada aplicada y la frecuencia mencionada están dentro de las especificaciones de operación del dispositivo, por lo que, no se considera que este pueda sufrir algún daño al utilizar estas opciones en la caracterización de las mediciones.

En donde, la ganancia y la atenuación se miden en decibeles (dB) mientras que, las potencias se medirán en decibeles con referencia a 1mW (dBm). Aunado a esto, cabe mencionar que, a parte de la medición de ganancia, esta configuración nos permitirá medir la corriente de consumo del dispositivo de recepción puesto a que, está operando bajo las mismas condiciones previamente utilizadas para la medición de esta. Es por esto por lo que, junto a la fuente de corriente directa, se agregó un circuito que opera como un amperímetro para obtener el dato de la corriente de consumo. A su vez, se puede observar que, la tabla de estados lógicos para realizar las mediciones en función de la posición de los switches es la siguiente:

Tabla 4.2 – Tabla de estados de los switches para realizar las mediciones de ganancia y pérdidas de retorno.

Configuración	Switch 1	Switch 2	Switch 3	Switch 4	Switch 5	Switch 6
Ganancia para frecuencia dentro de banda y corriente de consumo	0	0	0	0	1	0
Pérdida de retorno en la entrada	0	0	0	0	0	1
Pérdida de retorno en la salida	1	1	0	1	0	1

A partir de los recursos mencionados en el circuito y los nombres de etiqueta virtual para la programación, se diseñó el algoritmo para ejecutar la prueba de ganancia en frecuencia dentro de la banda de operación y la corriente de consumo en conjunto, mediante las siguientes instrucciones secuenciales proporcionados por el sistema o computadora:

1. Sistema – Verificar disponibilidad y conexión de los instrumentos.
2. Sistema – Activar fuente de corriente directa (Fuente_CD), fuente digital (Fuente_Dig), generador de señales 1 (Gen_1), atenuador variable (Atenuador_Var), acoplador direccional (Acoplador_Dir) y analizador de espectro (Analizador_Espectro).
3. S_1 – Colocar switch 1 en posición “0”.
4. S_2 – Colocar switch 2 en posición “0”.
5. S_3 – Colocar switch 3 en posición “0”.
6. S_4 – Colocar switch 4 en posición “0”.
7. S_5 – Colocar switch 5 en posición “1”.
8. S_6 – Colocar switch 5 en posición “0”.
9. Atenuador_Var – Programar atenuación en 40 decibeles “dB” para un nivel aceptable de protección del analizador de espectro.
10. Analizador_Espectro – Configurar rango de barrido de frecuencia con frecuencia central de 3700 MHz.
11. Analizador_Espectro – Configurar máximo nivel esperado de referencia de potencia a medir en -10 dBm y resolución de ancho de banda en 100kHz.

12. Fuente_CD – Configurar rango máximo de voltaje y corriente a aplicar al amplificador.
13. Fuente_CD – Aplicar voltaje de alimentación a amplificador.
14. Fuente_Dig – Aplicar señal de control para configurar y habilitar amplificador en el nivel de amplificación deseado.
15. Fuente_CD – Configurar rango de medición de corriente en miliamperios en circuito de amperímetro.
16. Fuente_CD – Habilitar circuito de amperímetro para medir corriente de consumo.
17. Gen_1 – Configurar frecuencia en 3700 MHz y aplicar 0.01mW de potencia de entrada.
18. Sistema – Instrucción de espera de 2 segundos para estabilización del módulo de recepción, fuentes e instrumentos de medición.
19. Fuente_CD – Ejecutar medición de corriente de consumo.
20. Analizador_Espectro – Ejecutar medición de potencia de salida en el rango de frecuencia configurado.
21. Analizador_Espectro – Enviar información a computadora en formato de tabla de datos.
22. Sistema – Leer valores enviados por analizador de espectro y obtener promedio de los valores de potencia medidos y restarles la pérdida intencional del atenuador programable.
23. Sistema – Realizar cálculo de ganancia en decibeles “dB”, almacenar valor para desplegar información del resultado en la interfaz gráfica y generar archivo de reporte en tabla de datos.

Las instrucciones secuenciales anteriores, fueron ejecutadas mediante la operación coordinada entre el sistema y el circuito mostrado; de esta manera, la potencia del generador de señales fue aplicada al puerto de entrada del módulo de recepción con el fin de llevar la potencia de salida amplificada por este, a través de la red que contiene al atenuador variable que nos proporcionaría el nivel adecuado para el muestreo por parte del analizador de espectro [18, 23]. En donde, lo anterior se aplicó para los niveles de amplificación baja, media y alta del módulo de recepción, obteniendo así, resultados de ganancia y corriente particulares para cada una de las condiciones. Similarmente, para el caso de la medición de la pérdida de retorno en la entrada, se optó por configurar el circuito para dicho propósito y a su vez, ejecutar otro conjunto de instrucciones secuenciales.

4.1.2 Medición de pérdida de retorno en la entrada con sistema de caracterización

A continuación, se muestra el diagrama del circuito utilizado para las mediciones de pérdida de retorno en la entrada:

retorno del acoplador direccional con el instrumento de medición de potencia (analizador de espectro).

De esta manera, será posible medir la potencia de la señal reflejada en la entrada del módulo de recepción al medir la señal que sale por el puerto secundario de retorno del acoplador direccional, de modo que, la pérdida de retorno en la entrada se puede calcular por la siguiente expresión:

$$\text{Pérdida de retorno entrada}_{(dB)} = -10 \log \left[\frac{\text{Potencia}_{incidente(watts)}}{\text{Potencia}_{reflejada(watts)}} \right]$$

En donde, tanto la potencia incidente como la reflejada, se miden en watts y, al aplicar el logaritmo base 10, obtendremos la pérdida de retorno en unidades de decibeles (dB). Ahora, mediante la operación del circuito mostrado y en base a lo programado por el sistema, se ejecutó el siguiente conjunto de instrucciones secuenciales para realizar la medición de la pérdida de retorno en la entrada del módulo de recepción:

1. Sistema – Verificar disponibilidad y conexión de los instrumentos.
2. Sistema – Activar fuente de corriente directa (Fuente_CD), fuente digital (Fuente_Dig), generador de señales (Gen_1), atenuador variable (Atenuador_Var), acoplador direccional (Acoplador_Dir), cargas resistivas de 50 ohms (Carga1_50/Carga2_50) y analizador de espectro (Analizador_Espectro).
3. S_1 – Colocar switch 1 en posición “0”.
4. S_2 – Colocar switch 2 en posición “0”.
5. S_3 – Colocar switch 3 en posición “0”.
6. S_4 – Colocar switch 4 en posición “0”.
7. S_5 – Colocar switch 5 en posición “0”.
8. S_6 – Colocar switch 5 en posición “1”.
9. Carga2_50 – Habilitar carga de 50 ohms conectada al puerto de salida.
10. Analizador_Espectro – Configurar rango de barrido de frecuencia con frecuencia central de 3700 MHz.
11. Analizador_Espectro – Configurar máximo nivel esperado de referencia de potencia a medir en -10 dBm y resolución de ancho de banda en 100kHz.
12. Fuente_CD – Configurar rango máximo de voltaje y corriente a aplicar al amplificador.
13. Fuente_CD – Aplicar voltaje de alimentación a amplificador.
14. Fuente_Dig – Aplicar señal de control para configurar y habilitar amplificador en el nivel de amplificación deseado.
15. Gen_1 – Configurar frecuencia en 3700 MHz y aplicar 0.01mW de potencia incidente.
16. Sistema – Instrucción de espera de 2 segundos para estabilización del módulo de recepción, fuentes e instrumentos de medición.
17. Analizador_Espectro – Ejecutar medición de potencia de salida en el rango de frecuencia configurado tres veces.
18. Analizador_Espectro – Enviar información a computadora en formato de tabla de datos.

19. Sistema – Leer datos enviados por analizador de espectro, obtener promedio de los valores de potencia medidos y restarles la pérdida esperada por acoplamiento entre el puerto principal y secundario dentro del acoplador direccional.
20. Sistema – Realizar cálculo de pérdida de retorno en decibeles “dB”, almacenar valor para desplegar información del resultado en la interfaz gráfica y generar archivo de reporte en tabla de datos.

A partir de estas instrucciones, aprovechamos la configuración que nos brindan los switches para conectar el puerto de salida del módulo de recepción a una carga característica de 50 ohms, mientras que, en su puerto de entrada, se hace incidir una potencia de 0.01mW proveniente del generador de señales. En donde, gracias a las propiedades del acoplador direccional, es posible guiar la potencia reflejada en el puerto de entrada del módulo para ser medida por el analizador de espectro y así, calcular la pérdida de retorno en la entrada [1, 18, 23].

4.1.3 Medición de pérdida de retorno en la salida con sistema de caracterización

De manera similar, es posible adaptar el circuito para medir la pérdida de retorno en la salida, como se muestra en la siguiente figura:

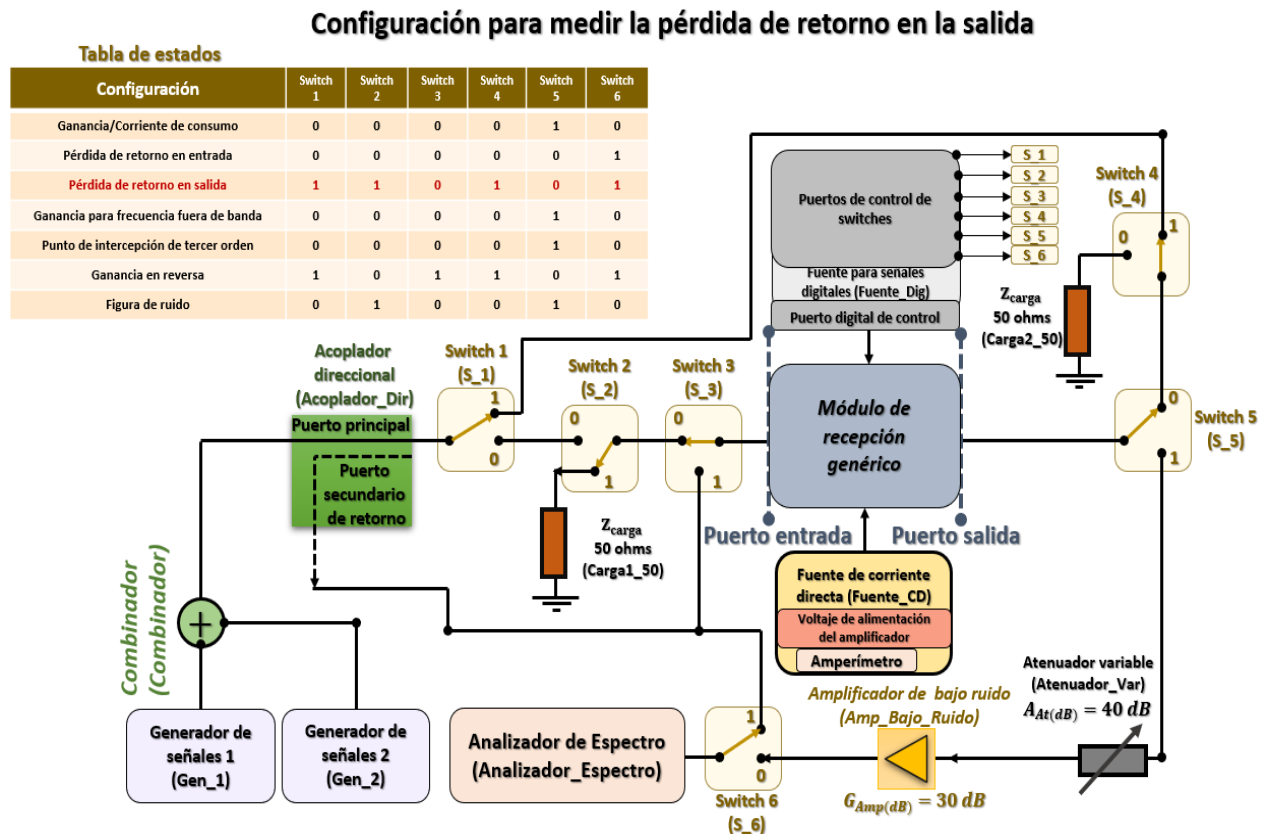


Figura 4.3 – Sistema de caracterización configurado para medir la pérdida de retorno en la salida del dispositivo, incluyendo, etiquetas de programación y tabla de estados.

Para medir la pérdida de retorno en la salida del dispositivo, la señal incidente será proporcionada al puerto de salida mientras que, el puerto de entrada, será terminado a una carga resistiva de 50 ohms [1, 18, 23]. Por lo que, para lograr esto, tanto el switch 1 como el switch 2 son colocados en su estado 1, el switch 3 en la posición 0, el switch 4 en su estado 1 y, el switch 5 en la posición 0, permitiendo que, el generador de señales proporcione la señal incidente hasta el puerto de salida del módulo de recepción, pasando por el puerto principal del acoplador direccional. Al mismo tiempo, al estar el switch 2 en el estado 1, permite terminar el puerto de entrada del dispositivo en la carga de 50 ohms conectada a tierra. Por último, como en el caso anterior, el switch 6 se mantiene en su estado 1, para poder enlazar el puerto secundario de retorno del acoplador direccional con el analizador de espectro, permitiendo así, caracterizar la potencia reflejada en la salida del dispositivo para calcular la pérdida de retorno correspondiente, utilizando la ecuación anteriormente mostrada.

De la misma manera, el sistema ejecutará la siguiente serie de instrucciones para realizar la medición:

1. Sistema – Verificar disponibilidad y conexión de los instrumentos.
2. Sistema – Activar fuente de corriente directa (Fuente_CD), fuente digital (Fuente_Dig), generador de señales (Gen_1), atenuador variable (Atenuador_Var), acoplador direccional (Acoplador_Dir), cargas resistivas de 50 ohms (Carga1_50/Carga2_50) y analizador de espectro (Analizador_Espectro).
3. S_1 – Colocar switch 1 en posición “1”.
4. S_2 – Colocar switch 2 en posición “1”.
5. S_3 – Colocar switch 3 en posición “0”.
6. S_4 – Colocar switch 4 en posición “1”.
7. S_5 – Colocar switch 5 en posición “0”.
8. S_6 – Colocar switch 6 en posición “1”.
9. Carga1_50 – Habilitar carga de 50 ohms conectada al puerto de entrada.
10. Analizador_Espectro – Configurar rango de barrido de frecuencia con frecuencia central de 3700 MHz.
11. Analizador_Espectro – Configurar máximo nivel esperado de referencia de potencia a medir en -10 dBm y resolución de ancho de banda en 100kHz.
12. Fuente_CD – Configurar rango máximo de voltaje y corriente a aplicar al amplificador.
13. Fuente_CD – Aplicar voltaje de alimentación a amplificador.
14. Fuente_Dig – Aplicar señal de control para configurar y habilitar amplificador en el nivel de amplificación deseado.
15. Gen_1 – Configurar frecuencia en 3700 MHz y aplicar 0.01mW de potencia incidente.
16. Sistema – Instrucción de espera de 2 segundos para estabilización del módulo de recepción, fuentes e instrumentos de medición.
17. Analizador_Espectro – Ejecutar medición de potencia de salida en el rango de frecuencia configurado tres veces.
18. Analizador_Espectro – Enviar información a computadora en formato de tabla de datos.

19. Sistema – Leer datos enviados por analizador de espectro, obtener promedio de los valores de potencia medidos y restarles la pérdida esperada por acoplamiento entre el puerto principal y secundario dentro del acoplador direccional.
20. Sistema – Realizar cálculo de pérdida de retorno en decibeles “dB”, almacenar valor para desplegar información del resultado en la interfaz gráfica y generar archivo de reporte en tabla de datos.

Similarmente al caso anterior, los estados de los switches nos permiten conectar el puerto de entrada del módulo de recepción a una carga característica de 50 ohms, por otro lado, en el puerto de salida, se aplica una señal con una potencia de 0.01mW desde el generador. Así, el acoplador direccional nos permite obtener la potencia reflejada desde el puerto de salida del módulo para ser captada por el analizador de espectro, proporcionando los datos suficientes para calcular la pérdida de retorno en la salida [1, 18].

4.1.4 Resultados de pruebas de ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno

Por último, mediante las condiciones establecidas para las mediciones de caracterización y, al aplicar las distintas configuraciones e instrucciones mostradas, nos fue posible obtener la siguiente tabla de resultados para las mediciones de la ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno tanto en la entrada como en la salida de un ejemplar de referencia del tipo de módulo de recepción seleccionado, para cada uno de sus niveles de amplificación, el cual, se midió tanto en el sistema de caracterización secuencial sin estar calibrado como con los instrumentos manuales de laboratorio calibrados:

Tabla 4.3 – Resultados de mediciones de ganancia, corriente de consumo y pérdidas de retorno para un ejemplar de referencia del tipo de módulo de recepción seleccionado.

Mediciones de rutina de caracterización	Nivel de amplificación	Datos sin calibración	Datos de laboratorio	Delta sin calibración
Ganancia para frecuencia dentro de banda	Bajo	-0.426 dB	2.482 dB	2.908 dB
Corriente de consumo		2.66 mA	2.558 mA	0.101 mA
Pérdida de retorno en la entrada		9.597 dB	9.097 dB	0.5 dB
Pérdida de retorno en la salida		25.750 dB	25.801 dB	0.051 dB
Ganancia para frecuencia dentro de banda	Medio	6.276 dB	9.169 dB	2.894 dB
Corriente de consumo		3.497 mA	3.397 mA	0.1 mA
Pérdida de retorno en la entrada		9.816 dB	9.578 dB	0.238 dB
Pérdida de retorno en la salida		14.626 dB	16.223 dB	1.597 dB
Ganancia para frecuencia dentro de banda	Alto	14.375 dB	17.553 dB	3.178 dB
Corriente de consumo		6.906 mA	6.8 mA	0.106 mA
Pérdida de retorno en la entrada		9.431 dB	8.407 dB	1.024 dB
Pérdida de retorno en la salida		16.31 dB	19.337 dB	3.027 dB

Para la tabla anterior, la columna de “Datos de laboratorio” nos muestra el valor obtenido por medio de caracterización con instrumentación manual calibrada de laboratorio para un ejemplar único de referencia del tipo del módulo de recepción genérico para el rango 3400-4000 MHz que estamos evaluando, de modo que, estos valores se identifican como si fueran su especificación de referencia. Por otro lado, la columna “Datos sin calibración” nos señala el valor obtenido al usar el sistema de caracterización secuencial mostrado sin estar calibrado, para el cual, se ejecutaron las instrucciones secuenciales para realizar las mediciones deseadas. A su vez, la última columna “Delta sin calibración”, nos muestra la diferencia absoluta que existe entre el valor de laboratorio y la medición obtenida con el sistema, en donde, este delta nos sirve como referencia de apoyo en el análisis de los resultados.

Al observar los resultados de la ganancia para una frecuencia dentro de la banda de operación en la tabla anterior, podemos apreciar que, la diferencia entre el valor de laboratorio y el medido por el sistema, aumenta levemente cuando el nivel de ganancia es más alto. También, se puede notar que, la medición de laboratorio siempre es mayor dado a que, nuestro sistema de caracterización suele tener más pérdidas indeseadas al compararlo con los instrumentos calibrados de laboratorio, lo cual, reduce la potencia de salida captada y con esto, la ganancia calculada. Por otro lado, la corriente de consumo no difiere mucho del valor de laboratorio dado a que, es una medición de corriente directa que no se ve muy afectada por las pérdidas internas del sistema de caracterización.

Para el análisis de las mediciones de pérdidas de retorno en la entrada y salida del módulo de recepción, puede observarse que, los deltas son distintos en todos los casos, tanto para la prueba aplicada en la entrada como en la salida del dispositivo. Dentro de las posibles razones de esta desviación de los valores, se le atribuye a que los elementos eléctricos que componen ya sea el segmento al puerto de entrada o bien, al de salida del módulo de recepción, tienen sus propias señales que se reflejan o pérdidas internas que colaboran indeseablemente para alterar la potencia reflejada captada por el analizador de espectro.

4.2 Implementación y resultados de mediciones de ganancia para una frecuencia fuera de la banda y punto de intercepción de tercer orden

Después de desarrollar y ejecutar las mediciones de la ganancia para una frecuencia dentro de la banda de operación y las pérdidas de retorno, se enfocó la investigación en desarrollar los medios para realizar las mediciones de ganancia para una frecuencia fuera de la banda de operación, es decir, fuera del rango de 3400-4000 MHz (se utilizó 4700 MHz) y, a su vez, la medición del punto de intercepción de tercer orden. Para esto, fue requerido establecer las condiciones sobre las cuales se ejecutaron las mediciones mencionadas, en donde, estas fueron similares a las utilizadas en el método manual de laboratorio, siempre cuidando respetar el rango de operación permisible del módulo de recepción para evitar dañarlo. A continuación, se muestra la tabla con las condiciones establecidas:

Tabla 4.4– Condiciones de ganancia en frecuencia fuera de banda y punto de intercepción de tercer orden en los niveles de amplificación del módulo de recepción.

Mediciones de caracterización	Potencia promedio de entrada aplicada	Frecuencia aplicada		Nivel de amplificación
Ganancia para frecuencia fuera de banda	0.01mW	4700 MHz		Baja amplificación
Punto de intercepción de tercer orden	0.01mW	3700 MHz	3701 MHz	
Ganancia para frecuencia fuera de banda	0.01mW	4700 MHz		Mediana amplificación
Punto de intercepción de tercer orden	0.01mW	3700 MHz	3701 MHz	
Ganancia para frecuencia fuera de banda	0.01mW	4700 MHz		Alta amplificación
Punto de intercepción de tercer orden	0.01mW	3700 MHz	3701 MHz	

Ahora, con las condiciones de prueba definidas, primero, se procedió a realizar la medición de la ganancia para una frecuencia fuera de la banda 3400-4000 MHz y después, la medición del punto de intercepción de tercer orden, haciendo uso del sistema de caracterización secuencial mostrado anteriormente. En donde, este, fue adaptado por medio de la programación que configuró los instrumentos y componentes necesarios. Aunado a lo anterior, se puede apreciar que, la tabla de estados lógicos para realizar las mediciones de la ganancia para una frecuencia fuera de la banda de operación y, el punto de intercepción de tercer orden es la siguiente:

Tabla 4.5 – Tabla de estados de los switches para realizar las mediciones de ganancia para una frecuencia fuera de banda y punto de intercepción de tercer orden.

Configuración	Switch 1	Switch 2	Switch 3	Switch 4	Switch 5	Switch 6
Ganancia para frecuencia fuera de la banda	0	0	0	0	1	0
Punto de intercepción de tercer orden	0	0	0	0	1	0

3. S_1 – Colocar switch 1 en posición “0”.
4. S_2 – Colocar switch 2 en posición “0”.
5. S_3 – Colocar switch 3 en posición “0”.
6. S_4 – Colocar switch 4 en posición “0”.
7. S_5 – Colocar switch 5 en posición “1”.
8. S_6 – Colocar switch 6 en posición “0”.
9. Atenuador_Var – Programar atenuación en 0 decibeles “dB”.
10. Amp_Bajo_Ruido – Añadir amplificador de bajo ruido al circuito entre el puerto de salida del módulo de recepción y el analizador de espectro.
11. Analizador_Espectro – Configurar rango de barrido de frecuencia fuera de la banda 3400-4000 MHz, utilizando como frecuencia central 4700 MHz.
12. Analizador_Espectro – Configurar máximo nivel esperado de referencia de potencia a medir en -10 dBm y resolución de ancho de banda en 100kHz.
13. Fuente_CD – Configurar rango máximo de voltaje y corriente a aplicar al amplificador del módulo de recepción. Aplicar voltaje de alimentación a módulo de recepción.
14. Fuente_Dig – Aplicar señal de control para configurar y habilitar amplificador en el nivel de amplificación deseado.
15. Gen_1 – Configurar frecuencia en 4700 MHz y aplicar 0.01mW de potencia de entrada.
16. Sistema – Instrucción de espera de 2 segundos para estabilización del módulo de recepción, fuentes e instrumentos de medición.
17. Analizador_Espectro – Ejecutar medición de potencia de salida en frecuencia seleccionada.
18. Analizador_Espectro – Enviar información a computadora en formato de tabla de datos.
19. Sistema – Leer datos enviados por analizador de espectro, obtener promedio de los valores de potencia medidos y restarles la ganancia del amplificador del circuito de caracterización.
20. Sistema – Realizar cálculo de la ganancia para la frecuencia fuera de banda en decibeles “dB”, almacenar valor para desplegar información del resultado en la interfaz gráfica y generar archivo de reporte en tabla de datos.

De este modo, las instrucciones anteriores, primeramente, preparan las fuentes que alimentan y configuran el módulo de recepción a evaluar, así como, el generador de señales que suministrará la potencia de entrada a aplicar y, el analizador de espectro que se encargará de medir la respuesta de la prueba eléctrica en el dominio de la frecuencia. A su vez, la configuración de los switches permite que, la potencia proveniente del generador de señales pase por el acoplador direccional guiándola hasta el puerto de entrada del módulo de recepción. Dado a que, la frecuencia de la señal aplicada cae fuera del rango de la banda 3400-4000 MHz esperada por el módulo de recepción, se considera que los filtros del dispositivo se encargarán de atenuar su valor en una gran magnitud (esta característica es la que se está evaluando en el dispositivo).

De modo que, la señal que sale del módulo de recepción tiene una magnitud muy reducida en comparación con la que entró a este, por lo que, gracias a los switches es redirigida hasta la red del amplificador de bajo ruido del sistema; el cual, se encarga de amplificar (sin agregar mucho ruido) esta señal débil hasta un punto en que sea correctamente captada por el analizador de

espectro. Finalmente, la señal amplificada es llevada hasta el analizador de espectro para ser muestreada y analizada con el fin de calcular la ganancia para esta frecuencia fuera de la banda 3400-4000 MHz [1, 16, 18]. Recordemos que, para calcular la ganancia en frecuencia fuera de banda, se utilizará la siguiente expresión:

$$Ganancia\ fuera\ de\ banda_{(dB)} = [Potencia_{medida(dBm)} - GananciaAmp_{(dB)}] - Potencia_{entrada(dBm)}$$

En donde, “*Ganancia fuera de banda*_(dB)” es la ganancia para la frecuencia fuera de la banda 3400-4000 MHz del módulo (en decibeles “dB”), “*Potencia medida*_(dBm)” es la potencia medida por el analizador de espectro (en decibeles “dBm”), “*GananciaAmp*_(dB)” es la ganancia del amplificador de bajo ruido del sistema de caracterización (en “dB”) y “*Potencia entrada*_(dBm)” es la potencia de la señal de entrada aplicada al módulo de recepción (en “dBm”). Nótese que, se espera que la ganancia para este tipo de mediciones tenga un valor negativo puesto a que, en realidad, representa la atenuación de la señal filtrada.

4.2.2 Medición del punto de intercepción de tercer orden con sistema

Ahora, para ejecutar la medición del punto de intercepción de tercer orden sobre el módulo de recepción, se utilizó la siguiente configuración del sistema de caracterización secuencial:

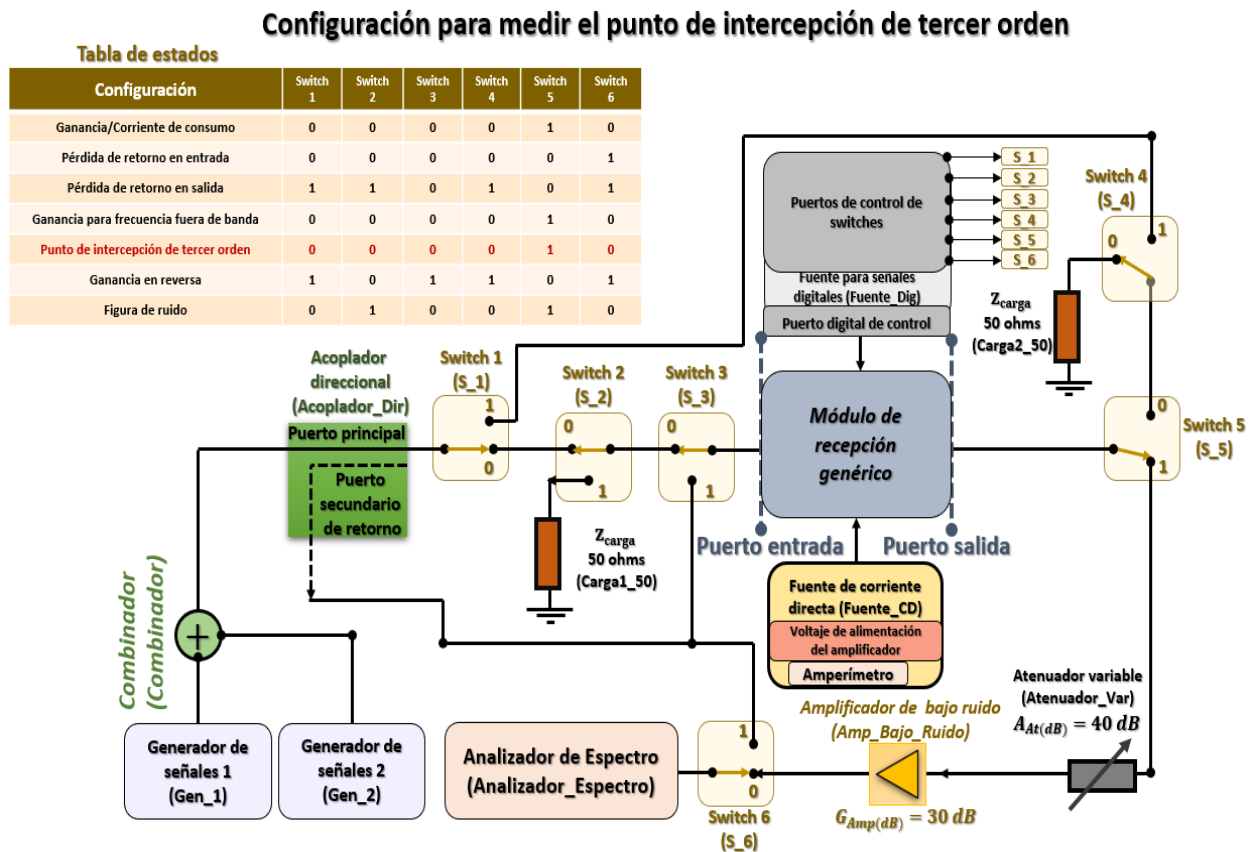


Figura 4.5– Sistema de caracterización secuencial configurado para medir el punto de intercepción de tercer orden.

Similarmente a la medición de ganancia en una frecuencia fuera de la banda 3400-4000 MHz, utilizando el sistema anterior, se programaron las siguientes instrucciones secuenciales encargadas de ejecutar la prueba del punto de intercepción de tercer orden haciendo uso del algoritmo:

1. Sistema – Verificar disponibilidad y conexión de los instrumentos.
2. Sistema – Activar fuente de corriente directa (Fuente_CD), fuente digital (Fuente_Dig), generador de señales 1 (Gen_1) y generador de señales 2 (Gen_2), atenuador variable (Atenuador_Var), acoplador direccional (Acoplador_Dir), combinador (Combinador) y analizador de espectro (Analizador_Espectro).
3. S_1 – Colocar switch 1 en posición “0”.
4. S_2 – Colocar switch 2 en posición “0”.
5. S_3 – Colocar switch 3 en posición “0”.
6. S_4 – Colocar switch 4 en posición “0”.
7. S_5 – Colocar switch 5 en posición “1”.
8. S_6 – Colocar switch 6 en posición “0”.
9. Atenuador_Var – Programar atenuación en 40 decibeles “dB” para un nivel aceptable de medición del analizador de espectro.
10. Analizador_Espectro – Configurar rango de barrido de frecuencia de 3697 MHz hasta 3704 MHz.
11. Analizador_Espectro – Configurar máximo nivel esperado de referencia de potencia a medir en -10 dBm y resolución de ancho de banda en 100kHz.
12. Fuente_CD – Configurar rango máximo de voltaje y corriente a aplicar al amplificador del módulo de recepción.
13. Fuente_CD – Aplicar voltaje de alimentación a amplificador del módulo de recepción.
14. Fuente_Dig – Aplicar señal de control para configurar y habilitar amplificador en el nivel de amplificación deseado.
15. Gen_1 – Configurar frecuencia en 3700 MHz y aplicar 0.01mW de potencia de entrada.
16. Gen_2 – Configurar frecuencia en 3701 MHz y aplicar 0.01mW de potencia de entrada.
17. Sistema – Instrucción de espera de 2 segundos para estabilización del módulo de recepción, fuentes e instrumentos de medición.
18. Analizador_Espectro – Ejecutar medición de distribución de potencia en el espectro de frecuencia desde 3697 MHz hasta 3704 MHz tres veces.
19. Analizador_Espectro – Enviar información a computadora en formato de tabla de datos.
20. Sistema – Leer datos enviados por analizador de espectro y obtener promedio de los valores de potencia de salida medidos para las frecuencias fundamentales “ $f_1 = 3700 \text{ MHz}$ ” y “ $f_2 = 3701 \text{ MHz}$ ”.
21. Sistema – Almacenar el promedio de la potencia de salida de las frecuencias fundamentales “ f_1 ” y “ f_2 ” en variable “ $P_{salida f_1 f_2 (dBm)}$ ”.
22. Analizador_Espectro – Leer datos enviados por analizador de espectro y obtener promedio de los valores de potencia de salida medidos para los productos de intermodulación de tercer orden “ $(2f_1 - f_2) = 3699 \text{ MHz}$ ” y “ $(2f_2 - f_1) = 3702 \text{ MHz}$ ”.

23. Sistema – Almacenar el valor del promedio más alto de los dos productos de intermodulación en variable “ $P_{IM3(dBm)}$ ”.
24. Sistema – Realizar cálculo de la potencia de entrada en la que ocurre el punto de intercepción de tercer orden utilizando la siguiente formula:

$$PI3_{(dBm)} = P_{entrada(dBm)} + \frac{[(P_{salida}f_1f_2(dBm)+A_{dB})-(P_{IM3(dBm)}+A_{dB})]}{2}$$
25. Sistema – Almacenar valor de “ $PI3_{dBm}$ ” para desplegar información del resultado en la interfaz gráfica y generar archivo de reporte en tabla de datos.

Con las instrucciones del algoritmo, primero, se prepararon las fuentes que alimentan al módulo de recepción y lo configuran en su nivel de amplificación deseado. A su vez, se activó el generador de señales 1 para aplicar una señal de 3700 MHz y, el generador de señales 2 para una de 3701 MHz, de modo que, ambas señales son sumadas por superposición en el combinador con el fin de convertirse en una señal única de dos tonos. Así, esta señal sería llevada desde el combinador al acoplador direccional hasta llegar al puerto de entrada del módulo de recepción.

Dado a que, ambas frecuencias de la señal de dos tonos caen dentro del rango de operación de 3400-4000 MHz, se espera que el módulo de recepción amplifique la señal uniformemente por medio de su amplificador de bajo ruido interno en su salida. La señal amplificada, será llevada a la red con el atenuador variable en 40 dB y el amplificador de bajo ruido para reducir su magnitud hasta un punto en que no sea peligrosa para el rango de potencia medible del analizador de espectro. En donde, el analizador de espectro se encargará de descomponer la señal en el dominio de la frecuencia con el fin de analizar los productos de intermodulación requeridos para calcular el punto de intercepción de tercer orden del módulo de recepción [1, 27]. En la siguiente figura, se muestra una foto del analizador de espectro utilizado en nuestro sistema de caracterización secuencial, captando la señal de dos tonos y los productos de intermodulación mencionados:



Figura 4.6– Captura del espectro con analizador mostrando los dos tonos de la señal y los respectivos productos.

Recordemos que, para calcular el punto de intercepción de tercer orden, la potencia de entrada inicial suministrada “ $P_{entrada(dBm)}$ ” deberá asegurar que el amplificador opera en la región lineal, en donde, se analiza la potencia de salida medida correspondiente a las frecuencias fundamentales $f_1 = 3700MHz$ y $f_2 = 3701MHz$ en el analizador de espectro, obteniendo el promedio de estas como “ $P_{salida_{f_1f_2}(dBm)}$ ”. Así mismo, se verifica la potencia de salida de los productos de intermodulación de tercer orden en las frecuencias “ $(2f_1 - f_2) = 3699 MHz$ ” y “ $(2f_2 - f_1) = 3702 MHz$ ” que, no fueron eliminados con los filtros internos del módulo de recepción, señalando aquel con mayor magnitud como “ $P_{IM3(dBm)}$ ”. Es importante mencionar que, a los niveles de potencia observados en el instrumento, se les deberá añadir la pérdida esperada “ $A_{(dB)}$ ” por el atenuador variable del sistema, por lo que, la potencia de entrada en la cual sucede el punto de intercepción de tercer orden “ $PI3_{(dBm)}$ ” se puede calcular utilizando la siguiente ecuación [1, 27]:

$$PI3_{(dBm)} = P_{entrada(dBm)} + \frac{[(P_{salida_{f_1f_2}(dBm)} + A_{dB}) - (P_{IM3(dBm)} + A_{(dB)})]}{2}$$

4.2.3 Resultados de mediciones de ganancia para una frecuencia fuera de la banda y el punto de intercepción de tercer orden

Ahora que, se han descrito los procedimientos para ejecutar las mediciones de ganancia para una frecuencia fuera de la banda 3400-4000 MHz y el punto de intercepción de tercer orden, en donde, se partió de las condiciones establecidas para las mediciones y se aplicaron las distintas configuraciones e instrucciones mostradas, se midió el ejemplar de referencia del módulo de recepción utilizando el sistema de caracterización secuencial sin estar calibrado y también con los instrumentos manuales de laboratorio calibrados, con el fin de obtener la siguiente tabla de resultados para las mediciones anteriormente mencionadas.

Tabla 4.6– Resultados de mediciones de ganancia para frecuencia fuera de banda y punto de intercepción de tercer orden para el ejemplar de referencia del módulo de recepción.

Mediciones de rutina de caracterización	Nivel de amplificación	Datos sin calibración	Datos de laboratorio	Delta sin calibración
Ganancia para frecuencia fuera de banda	Bajo	-25.466 dB	-23.418 dB	2.047 dB
Punto de intercepción de tercer orden		-5.528 dBm	-6.62 dBm	1.09 dBm
Ganancia para frecuencia fuera de banda	Medio	-19.651 dB	-17.176 dB	2.476 dB
Punto de intercepción de tercer orden		-6.156 dBm	-7.107 dBm	0.951 dBm
Ganancia para frecuencia fuera de banda	Alto	-17.917 dB	-15.446 dB	2.471 dB
Punto de intercepción de tercer orden		-12.122 dBm	-13.24 dBm	1.118 dBm

Para el caso de las mediciones de ganancia para una frecuencia fuera de banda, se puede notar que, el valor de referencia de laboratorio y del sistema de caracterización sin calibración, son negativos en todos los niveles de amplificación del módulo de recepción, y esto, es debido a que, la señal aplicada es atenuada por los filtros internos del dispositivo, así, una ganancia negativa en decibeles

indica que es una atenuación. De esta manera, podemos observar que, el valor de laboratorio es más negativo al operar el módulo en un modo de amplificación menor y, va haciéndose más positivo al aumentar el nivel de amplificación; similarmente, el valor medido con nuestro sistema de caracterización va haciéndose más positivo conforme nos desplazamos desde el nivel de amplificación baja hasta la alta, indicando que las mediciones tienen coherencia con los datos de laboratorio. Sin embargo, puede apreciarse que, en todos los casos, la ganancia para la frecuencia fuera de banda medida, es más negativa en el equipo de caracterización sin calibración que en el de laboratorio, la diferencia se debe a que, nuestro sistema de caracterización tiene más pérdidas no deseadas al compararlo con los instrumentos calibrados de laboratorio, por lo cual, se reduce la potencia de salida captada en el analizador de espectro y con esto, la ganancia calculada.

Por último, para las mediciones del punto de intercepción de tercer orden, podemos notar que, para los valores esperados de laboratorio, al operar el módulo de recepción en el modo de amplificación baja, se muestra un valor de -6.62 dBm, lo que indica que, el dispositivo llega al punto de intercepción de tercer orden con una potencia de entrada de -6.62 dBm, mostrando una excelente linealidad en el amplificador interno del dispositivo. A su vez, al ir cambiando el modo de amplificación baja a media y, de media a alta, podemos notar que, el punto de intercepción ocurre en potencias cada vez menores (más negativas), indicando que, a mayor ganancia en el amplificador, existe menor linealidad en este, lo cual, va acorde con el comportamiento esperado de los amplificadores [1, 27]. Del mismo modo, el valor medido por nuestro sistema de caracterización sigue la tendencia de este comportamiento, mostrando coherencia en sus mediciones; sin embargo, como puede notarse, dado a que, también comparte las mismas pérdidas que las mediciones de ganancia fuera de banda, los valores medidos en los que ocurre el punto de intercepción de tercer orden son distintos a los esperados.

4.3 Implementación y resultados de mediciones de ganancia en reversa para una frecuencia dentro de la banda y figura de ruido

Después de haber concluido con las mediciones de la ganancia para una frecuencia fuera de la banda y el punto de intercepción de tercer orden, el enfoque fue en las mediciones de ganancia en reversa para una frecuencia dentro del rango 3400-4000 MHz (se usará 3700 MHz, frecuencia central) y, en la prueba de figura de ruido. De este modo, para este propósito, fue necesario definir las condiciones sobre las cuales se realizaron las mediciones mencionadas, utilizando las mismas condiciones planteadas en el método manual de laboratorio y siempre cuidando, el operar al módulo de recepción a caracterizar dentro del rango de trabajo recomendable para evitar dañarlo. Dicho esto, a continuación, se muestra la tabla con las condiciones establecidas:

Tabla 4.7– Condiciones de ganancia en reversa y figura de ruido en los niveles de amplificación del dispositivo.

Mediciones de caracterización	Potencia de entrada aplicada	Frecuencia aplicada	Nivel de amplificación
Ganancia en reversa para frecuencia dentro de banda	0.01mW	3700 MHz	Baja amplificación
Figura de ruido	Ruido térmico	3700 MHz	
Ganancia en reversa para frecuencia dentro de banda	0.01mW	3700 MHz	Mediana amplificación
Figura de ruido	Ruido térmico	3700 MHz	
Ganancia en reversa para frecuencia dentro de banda	0.01mW	3700 MHz	Alta amplificación
Figura de ruido	Ruido térmico	3700 MHz	

Ya que se definieron las condiciones de las mediciones deseadas, primeramente, se continuó con la ejecución de la prueba de ganancia en reversa para una frecuencia dentro de 3400-4000 MHz y después, la medición de la figura de ruido, utilizando el sistema de caracterización secuencial. Dicho sistema, fue configurado a partir de la programación por medio de software que manipuló los instrumentos y sus componentes necesarios para la ejecución de cada prueba. También, para esta tarea al igual que con las mediciones descritas anteriormente, a cada componente o instrumento del sistema, se le asignó una etiqueta virtual de programación como identificación en la operación de los algoritmos utilizados en el equipo de caracterización, en donde, el software de computadora se encargó de transmitir los comandos requeridos para cada recurso instrumental. Ahora bien, dicho lo anterior, a continuación, se muestra la tabla de estados lógicos de los switches para realizar las mediciones de la ganancia en reversa y la figura de ruido:

Tabla 4.8 – Tabla de estados de los switches para las mediciones de ganancia en reversa y figura de ruido.

Configuración	Switch 1	Switch 2	Switch 3	Switch 4	Switch 5	Switch 6
Ganancia en reversa para frecuencia dentro de banda	1	0	1	1	0	1
Figura de ruido	0	1	0	0	1	0

2. Sistema – Activar fuente de corriente directa (Fuente_CD), fuente digital (Fuente_Dig), generador de señales 1 (Gen_1) y generador de señales 2 (Gen_2), atenuador variable (Atenuador_Var), amplificador de bajo ruido (Amp_Bajo_Ruido), cargas resistivas (Carga1_50 y Carga2_50), acoplador direccional (Acoplador_Dir), combinador (Combinador) y analizador de espectro (Analizador_Espectro).
3. S_1 – Colocar switch 1 en posición “1”.
4. S_2 – Colocar switch 2 en posición “0”.
5. S_3 – Colocar switch 3 en posición “1”.
6. S_4 – Colocar switch 4 en posición “1”.
7. S_5 – Colocar switch 5 en posición “0”.
8. S_6 – Colocar switch 6 en posición “1”.
9. Analizador_Espectro – Configurar rango de barrido de frecuencia con frecuencia central de 3700 MHz.
10. Analizador_Espectro – Configurar máximo nivel esperado de referencia de potencia a medir en -10 dBm y resolución de ancho de banda en 100kHz.
11. Fuente_CD – Configurar rango máximo de voltaje y corriente a aplicar al amplificador del módulo de recepción. Después, aplicar voltaje de alimentación a amplificador del módulo.
12. Fuente_Dig – Aplicar señal de control para configurar amplificador del módulo de recepción en el nivel de amplificación deseado y habilitarlo.
13. Gen_1 – Configurar frecuencia en 3700 MHz y aplicar 0.01mW de potencia en el puerto de salida del módulo de recepción a caracterizar.
14. Sistema – Instrucción de espera de 2 segundos para estabilización del módulo de recepción, fuentes e instrumentos de medición.
15. Analizador_Espectro – Ejecutar medición de potencia de salida en el rango de frecuencia configurado.
16. Analizador_Espectro – Enviar información a computadora en formato de tabla de datos.
17. Sistema – Leer datos enviados por analizador de espectro y obtener promedio de los valores de potencia medidos.
18. Sistema – Realizar cálculo de ganancia en reversa ($GananciaReversa_{(dB)} = Potencia_{medida(dBm)} - Potencia_{entrada(dBm)}$) para frecuencia dentro de la banda en decibeles “dB”, almacenar valor para desplegar información del resultado en la interfaz gráfica y generar archivo de reporte en tabla de datos.

A partir de las instrucciones mostradas, inicialmente, se ajustan las fuentes que energizan y preparan el módulo de recepción a caracterizar, a su vez, el generador de señales que proporcionará la señal de entrada a aplicar también es preparado junto con el analizador de espectro que medirá la respuesta del dispositivo en el dominio de la frecuencia. Por otro lado, la configuración de los switches sirve para que la señal que sale del generador de señales pase por el acoplador direccional que, la direccionará hacia el puerto de salida del módulo de recepción. Como la señal aplicada está siendo introducida en la salida del módulo en vez de su entrada, se espera que la ganancia en reversa sea en realidad una atenuación, dado a que, es el comportamiento esperado del diseño del

dispositivo, el confirmar que el comportamiento eléctrico sea de esta manera, es el fundamento para realizar esta medición.

Así, la señal que sale del módulo de recepción por su puerto de entrada, se espera que tenga una magnitud menor a la introducida en el puerto de salida, en donde esta, es dirigida al analizador de espectro gracias a los switches 3 y 6 del sistema. Por último, la señal saliente es muestreada por el analizador de espectro y comparada con la incidente, con el fin de calcular la ganancia en reversa del dispositivo [1, 17, 18].

4.3.2 Medición de figura de ruido

Ahora, con respecto a la medición de figura de ruido, se realizó la siguiente configuración:

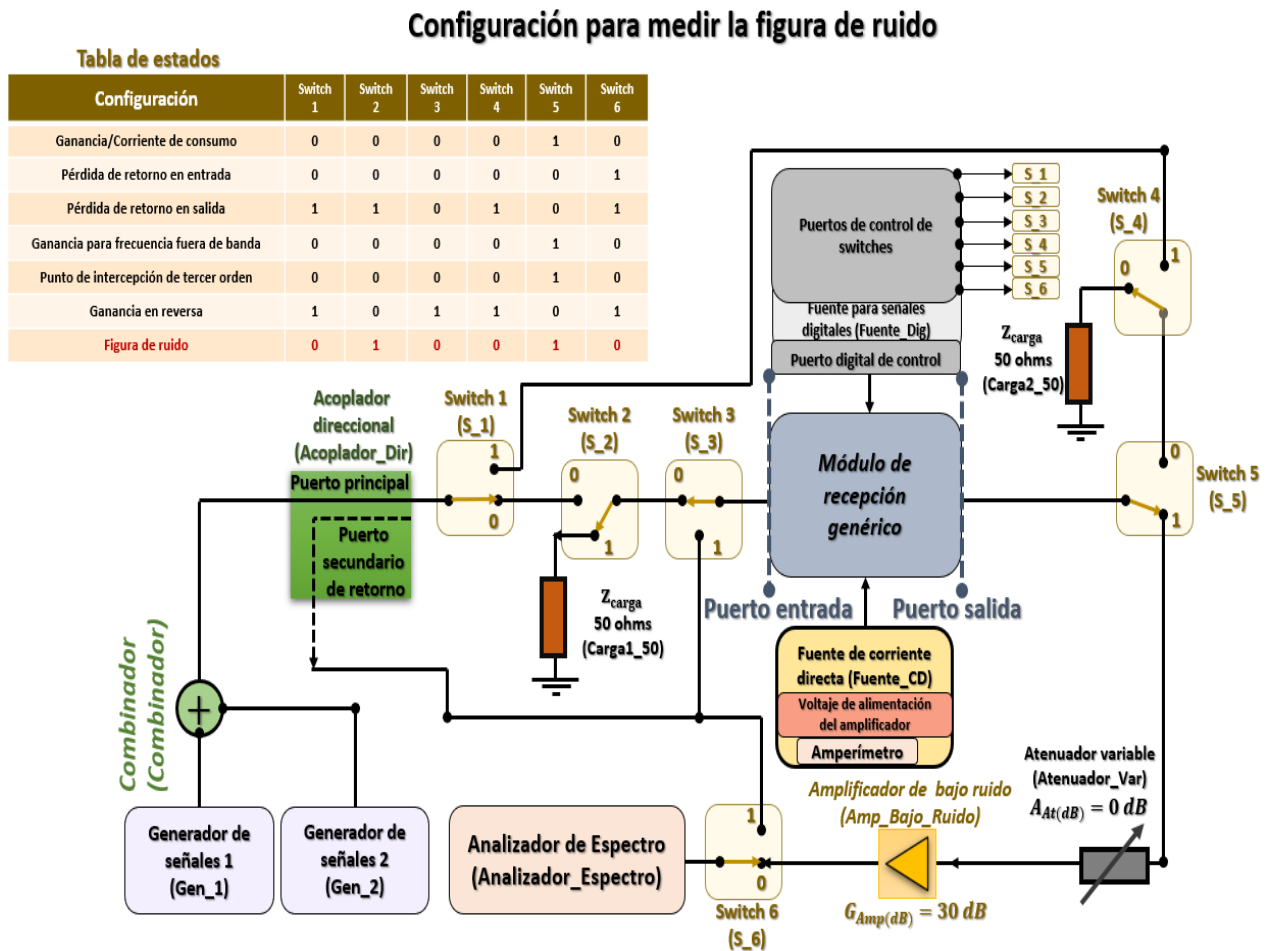


Figura 4.8– Sistema de caracterización secuencial configurado para medir la figura de ruido.

Similarmente al caso de la ganancia en reversa, para la figura de ruido, se diseñaron una serie de instrucciones secuenciales por software, generando un algoritmo capaz de manipular los instrumentos para ejecutar la medición. Dichas instrucciones secuenciales, se presentan a continuación:

1. Sistema – Verificar disponibilidad y conexión de los instrumentos.
2. Sistema – Activar fuente de corriente directa (Fuente_CD), fuente digital (Fuente_Dig), generador de señales 1 (Gen_1) y generador de señales 2 (Gen_2), atenuador variable (Atenuador_Var), amplificador de bajo ruido (Amp_Bajo_Ruido), cargas resistivas (Carga1_50 y Carga2_50), acoplador direccional (Acoplador_Dir), combinador (Combinador) y analizador de espectro (Analizador_Espectro).
3. S_1 – Colocar switch 1 en posición “0”.
4. S_2 – Colocar switch 2 en posición “1”.
5. S_3 – Colocar switch 3 en posición “0”.
6. S_4 – Colocar switch 4 en posición “0”.
7. S_5 – Colocar switch 5 en posición “1”.
8. S_6 – Colocar switch 6 en posición “0”.
9. Atenuador_Var – Programar atenuación en 0 decibeles “dB”.
10. Amp_Bajo_Ruido – Añadir amplificador de bajo ruido al circuito entre el puerto de salida del módulo de recepción y el analizador de espectro.
11. Analizador_Espectro – Configurar rango de barrido de frecuencia de 3699.9 MHz hasta 3700.1 MHz (ancho de banda de 200kHz), con frecuencia central de 3700 MHz.
12. Analizador_Espectro – Configurar máximo nivel esperado de referencia de potencia a medir en -10 dBm y resolución de ancho de banda en 100kHz.
13. Fuente_CD – Configurar rango máximo de voltaje y corriente a aplicar al amplificador del módulo de recepción.
14. Fuente_CD – Aplicar voltaje de alimentación a amplificador del módulo de recepción.
15. Fuente_Dig – Aplicar señal de control para configurar y habilitar amplificador en el nivel de amplificación deseado.
16. Carga1_50 – Colocar carga característica en la entrada del módulo de recepción para servir como fuente de ruido térmico de entrada “ $R_{Entrada}$ ”, para este caso, se calcula como $R_{Entrada} = k_B T B$, en donde, “ k_B ” es la constante de Boltzmann, “ T ” es la temperatura absoluta en Kelvins y “ B ” es el ancho de banda, que para nuestro caso es $B = 200kHz$.
17. Sistema – Instrucción de espera de 2 segundos para estabilización del módulo de recepción, fuentes e instrumentos de medición.
18. Analizador_Espectro – Ejecutar medición de potencia de salida de ruido en el rango de frecuencia configurado 10 veces.
19. Analizador_Espectro – Enviar información a computadora en formato de tabla de datos.
20. Sistema – Leer datos enviados por analizador de espectro, obtener promedio de los valores de potencia medidos a lo largo del ancho de banda de 200kHz, convertir de “dBm” a “watts” y almacenar valor del ruido medido en la variable “ R_{Medido} ”.
21. Sistema – Realizar cálculo de factor de ruido del sistema “ $F_{Sistema}$ ” por medio de la expresión $F_{Sistema} = \frac{R_{Medido}}{G_S(R_{Entrada})}$. En donde, “ G_S ” es la ganancia en cascada total del sistema.

22. Sistema – Obtener factor de ruido del módulo de recepción “ $F_{módulo}$ ” a partir de la fórmula de Friis $F_{Módulo} = F_{Sistema} - \frac{(F_{Amp}-1)}{G_{Módulo}} - \frac{(F_{Analizador}-1)}{G_{Módulo}G_{Amp}}$. En donde “ F_{Amp} ” es el factor de ruido del amplificador de bajo ruido del sistema de caracterización, “ $G_{Módulo}$ ” es la ganancia del módulo de recepción, “ $F_{Analizador}$ ” es el factor de ruido del analizador de espectro y “ G_{Amp} ” es la ganancia del amplificador de bajo ruido del sistema.
23. Sistema – Calcular la figura de ruido del módulo de recepción utilizando $FiguraRuido_{Módulo}(dB) = 10\log_{10}(F_{Módulo})$. Almacenar valor para desplegar información del resultado en la interfaz gráfica y generar archivo de reporte en tabla de datos.

Mediante las instrucciones expuestas anteriormente, el sistema de caracterización, primeramente, desconectará los generadores del circuito por medio del switch 1 y 2, al estar el switch 2 en posición 1 y, el switch 3 en la posición 0, se interconectará el puerto de entrada del módulo de recepción con una carga de 50 ohms, la cual, se utilizará para proporcionar el ruido térmico necesario para la medición de figura de ruido.

A su vez, el puerto de salida del módulo está conectado con la red que contiene al atenuador programado en 0 dB y el amplificador de bajo ruido con ganancia de 30 dB, al estar conectado a la ruta que se obtiene con el switch 5 en posición 1. Este amplificador de bajo ruido del sistema, se encargará de incrementar la magnitud de la señal de ruido amplificada por el módulo de recepción, hasta un nivel que sea correctamente captada por el analizador de espectro, en donde, este último será interconectado gracias al switch 6 en la posición 0. De esta manera, la configuración del sistema nos brindará un circuito para la medición de la figura de ruido por el método de ruido térmico y este, constará de tres etapas, la primera es el módulo de recepción a caracterizar, la segunda es el amplificador de bajo ruido del sistema y, la última es el analizador de espectro, como se muestra en la siguiente figura:

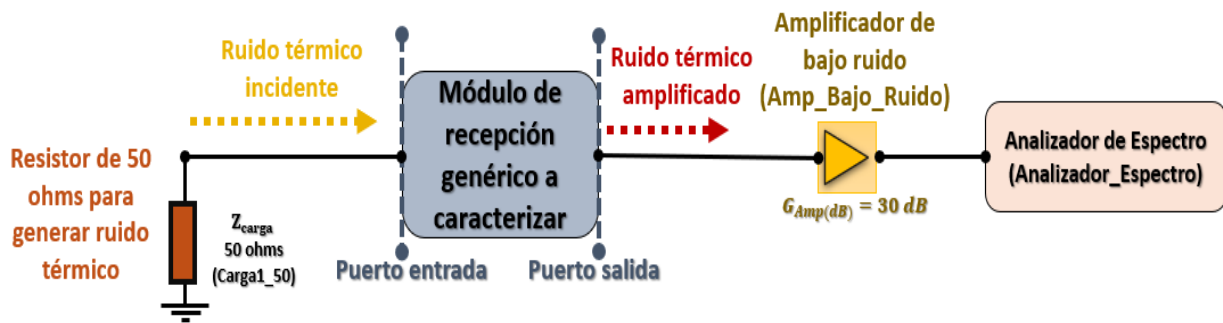


Figura 4.9– Configuración para medir la figura de ruido por el método de ruido térmico.

Una vez el sistema realice las mediciones del ruido medido “ R_{Medido} ”, se considera la ganancia acumulada del sistema “ G_S ” que, se obtiene por medio del producto de la ganancia del módulo “ $G_{Módulo}$ ”, del amplificador de bajo ruido del sistema “ G_{Amp} ” y del analizador de espectro “ $G_{Analizador}$ ”:

$$G_S = G_{Módulo} G_{Amp} G_{Analizador}$$

Y, también, se toma en cuenta el ruido de entrada “ $R_{Entrada}$ ”, calculado por medio de:

$$R_{Entrada} = k_B T B$$

En donde, “ k_B ” es la constante de Boltzmann, “ T ” es la temperatura absoluta en Kelvins y “ B ” es el ancho de banda de la medición. Dado a que, en el ambiente donde se realizó la medición se tiene una temperatura estable de 25°C, esto es equivalente a 298.15K, por lo que, considerando un ancho de banda de 200kHz estándar, tendríamos un ruido de entrada de $8.23281 * 10^{-13} mW$. Por lo tanto, se puede calcular el factor de ruido total del sistema “ $F_{sistema}$ ” como:

$$F_{Sistema} = \frac{R_{Medido}}{G_S(R_{Entrada})}$$

Así, una vez obtenido el factor de ruido del sistema y con el dato del factor de ruido del analizador de espectro utilizado “ $F_{Analizador}$ ” (proporcionado por el manual del instrumento, siendo $F_{Analizador} = 8.32$ en nuestro caso), podremos utilizar la fórmula de Friis para obtener el factor correspondiente al módulo de recepción “ $F_{módulo}$ ”:

$$F_{Módulo} = F_{Sistema} - \frac{(F_{Amp} - 1)}{G_{Módulo}} - \frac{(F_{Analizador} - 1)}{G_{Módulo} G_{Amp}}$$

En donde, “ F_{Amp} ” es el factor de ruido del amplificador de bajo ruido del sistema. Y con esto, la figura de ruido del módulo se obtiene por medio de la expresión [1, 28]:

$$FiguraRuido_{módulo}(dB) = 10 \log_{10}(F_{Módulo})$$

Nótese que, este procedimiento y los cálculos mencionados, son ejecutados de manera automática por el algoritmo descrito y sus instrucciones secuenciales, por lo que, el usuario no tendrá que realizarlos de manera manual.

4.3.3 Resultados de pruebas de ganancia en reversa para una frecuencia dentro de la banda 3400-4000 MHz y figura de ruido

Con la descripción del proceso para realizar las pruebas de ganancia en reversa para una frecuencia dentro de la banda 3400-4000 MHz y la figura de ruido mencionadas, definiendo, primeramente, las condiciones de operación del dispositivo en las mediciones a ejecutar y, después, el uso de las diversas configuraciones del sistema, el siguiente paso fue el desarrollar una tabla de resultados a partir de los datos eléctricos obtenidos del ejemplar de referencia de módulo de recepción previamente utilizado para las mediciones anteriores. Dicho esto, a continuación, se muestra la tabla con las mediciones mencionadas:

Tabla 4.9 – Resultados de mediciones de ganancia en reversa y figura de ruido para el módulo de recepción medido con el sistema de caracterización secuencial sin calibrar y con el equipo manual de laboratorio calibrado.

Mediciones de rutina de caracterización	Nivel de amplificación	Datos sin calibración	Datos de laboratorio	Delta sin calibración
Ganancia en reversa para frecuencia dentro de banda	Bajo	-42.217 dB	-40.026 dB	2.191 dB
Figura de ruido		6.398 dB	5.032 dB	1.366 dB
Ganancia en reversa para frecuencia dentro de banda	Medio	-40.316 dB	-37.941 dB	2.375 dB
Figura de ruido		5.507 dB	4.626 dB	0.882 dB
Ganancia en reversa para frecuencia dentro de banda	Alto	-38.67 dB	-36.527 dB	2.143 dB
Figura de ruido		4.448 dB	3.599 dB	0.849 dB

Analizando la tabla, con respecto a la medición de la ganancia en reversa para una frecuencia dentro de la banda, puede observarse que, similar al caso de las ganancias anteriores, la obtenida como valor medido del sistema de caracterización secuencial sin calibración, es más negativa, lo que, indica que la atenuación es más grande al valor esperado con el equipo de laboratorio calibrado. Sin embargo, como ya se había mencionado, esto es normal dado a que el sistema tiene más pérdidas en comparación con la instrumentación utilizada en laboratorio, agregando atenuación indeseada.

Finalmente, analizando la figura de ruido, tendremos que, el valor esperado de laboratorio indica que entre menor sea el nivel de amplificación del dispositivo, se tendrá una figura de ruido mayor. Dicho esto, también, puede observarse que, los valores obtenidos de las mediciones promedio del sistema, denotan un factor de ruido más alto que el esperado, superándolo por más de 0.8dB, la razón de esto se debe a que, el sistema contiene componentes que están aportando un ruido extra al esperado en el modelo de tres etapas expuesto anteriormente, y añadido a esto, el ruido electromagnético ambiente también puede afectar esta medición.

5 Capítulo 5: Diseño de rutina de calibración y resultados de calibrar el sistema de caracterización secuencial

En esta sección, se explicará el desarrollo del diseño de la rutina de calibración para el sistema de caracterización secuencial, en donde, primero se explica los conceptos de los métodos de calibración a utilizar y después, se dividirá al sistema en cinco secciones que serán caracterizadas con el fin de obtener todos sus parámetros eléctricos, a su vez, se mostrarán las mediciones requeridas en la rutina de calibración para poder realizar lo mencionado, así como, la generación y solución de un sistema de ecuaciones que resulta de dicha rutina. Después, una vez obtenidos los parámetros eléctricos del sistema como resultado de la solución del sistema de ecuaciones, estos, se almacenarán en un archivo de calibración que es requerido para el proceso de compensación o calibración de las mediciones de la rutina de caracterización del módulo de recepción y, finalmente, se compararán los resultados de estas sin calibración y con calibración en contraste con los datos obtenidos de laboratorio para un ejemplar del módulo de recepción seleccionado.

5.1 Selección de métodos de calibración Puente-Reflejante-Línea y reflectometría en el dominio de la frecuencia aplicados al sistema de caracterización

Con el fin de reducir o mitigar los errores sistemáticos de nuestro sistema de caracterización, en base a los estudios en la literatura [29-33], se decidió aplicar dos métodos de calibración para obtener las pérdidas, reflexiones y datos eléctricos de los circuitos a utilizar para efectuar las mediciones de caracterización. Estos métodos de calibración fueron el método de Puente-Reflejante-Línea, conocido como método TRL por sus siglas en inglés (Thru-Reflect-Line) así como, el método de reflectometría en el dominio de la frecuencia o bien, método FDR por sus siglas en inglés. El método TRL es un método similar a otro muy conocido llamado método Corto Circuito-Circuito Abierto-Carga-Puente (método SOLT por sus siglas en inglés), en donde, para estos dos, se utilizan distintos elementos conocidos como cargas estándar de calibración que cuentan con una impedancia conocida, las cargas estándar más comunes son el circuito abierto, corto circuito, puentes e impedancias de 50 ohms [29-33].

El propósito de las cargas estándar es el auditar las mediciones que provee el sistema en base a un valor teórico esperado, de modo que, el método TRL tiene una ventaja sobre el SOLT dado a que, todas sus cargas estándar de calibración son redes de dos puertos mientras que el SOLT solo maneja de un puerto [31-33], facilitando el uso del método TRL para sistemas como el nuestro que utilizan tarjetas de circuitos impresos para interconectar sus componentes en diversas secciones para caracterizar el módulo de recepción. Es por esto por lo que, para el sistema de caracterización

que se ha elaborado en este trabajo de investigación, utilizaremos el método TRL, tomando como cargas estándar de calibración una red de referencia previamente caracterizada que funcionará como un puente y una carga de línea (thru y line) y, una carga de circuito abierto al terminar abruptamente con la interfaz aire las dos líneas de transmisión de los tableros donde se encontrará el módulo de recepción por caracterizar. A continuación, en la siguiente figura se muestra una foto de la red de referencia de dos puertos utilizada para el método de calibración:



Figura 5.1 – Foto de red de referencia utilizada para calibrar el sistema de caracterización secuencial.

Ahora bien, el método de calibración por reflectometría en el dominio de la frecuencia (método FDR), normalmente se utiliza para cuantificar aquellas pérdidas en las líneas de transmisión y tableros que se utilizan en la caracterización al estar conectados en los puertos de medición de los instrumentos manuales o modulares. En este método, se hace uso de una carga totalmente reflejante como un circuito abierto o un corto circuito, con el fin de medir la onda que se refleja después de aplicar una señal de cierta frecuencia al sistema, de esta manera, como en base a la teoría, toda la potencia de la señal deberá reflejarse en la carga reflejante, esto nos ayuda a deducir las pérdidas en los componentes del sistema en función de que tan atenuada está la onda reflejada medida por el instrumento [30].

En el caso de nuestro sistema de caracterización secuencial, fue conveniente seleccionar la carga reflejante que ya utilizábamos en el método TRL, que fue el circuito abierto, la ventaja del circuito abierto sobre el corto circuito es que, es mucho más sencillo aplicar un circuito abierto en cualquier sección del sistema dado a que solamente tenemos que conectar la línea de transmisión al aire, en contraste con el corto circuito que forzosamente nos obliga a utilizar componentes adicionales. El uso de corto circuito o circuito abierto como carga reflejante solo cambia la fase con que la onda

reflejada regresa al instrumento de medición, sin embargo, en nuestro sistema solo estamos midiendo la magnitud de la potencia real promedio del dispositivo a caracterizar, por lo que, la fase no es relevante para nuestro estudio.

5.2 Secciones del sistema y mediciones de calibración

Para desarrollar la nueva rutina de calibración basada en 8 mediciones aplicando tanto el método TRL como el método FDR, fue necesario cambiar el enfoque en el análisis del sistema, para esto, el sistema mostrado se dividió en cinco secciones determinadas por planos y redes de calibración:

- **Plano de calibración de generadores:** Este es el plano de referencia correspondiente a los generadores de señales, los cuales, aplican el estímulo o señal de radiofrecuencia que incide en el sistema y viaja hasta el dispositivo a caracterizar por el mismo. Está conformado por el combinador que se encarga de unir las señales de ambos generadores y, el puerto principal del acoplador direccional del sistema.
- **Plano de calibración de analizador de espectro:** Este plano de referencia representa la sección del analizador de espectro, el cual, se encarga de medir las señales deseadas para cada una de las pruebas. En donde, este plano de calibración está conformado por el puerto secundario de retorno del acoplador direccional y del switch 6, que se encarga de llevar la señal al analizador de espectro.
- **Red a puerto de entrada:** Esta sección está conformada por el puerto 0 del switch 1, así como por los switches 2 y 3, hasta el puerto de entrada del módulo de recepción. Esta red, se encarga de llevar la señal de radiofrecuencia hasta el puerto de entrada del dispositivo a caracterizar, así como, de ajustar la carga a 50 ohms en la entrada cuando se requiera.
- **Red a puerto de salida:** Esta parte del sistema contiene el puerto 1 del switch 1, así como los switches 4 y 5, hasta el puerto de salida del módulo. Esta sección, se enfoca en guiar la señal de radiofrecuencia hasta el puerto de salida del dispositivo a caracterizar, y también, de ajustar la carga a 50 ohms en la salida cuando se necesite.
- **Red de amplificación y atenuación:** Esta última red, contiene el atenuador variable y el amplificador de bajo ruido del sistema, en donde, el atenuador puede ajustarse a 0 dB o 40 dB según se requiera en la prueba deseada, para que, junto con la amplificación posterior, obtengamos el nivel de ganancia o atenuación deseado en la red previo a llegar al analizador de espectro.

A continuación, en la siguiente figura se muestra el sistema dividido en las secciones mencionadas:

Planos de referencia de calibración y redes en tableros de caracterización

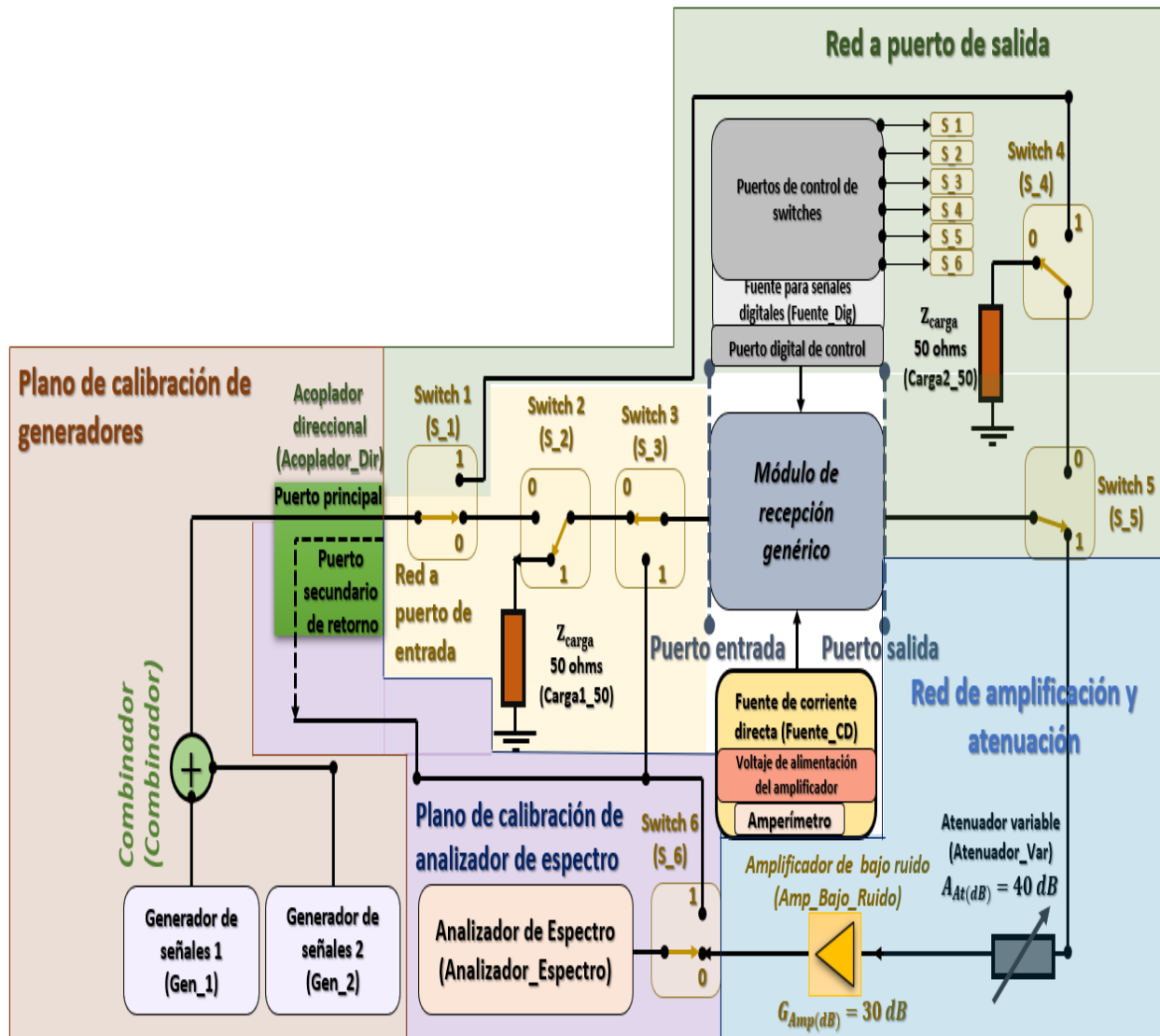


Figura 5.2 – Sistema de caracterización secuencial dividido en 5 secciones para rutina de calibración.

Ahora que hemos dividido el sistema de caracterización en las secciones mostradas, el siguiente paso fue el de definir las 8 mediciones de calibración a ejecutar en cada plano y red de calibración, así como las cargas estándar que se utilizarían para cada caso y, la configuración de los switches para dirigir la señal por cada sección respectiva del sistema. Esto, se logró después de un análisis de todos los elementos que componen los circuitos de caracterización, de modo que, la secuencia de mediciones de calibración a llevar a cabo se puede definir por la siguiente tabla:

Tabla 5.1 – Tabla de mediciones de rutina de calibración con las cargas estándar y posición de los switches.

Mediciones de rutina de calibración	Carga estándar	Switch 1	Switch 2	Switch 3	Switch 4	Switch 5	Switch 6
1. Onda reflejada en salida del acoplador direccional con circuito abierto	Circuito abierto	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	1
2. Onda reflejada en red de entrada con circuito abierto	Circuito abierto	0	0	0	0	0	1
3. Onda reflejada en red de salida con circuito abierto	Circuito abierto	1	1	0	1	0	1
4. Onda reflejada en red de entrada con red de referencia	Red de referencia	0	0	0	0	0	1
5. Onda reflejada en red de salida con red de referencia	Red de referencia	1	1	0	1	0	1
6. Potencia de salida utilizando red de referencia (atenuador en 0 dB)	Red de referencia	0	0	0	0	1	0
7. Potencia de salida utilizando red de referencia (atenuador en 40 dB)	Red de referencia	0	0	0	0	1	0
8. Potencia de salida en reversa utilizando red de referencia	Red de referencia	1	1	1	1	0	1

Después de realizar las mediciones pertinentes de calibración a las distintas secciones mostradas, será posible generar un archivo que contiene todos los parámetros eléctricos de caracterización del sistema, de modo que, los datos sobre las pérdidas y reflexiones de cada elemento sea encontrado ahí para corregir las desviaciones de las mediciones de la rutina de caracterización al caracterizar un módulo de recepción. Así, el sistema diseñado conseguirá resultados muy similares a los obtenidos con el equipo de laboratorio manual, el cual, también fue calibrado utilizando las mismas cargas estándar usando sus propios procedimientos manuales.

5.3 Medición 1: Onda reflejada en salida del acoplador direccional con circuito abierto

De acuerdo con la nueva rutina de calibración basada en 8 mediciones, para la primera de ellas, primero, se desconectarán todas las secciones del sistema (provocando un circuito abierto), excepto por la del plano de calibración de los generadores y el del analizador de espectro. Así, se medirá la onda de potencia saliente de ambos generadores de señales pasando por el combinador y el acoplador direccional, en donde, en este último, al estar en circuito abierto, se reflejará toda la señal en ese punto, regresando por el puerto secundario de retorno, pasando por el switch 6 hasta llegar al analizador de espectro, como se muestra en la siguiente figura:

Medición 1: Onda reflejada en salida del acoplador direccional con circuito abierto

Tabla de estados de calibración

Configuración	Switch 1	Switch 2	Switch 3	Switch 4	Switch 5	Switch 6
Medición 1	NA	NA	NA	NA	NA	1
Medición 2	0	0	0	0	0	1
Medición 3	1	1	0	1	0	1
Medición 4	0	0	0	0	0	1
Medición 5	1	1	0	1	0	1
Medición 6	0	0	0	0	1	0
Medición 7	0	0	0	0	1	0
Medición 8	1	1	1	1	0	1

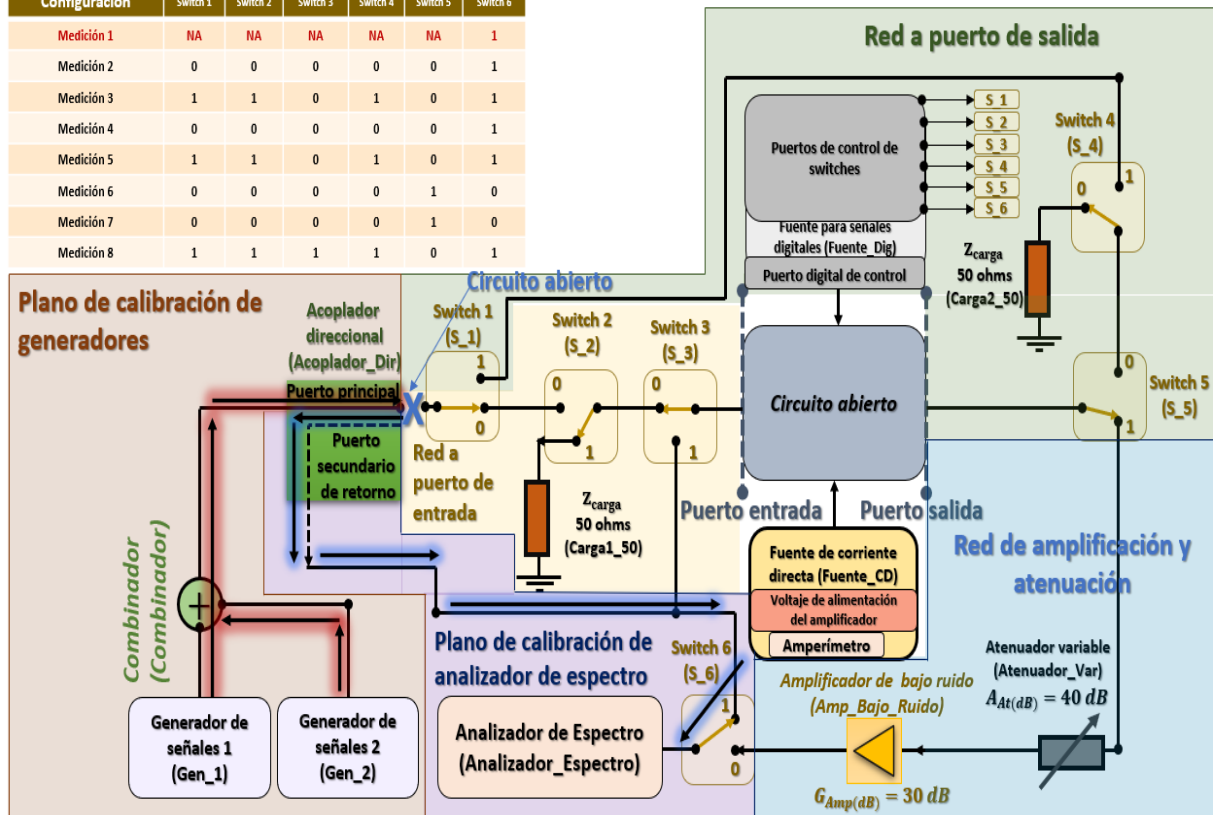


Figura 5.3 – Sistema configurado para medición 1 de rutina de calibración. Las flechas rojas indican dirección saliente de los generadores y, las azules, las ondas reflejadas.

Previamente a la ejecución de la medición, la interfaz del sistema de caracterización mostrará un cuadro de diálogo dándole instrucciones al usuario, como se muestra a continuación:

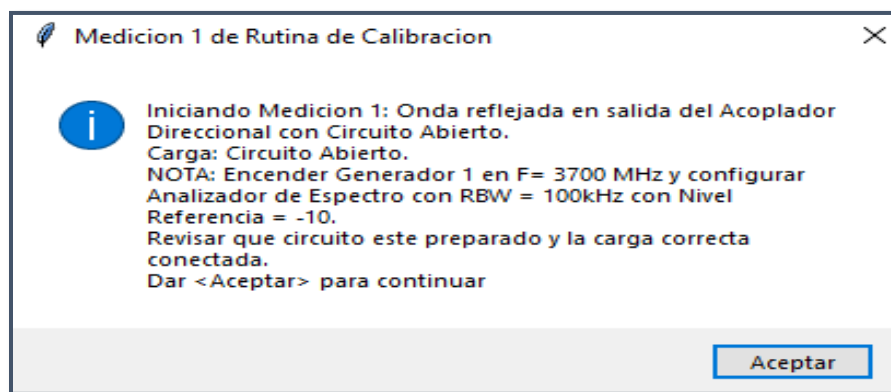


Figura 5.4 – Cuadro de diálogo con instrucción de medición 1 de calibración.

De esta manera, podemos obtener una ecuación para la potencia medida “ $P_{Medida1}(dBm)$ ” en base a la potencia de entrada aplicada “ $P_{Entrada}(dBm)$ ”, la atenuación del acoplador direccional “ $A_{AcDir}(dB)$ ”, su factor de acoplamiento “ $FA_{AcDir}(dB)$ ” y la atenuación combinada del combinator y el switch 6 “ $A_{Comb-S6}(dB)$ ”:

$$P_{Medida1}(dBm) = P_{Entrada}(dBm) + (A_{AcDir}(dB) + FA_{AcDir}(dB)) + A_{Comb-S6}(dB)$$

5.4 Medición 2: Onda reflejada en red de entrada con circuito abierto

Para la medición 2, obtendremos la pérdida de retorno en la sección correspondiente a la red a puerto de entrada del dispositivo a caracterizar, sin embargo, para este caso, esta, se conectará a una carga estándar de circuito abierto [29-33]. Por lo tanto, la señal de potencia aplicada que sale por el puerto principal del acoplador direccional (plano de calibración de generadores) recorrerá los puertos “0” de los switches 1, 2 y 3, hasta llegar al puerto de entrada donde se encuentra el circuito abierto. En este punto, dado a que, el circuito abierto es una carga con un coeficiente de reflexión de $|\Gamma_{CA}| = 1$ o bien, $|\Gamma_{CA}|^2 = 1$, al manejar unidades de potencia, toda la señal se reflejará de vuelta, pasando de nuevo por los switches, llegando al puerto secundario de retorno del acoplador direccional hasta terminar en el analizador de espectro. Es importante mencionar que, los switches son bidireccionales y, tienen el mismo comportamiento o atenuación sin importar el sentido de la señal que pasa por ellos, a su vez, su atenuación entre puertos (0 o 1) es igual. En la siguiente figura, se puede apreciar el flujo de la señal en el sistema para esta medición:

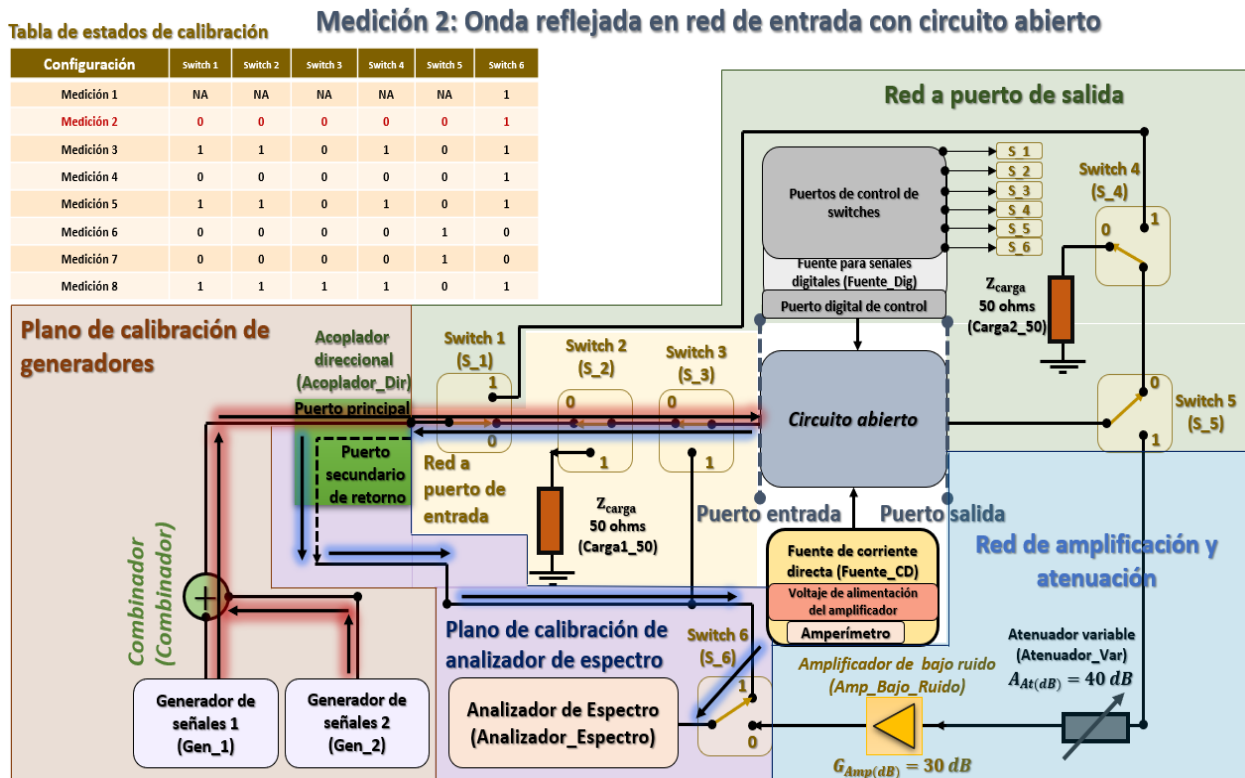


Figura 5.5 – Sistema configurado para medición 2 de rutina de calibración. Las flechas rojas indican dirección saliente de los generadores y, las azules, las ondas reflejadas.

Antes de realizar la medición 2, la interfaz del sistema mostrará el siguiente cuadro de dialogo:

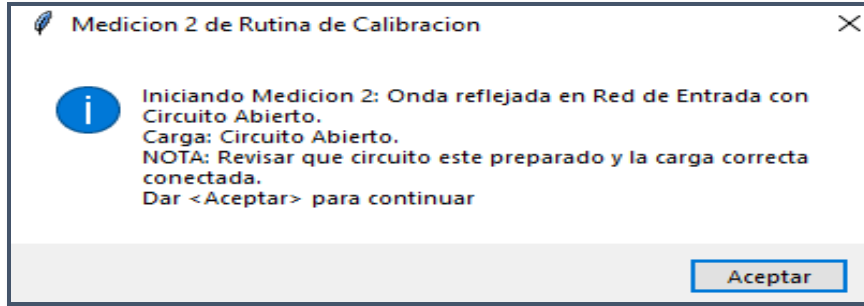


Figura 5.6 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 2 de calibración.

Similarmente, obtenemos una ecuación a partir de la potencia medida “ $P_{Medida2}(dBm)$ ”, que, al compararla con la de entrada y, las distintas atenuaciones, da como resultado la pérdida de retorno de la red de entrada al conectarse a una carga de circuito abierto “ $PR_{RedEntrada-CA}(dB)$ ”:

$$PR_{RedEntrada-CA}(dB) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + FA_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) - P_{Medida2}(dBm)$$

5.5 Medición 3: Onda reflejada en red de salida con circuito abierto

En este caso, se conseguirá la pérdida de retorno en la sección de la red al puerto de salida del dispositivo a caracterizar, similarmente, de nuevo, utilizaremos un circuito abierto. Para esta medición, la señal aplicada que sale del puerto principal del acoplador direccional circula por los switches 1, 4 y 5 hasta llegar al puerto de salida, en donde, al tener nuevamente un circuito abierto con $|\Gamma_{CA}|^2 = 1$, la señal se reflejará totalmente hasta llegar al analizador de espectro. En la siguiente imagen, se muestra la medición 3 de la rutina de calibración:

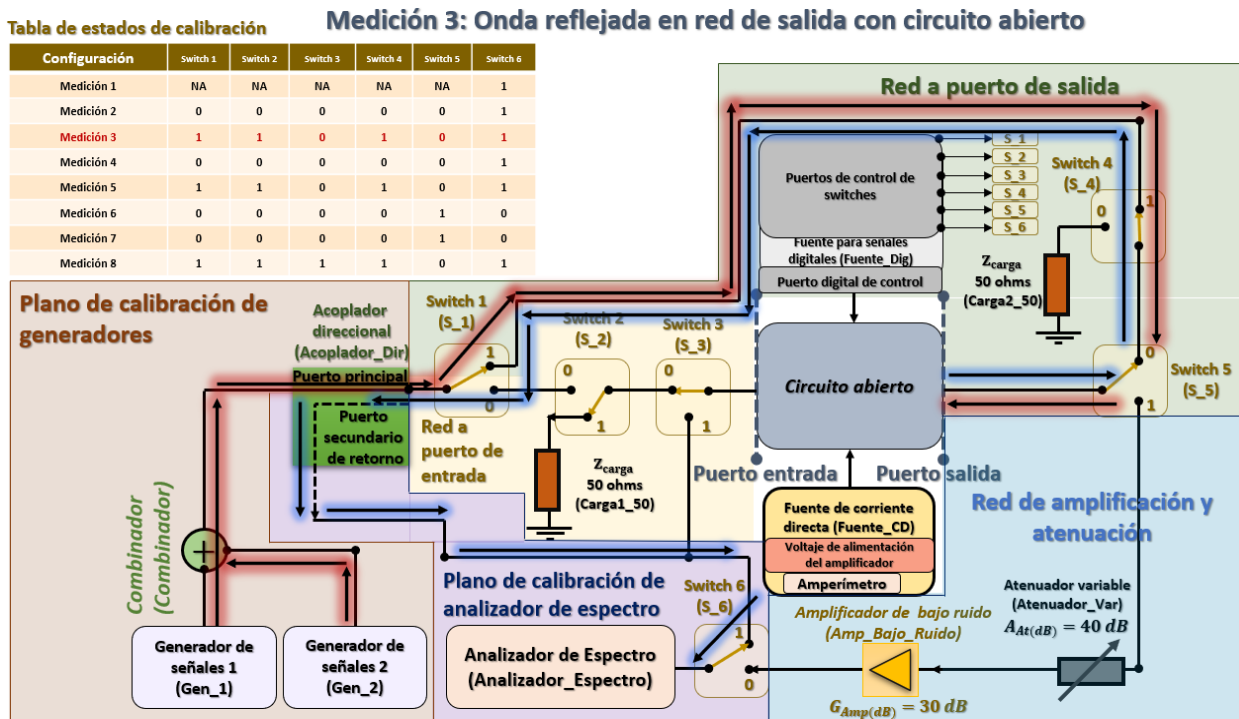


Figura 5.7 – Sistema configurado para medición 3 de rutina de calibración.

Similarmente, la interfaz del sistema de caracterización lanzará el siguiente cuadro de dialogo para guiar al usuario:

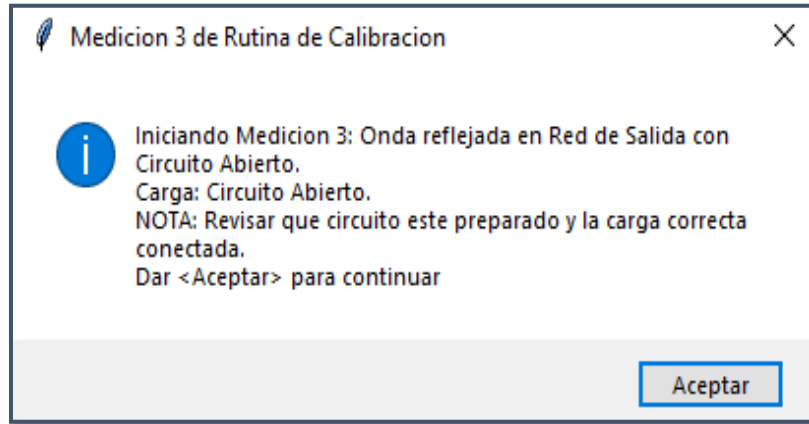


Figura 5.8 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 3 de calibración.

Para esta medición, también obtendremos una ecuación que nos representará la pérdida de retorno en la red de salida al estar conectada al circuito abierto “ $PR_{RedSalida-CA(dB)}$ ”:

$$PR_{RedSalida-CA(dB)} = (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + FA_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)}) - P_{Medida3(dBm)}$$

Es importante mencionar en este punto que, el valor de la pérdida de retorno de la red conectada a un circuito abierto y después, a una red de referencia (como en las siguientes mediciones), nos ayudará a obtener los parámetros de la red, como su atenuación total en función de su coeficiente de reflexión y su ganancia interna, con el fin de utilizar esta información para la calibración de las pérdidas del sistema de caracterización.

5.6 Medición 4: Onda reflejada en red de entrada con red de referencia

Para la medición 4, se realizará el mismo procedimiento de la medición 2, sin embargo, en vez de utilizar un circuito abierto, la carga estándar será una red de referencia previamente caracterizada [29-33]. Esta carga, tiene una atenuación y unos coeficientes de reflexión de entrada o salida ya conocidos, los cuales, se obtuvieron en base a mediciones con equipo de laboratorio. Por lo tanto, nos servirá como referencia en conjunto con los datos obtenidos al usar un circuito abierto para caracterizar las redes que van a los puertos de entrada y salida. A continuación, se muestra un esquema de esta medición:

Tabla de estados de calibración

Medición 4: Onda reflejada en red de entrada con red de referencia

Configuración	Switch 1	Switch 2	Switch 3	Switch 4	Switch 5	Switch 6
Medición 1	NA	NA	NA	NA	NA	1
Medición 2	0	0	0	0	0	1
Medición 3	1	1	0	1	0	1
Medición 4	0	0	0	0	0	1
Medición 5	1	1	0	1	0	1
Medición 6	0	0	0	0	1	0
Medición 7	0	0	0	0	1	0
Medición 8	1	1	1	1	0	1

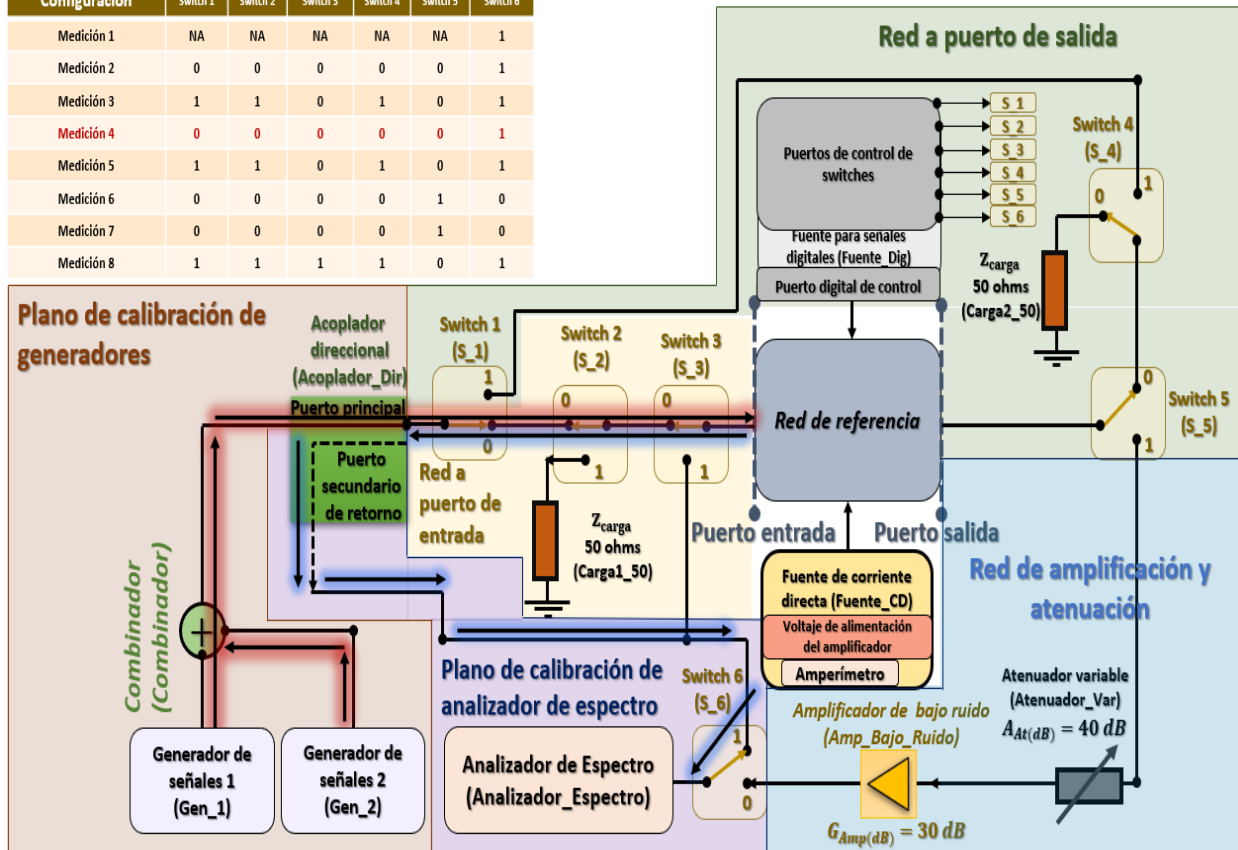


Figura 5.9 – Sistema configurado para medición 4 de rutina de calibración. Las flechas rojas indican dirección saliente de los generadores y, las azules, las ondas reflejadas.

Previamente a la medición, la interfaz gráfica mostrara el cuadro de dialogo siguiente:

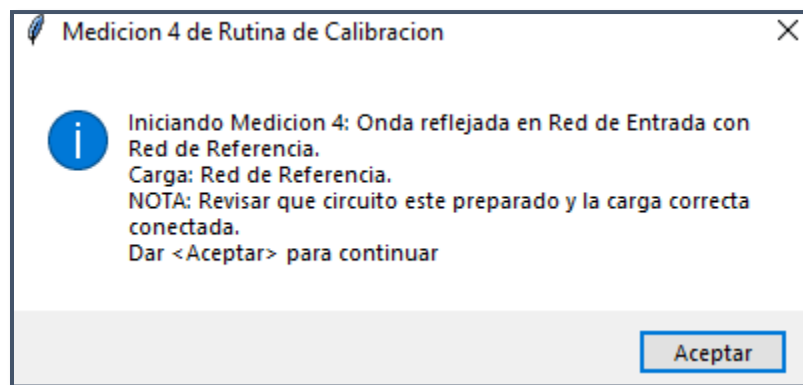


Figura 5.10 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 4 de calibración.

Del mismo modo, conseguiremos una ecuación que nos representará la pérdida de retorno en la red de entrada al estar conectada a la red de referencia “ $PR_{RedEntrada-RedReferencia}(dB)$ ”:

$$PR_{RedEntrada-RedReferencia}(dB) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + FA_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) - P_{Medida4}(dBm)$$

5.7 Medición 5: Onda reflejada en red de salida con red de referencia

En la medición 5, similarmente, se seguirá el procedimiento de la medición 3, pero, la carga estándar será la red de referencia previamente caracterizada en laboratorio. La siguiente figura, muestra este proceso:

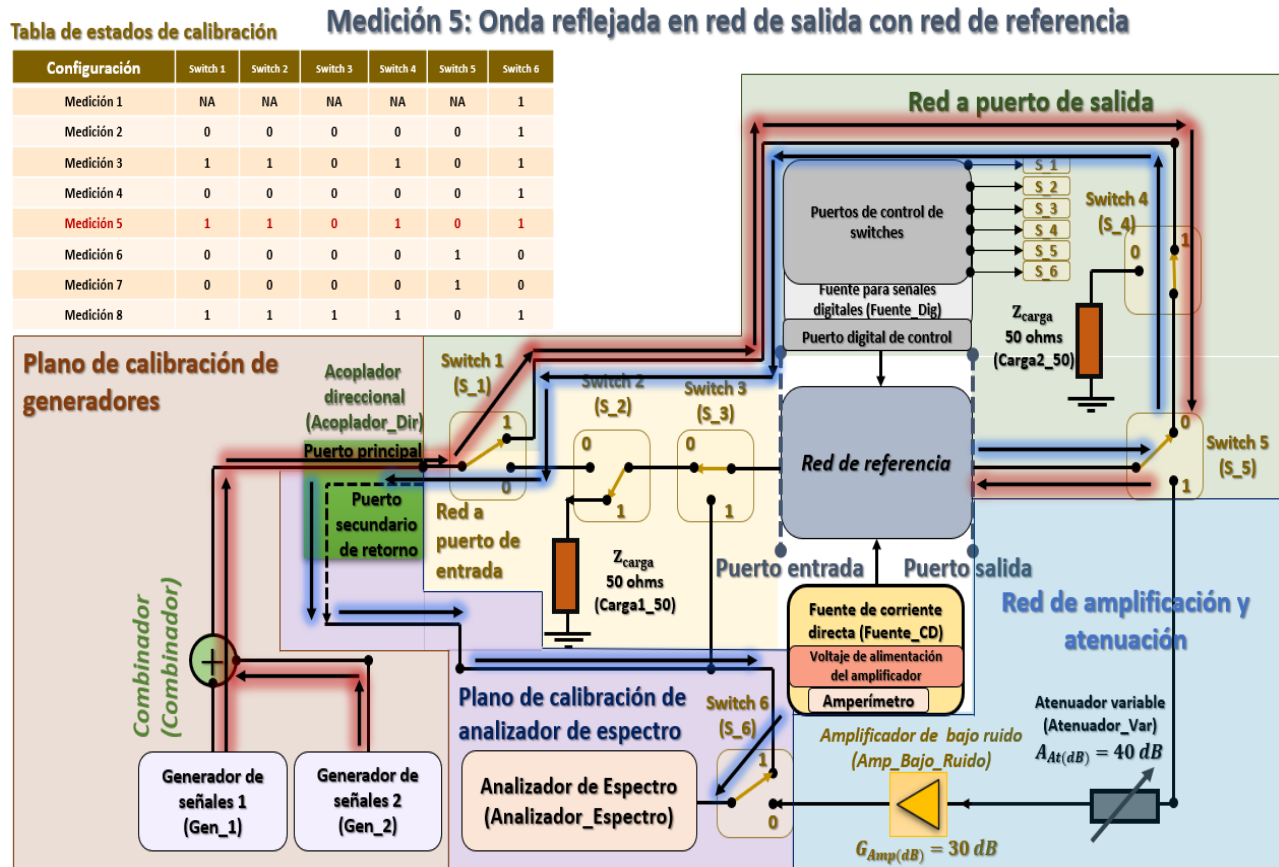


Figura 5.11 – Sistema configurado para medición 5 de rutina de calibración.

Así mismo, el sistema dará la siguiente instrucción al usuario:

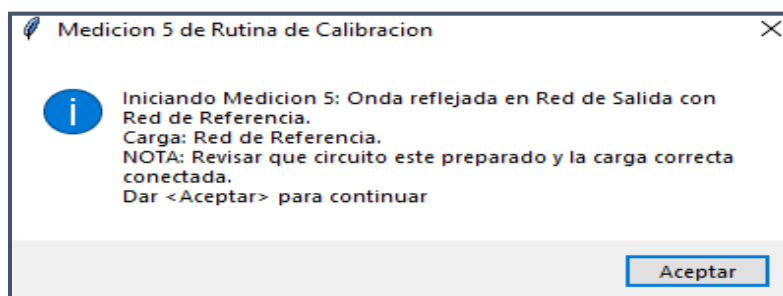


Figura 5.12 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 5 de calibración.

De nuevo, obtendremos una ecuación que nos representará la pérdida de retorno en la red de salida al estar unida a la red de referencia “ $PR_{RedSalida-RedReferencia}(dB)$ ”:

$$PR_{RedSalida-RedReferencia(dB)} = (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + FA_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)}) - P_{Medida5(dBm)}$$

5.8 Medición 6: Potencia de salida utilizando la red de referencia (atenuador en 0 dB)

El propósito principal de esta medición en conjunto con la 7 y 8 posteriores, radica en caracterizar la red de amplificación y atenuación, la cual, consta del puerto “1” del switch 5 en conjunto con un atenuador variable (que, puede configurarse en 0 dB o 40 dB de atenuación), en serie con un amplificador de bajo ruido (con una ganancia fija de 30 dB); así, al estar en serie estos elementos, idealmente, si el atenuador se configura para tener 40 dB de atenuación, al añadir la ganancia del amplificador tendríamos una atenuación ideal de -10dB, sin embargo, si se programa el atenuador en 0 dB (funcionando parecido a la red de referencia), tendríamos una ganancia ideal de +30 dB en la red. Obviamente, el caso ideal es aquel en donde no existen pérdidas indeseadas en la red o por los switches, por lo tanto, es necesario ejecutar mediciones que nos ayuden a calibrar estas pérdidas con el fin de corregir lo necesario para que la red de amplificación y atenuación se comporte similar al caso ideal.

Dicho esto, para este caso, la señal que sale del puerto principal del acoplador direccional se dirige por los puertos “0” de los switches 1, 2 y 3, llegando al puerto de entrada de la red de referencia, para después cruzar por este, pasando por el switch 5, el atenuador en 0 dB y el amplificador de bajo ruido hasta llegar al analizador de espectro al cruzar por el switch 6. Como se muestra en la siguiente figura:

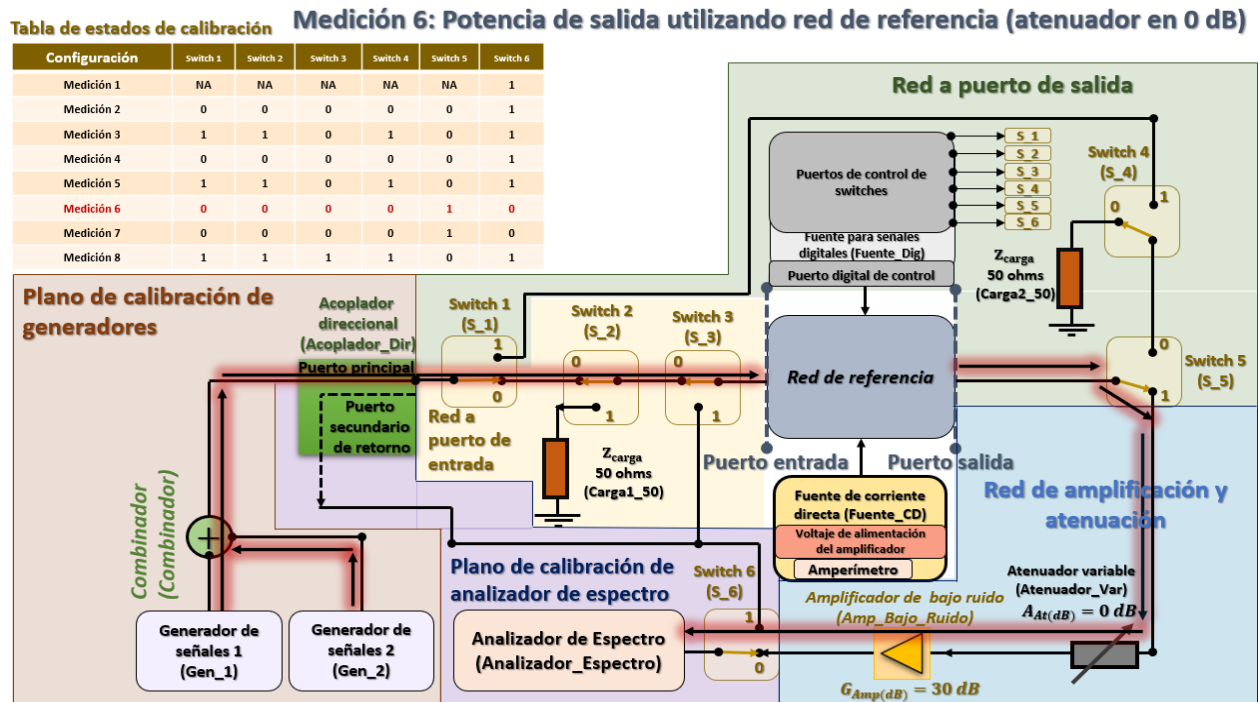


Figura 5.13 – Sistema configurado para medición 6 de rutina de calibración. Las flechas rojas indican dirección saliente de los generadores.

Similarmente a las mediciones anteriores, el sistema mostrará el siguiente cuadro de dialogo:

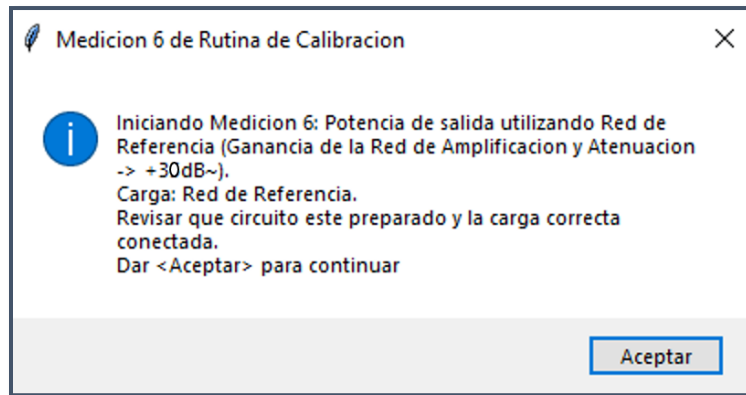


Figura 5.14 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 6 de calibración.

Ahora, al medir la potencia “ $P_{Medida6(dBm)}$ ”, considerando la atenuación de la red de entrada “ $A_{RedEntrada(dB)}$ ”, de la red de referencia “ $A_{RedReferencia(dB)}$ ” y de la red de amplificación y atenuación al estar el atenuador en 0 dB “ $A_{RedAmpAt(0)(dB)}$ ”, llegaremos a la siguiente ecuación:

$$P_{Medida6(dBm)} = (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)}) + A_{RedEntrada(dB)} + A_{RedReferencia(dB)} + A_{RedAmpAt(0)(dB)}$$

5.9 Medición 7: Potencia de salida utilizando la red de referencia (atenuador en 40 dB)

Para la medición 7, el procedimiento será exactamente igual, la única diferencia es que, en este caso, el atenuador estará configurado en 40 dB, por lo que, llegamos a la siguiente ecuación:

$$P_{Medida7(dBm)} = (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)}) + A_{RedEntrada(dB)} + A_{RedReferencia(dB)} + A_{RedAmpAt(40)(dB)}$$

5.10 Medición 8: Potencia de salida en reversa utilizando la red de referencia

Finalmente, para la medición 8, ajustaremos el sistema de caracterización muy similarmente al caso de la medición de la ganancia en reversa para la rutina de caracterización, pero, en vez del módulo a probar, utilizaremos la red de referencia. De esta manera, la señal de potencia que sale del acoplador direccional se dirige por el switch 1, 4 y 5 hasta llegar al puerto de salida de la red de referencia, cruzando por este, para salir por el puerto de entrada y, por medio del switch 3, la señal es llevada al switch 6 para ser muestreada por el analizador de espectro.

A continuación, la siguiente figura muestra la medición 8 de la rutina de calibración en el sistema:

Tabla de estados de calibración

Medición 8: Potencia de salida en reversa utilizando red de referencia

Configuración	Switch 1	Switch 2	Switch 3	Switch 4	Switch 5	Switch 6
Medición 1	NA	NA	NA	NA	NA	1
Medición 2	0	0	0	0	0	1
Medición 3	1	1	0	1	0	1
Medición 4	0	0	0	0	0	1
Medición 5	1	1	0	1	0	1
Medición 6	0	0	0	0	1	0
Medición 7	0	0	0	0	1	0
Medición 8	1	1	1	1	0	1

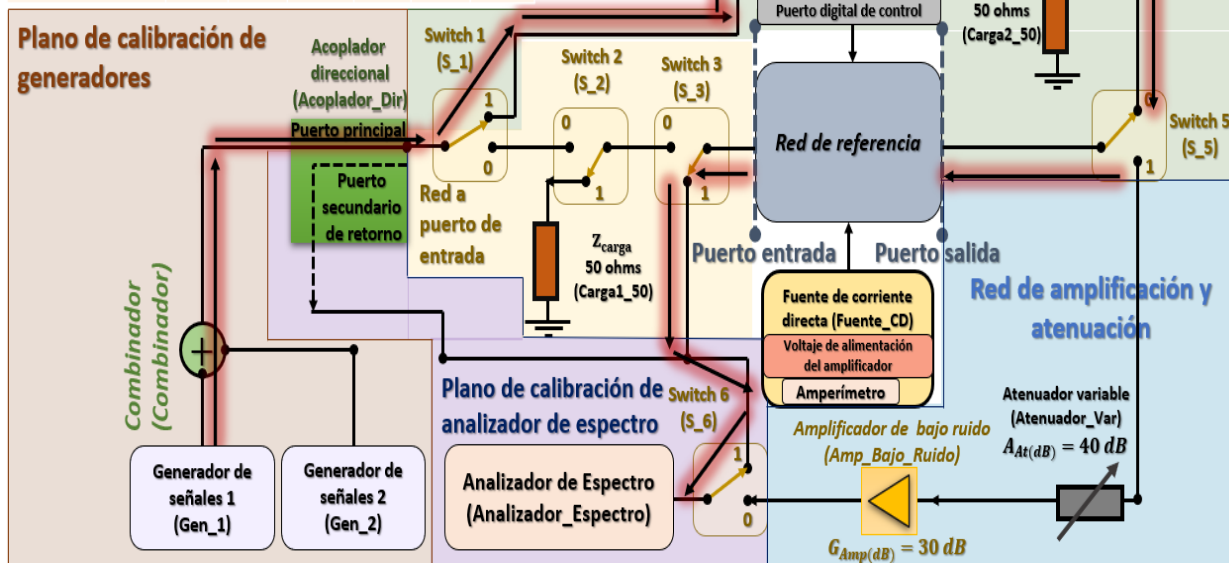


Figura 5.15 – Sistema configurado para medición 8 de rutina de calibración. Las flechas rojas indican dirección saliente de los generadores.

Como ultima instrucción, el sistema desplegará el siguiente cuadro de dialogo:

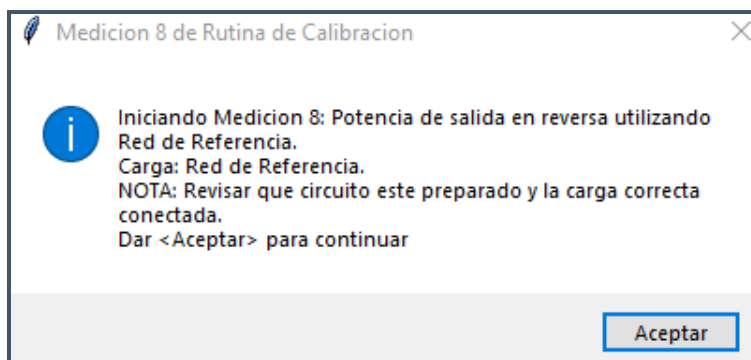


Figura 5.16 – Cuadro de dialogo con instrucción de medición 8 de calibración.

De esta manera, al medir la potencia “ $P_{Medida8(dBm)}$ ”, considerando la atenuación de la red de salida “ $A_{RedSalida(dB)}$ ”, de la red de referencia “ $A_{RedReferencia(dB)}$ ”, del switch 3 “ $A_{S3(dB)}$ ”, acoplador direccional “ $A_{AcDir(dB)}$ ” y, del combinator en conjunto con el switch 6 “ $A_{Comb-S6(dB)}$ ”, llegaremos a la ecuación siguiente:

$$P_{Medida8}(dBm) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) + A_{RedSalida}(dB) + A_{RedReferencia}(dB) + A_{S3}(dB)$$

Una vez que se hayan ejecutado las 8 mediciones de calibración, el sistema confirmará al usuario que se ha generado un reporte de las mediciones de calibración y que, se procederá a calcular las pérdidas y coeficientes de reflexión del sistema, como se muestra a continuación:

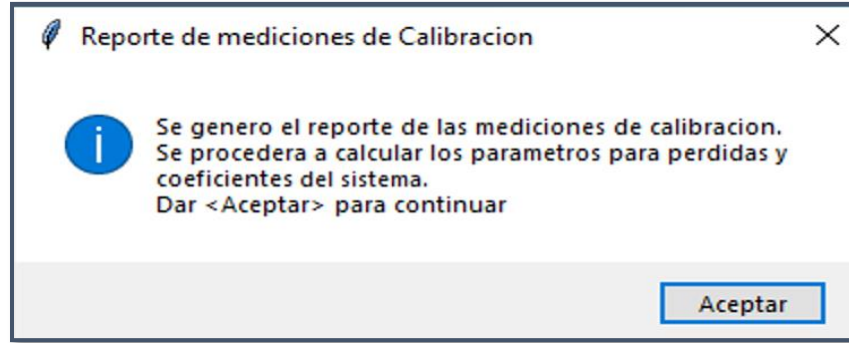


Figura 5.17 – Cuadro de dialogo de reporte de mediciones de calibración.

5.11 Sistema de ecuaciones de rutina de calibración

Ahora que, han sido analizadas las 8 mediciones, podemos generar el siguiente sistema de ecuaciones:

$$P_{Medida1}(dBm) = P_{Entrada}(dBm) + (A_{AcDir}(dB) + FA_{AcDir}(dB)) + A_{Comb-S6}(dB)$$

$$PR_{RedEntrada-CA}(dB) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + FA_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) - P_{Medida2}(dBm)$$

$$PR_{RedSalida-CA}(dB) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + FA_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) - P_{Medida3}(dBm)$$

$$PR_{RedEntrada-RedReferencia}(dB) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + FA_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) - P_{Medida4}(dBm)$$

$$PR_{RedSalida-RedReferencia}(dB) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + FA_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) - P_{Medida5}(dBm)$$

$$P_{Medida6}(dBm) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) + A_{RedEntrada}(dB) + A_{RedReferencia}(dB) + A_{RedAmpAt(0)}(dB)$$

$$P_{Medida7}(dBm) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) + A_{RedEntrada}(dB) + A_{RedReferencia}(dB) + A_{RedAmpAt(40)}(dB)$$

$$P_{Medida8}(dBm) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) + A_{RedSalida}(dB) + A_{RedReferencia}(dB) + A_{S3}(dB)$$

Antes de comenzar a trabajar con cada una de las ecuaciones anteriores, es necesario mencionar que, como el acoplador direccional es uno de los elementos más importantes del sistema, puesto a que, se utiliza tanto para transmitir la señal de los generadores como para recibir las ondas reflejadas, es necesario caracterizarlo previo a su integración al sistema. Como este elemento

básicamente se conforma de dos guías de onda rígidas con ciertas terminaciones internas de 50 ohms, es capaz de soportar altas potencias sin modificar sus propiedades eléctricas a través del tiempo, por lo tanto, bastará con caracterizarlo una sola vez cada cierta cantidad de meses como parte de su mantenimiento preventivo, en contraste con los demás elementos que se calibrarán en cada ocasión que se requiera preparar el sistema de caracterización.

Dicho esto, previamente a la rutina de calibración, ya conoceremos la atenuación del puerto principal del acoplador direccional, así como su factor de acoplamiento en su puerto secundario de retorno. En donde, para el acoplador que usaremos en nuestro caso, su atenuación en el puerto principal será de $A_{AcDir(dB)} = -0.9 dB$, mientras que, su factor de acoplamiento de $FA_{AcDir(dB)} = -20.3 dB$. A su vez, para cada una de las mediciones de la rutina de calibración, cada generador aplicará una señal individual en la frecuencia de 3700 MHz, por lo que, al ser sumadas en el combinador, obtendremos una potencia total de $1\mu W$ aplicada al sistema, o bien, $P_{Entrada(dBm)} = -30 dBm$ en unidades de decibeles.

Ahora, para resolver nuestro sistema de ecuaciones, comenzaremos con la ecuación de la **medición 1**, en donde, obtuvimos una potencia medida de $P_{Medida1(dBm)} = -52.3 dBm$ en el analizador de espectro al ejecutar dicha medición. Como ya conocemos que nuestro acoplador direccional cuenta con $A_{AcDir(dB)} = -0.9 dB$ y un $FA_{AcDir(dB)} = -20.3 dB$, podremos resolver para el valor de la atenuación integrada del combinador y el switch 6, los cuales, son elementos por los que la señal siempre pasará independientemente de la medición que realicemos con el sistema:

$$P_{Medida1(dBm)} = P_{Entrada(dBm)} + (A_{AcDir(dB)} + FA_{AcDir(dB)}) + A_{Comb-S6(dB)}$$

$$A_{Comb-S6(dB)} = P_{Medida1(dBm)} - P_{Entrada(dBm)} - (A_{AcDir(dB)} + FA_{AcDir(dB)})$$

$$A_{Comb-S6(dB)} = -52.3 dBm + 30 dBm + 0.9 dB + 20.3 dB = -1.1 dB$$

$$A_{Comb-S6(dB)} = -1.1 dB$$

Para el caso de la **medición 2**, la potencia medida fue $P_{Medida2(dBm)} = -54.059 dBm$, por lo que, calculando la pérdida de retorno en el circuito combinado de la red al puerto de entrada en conjunto con el circuito abierto nos resultará en:

$$PR_{RedEntrada-CA(dB)} = (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + FA_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)}) - P_{Medida2(dBm)}$$

$$PR_{RedEntrada-CA(dB)} = (-30 dBm - 0.9 dB - 20.3 dB - 1.1 dB) - (-54.059 dBm)$$

$$PR_{RedEntrada-CA(dB)} = 1.759 dB$$

Similarmente, para la **medición 3**, la potencia medida fue $P_{Medida3(dBm)} = -55.641 dBm$, por lo tanto, la pérdida de retorno en el circuito combinado de la red al puerto de salida en conjunto con el circuito abierto nos resultará como:

$$PR_{RedSalida-CA(dB)} = (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + FA_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)}) - P_{Medida3(dBm)}$$

$$PR_{RedSalida-CA(dB)} = (-30 \text{ dBm} - 0.9 \text{ dB} - 20.3 \text{ dB} - 1.1 \text{ dB}) - (-55.641 \text{ dBm})$$

$$PR_{RedSalida-CA(dB)} = 3.341 \text{ dB}$$

En este punto, es importante recordar que, para las mediciones 4, 5, 6, 7 y 8, utilizaremos una carga estándar de tipo red de referencia, la cual, fue previamente caracterizada con equipo de laboratorio. La red de referencia que utilizaremos en nuestro caso, tiene una pérdida de retorno en su entrada de $PR_{EntradaRedReferencia(dB)} = 8.262 \text{ dB}$, una pérdida de retorno en su salida de $PR_{SalidaRedReferencia(dB)} = 18.818 \text{ dB}$ y, una atenuación de $A_{RedReferencia(dB)} = -0.55 \text{ dB}$. Así, para el caso de la **medición 4**, a partir de haber obtenido lecturas de potencia medida de $P_{Medida4(dBm)} = -61.873 \text{ dBm}$ en el analizador de espectro, podremos calcular la pérdida de retorno de la red de entrada al estar conectada a la red de referencia:

$$PR_{RedEntrada-RedReferencia(dB)} = (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + FA_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)}) - P_{Medida4(dBm)}$$

$$PR_{RedEntrada-RedReferencia(dB)} = (-30 \text{ dBm} - 0.9 \text{ dB} - 20.3 \text{ dB} - 1.1 \text{ dB}) - (-61.873 \text{ dBm})$$

$$PR_{RedEntrada-RedReferencia(dB)} = 9.573 \text{ dB}$$

De forma similar, para la **medición 5**, como tuvimos una potencia medida de $P_{Medida5(dBm)} = -67.348 \text{ dBm}$, es posible calcular la pérdida de retorno de la red de salida al estar conectada a la red de referencia por medio de la ecuación:

$$PR_{RedSalida-RedReferencia(dB)} = (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + FA_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)}) - P_{Medida5(dBm)}$$

$$PR_{RedSalida-RedReferencia(dB)} = (-30 \text{ dBm} - 0.9 \text{ dB} - 20.3 \text{ dB} - 1.1 \text{ dB}) - (-67.348 \text{ dBm})$$

$$PR_{RedSalida-RedReferencia(dB)} = 15.048 \text{ dB}$$

Ahora bien, es importante recordar que, las mediciones 2, 3, 4 y 5, nos permiten conocer la pérdida de retorno para la red de entrada (conformada por los switches 1, 2 y 3) al conectarse a una carga de circuito abierto o a la red de referencia, y también, la pérdida de retorno para la red de salida (conformada por los switches 1, 4, y 5) también al conectarse a una carga de circuito abierto o red de referencia; sin embargo, a pesar de que conocemos los parámetros de las cargas conectadas, no conocemos aún los parámetros individuales de las redes. Es por esto por lo que, para caracterizar a estas, debemos modelarlas como redes de dos puertos unidas a una carga en un diagrama de múltiples reflexiones, para así, obtener el coeficiente de reflexión total y de ahí, obtener los coeficientes individuales [5, 6, 24], como se puede observar en la siguiente figura:

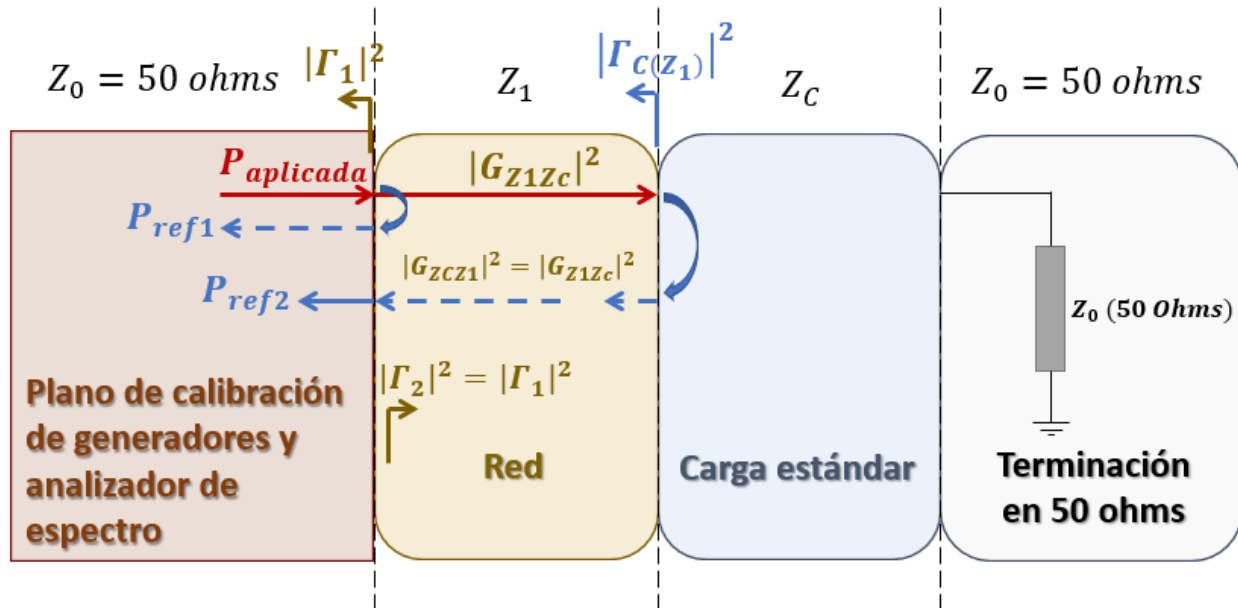


Figura 5.18 – Análisis de reflexiones múltiples en una red conectada a una carga estándar.

Como se muestra en la figura, desde el plano de calibración de los generadores y analizador de espectro, se aplica una señal con cierta potencia conocida “ $P_{aplicada}$ ”, la cual, sufre una primera reflexión “ P_{ref1} ” al incidir en la red, dicha reflexión es proporcional al cuadrado de la magnitud del coeficiente de reflexión 1 “ $|\Gamma_1|^2$ ”. La señal restante que se transmite a la red, es afectada por la ganancia o atenuación interna de esta “ $|G_{z1zc}|^2$ ”, de modo que, al llegar a la carga estándar, ocurre una segunda reflexión debido al coeficiente de reflexión de la carga “ $|\Gamma_{c(z1)}|^2$ ”, haciendo que la segunda señal reflejada “ P_{ref2} ” recorra en sentido inverso la red, hasta llegar al plano de los generadores, en donde de nuevo, una porción es transmitida a dicho plano mientras que la otra, es reflejada de vuelta a la red. Dado que la red es simétrica, podemos decir que sus coeficientes de reflexión son idénticos $|\Gamma_2|^2 = |\Gamma_1|^2$, así como la atenuación interna en ambos sentidos $|G_{zc z1}|^2 = |G_{z1zc}|^2$, a su vez, todas las magnitudes de los coeficientes de reflexión y las ganancias o atenuaciones, están elevadas al cuadrado debido a que sus unidades están basadas en voltaje pero, para el análisis, utilizaremos unidades de potencia [5,6].

Dicho esto, la potencia reflejada total “ P_{ref} ” que podemos medir con nuestro analizador de espectro es la que se refleja y transmite de vuelta al plano de calibración, y dado a que, cada múltiple reflexión sufre de atenuaciones consecutivas, solo consideraremos la primera y la segunda, puesto que las posteriores no son relevantes en el análisis:

$$\begin{aligned}
 P_{ref} &\approx P_{ref1} + P_{ref2} \\
 P_{ref1} &= P_{aplicada} |\Gamma_1|^2 \\
 P_{ref2} &= P_{aplicada} (1 - |\Gamma_1|^2) (|G_{z1zc}|^2) (|\Gamma_{c(z1)}|^2) (|G_{zc z1}|^2) (1 - |\Gamma_2|^2) \\
 P_{ref2} &= P_{aplicada} (1 - |\Gamma_1|^2)^2 (|G_{z1zc}|^4) (|\Gamma_{c(z1)}|^2)
 \end{aligned}$$

$$\frac{P_{ref}}{P_{aplicada}} = |\Gamma_{total}|^2 = |\Gamma_1|^2 + (1 - |\Gamma_1|^2)^2 (|G_{Z1Zc}|^4) (|\Gamma_{C(Z_1)}|^2)$$

Nótese que, el coeficiente de reflexión de la carga “ $|\Gamma_{C(Z_1)}|^2$ ”, está referenciado con respecto a la impedancia de la red “ Z_1 ”, en vez de la impedancia característica de $Z_0 = 50 \text{ ohms}$, como sería el caso de “ $|\Gamma_C|^2$ ” que, conocemos previamente por caracterización de la carga estándar en laboratorio. Sin embargo, es posible obtener una representación de “ $|\Gamma_{C(Z_1)}|^2$ ”, haciendo uso de ciertas sustituciones en la definición del coeficiente de reflexión, obteniendo la siguiente expresión:

$$|\Gamma_{C(Z_1)}| = \left| \frac{|\Gamma_C| - |\Gamma_1|}{|\Gamma_1| |\Gamma_C| - 1} \right|$$

Al sustituir la anterior expresión en la ecuación obtenida para el coeficiente de reflexión total “ $|\Gamma_{total}|^2$ ”, obtendremos la ecuación que nos brindará la información necesaria para caracterizar nuestra red:

$$|\Gamma_{total}|^2 = |\Gamma_1|^2 + (1 - |\Gamma_1|^2)^2 (|G_{Z1Zc}|^4) \left(\frac{(|\Gamma_C| - |\Gamma_1|)^2}{(|\Gamma_1| |\Gamma_C| - 1)^2} \right)$$

Ahora bien, dado a que, en la **medición 2** utilizamos una carga de circuito abierto $|\Gamma_{CA}|^2 = 1$, en donde, anteriormente se obtuvo el coeficiente de reflexión total 2 “ $|\Gamma_{total2}|^2$ ” en su representación logarítmica como pérdida de retorno “ $PR_{RedEntrada-CA(dB)}$ ”, la cual, una vez transformándola a valores lineales por medio de $|\Gamma_{total2}|^2 = 10^{\left(\frac{-PR_{RedEntrada-CA(dB)}}{10}\right)} = 0.667$, podremos aplicarla en la ecuación del coeficiente total, sin embargo, por ahora, solo sustituiremos $|\Gamma_C| = |\Gamma_{CA}| = 1$ para simplificar la ecuación y obtener el caso general que resulta de aplicar un circuito abierto:

$$|\Gamma_{total2}|^2 = |\Gamma_{RedEntrada}|^2 + (1 - |\Gamma_{RedEntrada}|^2)^2 (|G_{Z1ZcRedEntrada}|^4) \left(\frac{(|\Gamma_{CA}| - |\Gamma_{RedEntrada}|)^2}{(|\Gamma_{RedEntrada}| |\Gamma_{CA}| - 1)^2} \right)$$

$$|\Gamma_{total2}|^2 = |\Gamma_{RedEntrada}|^2 + (1 - |\Gamma_{RedEntrada}|^2)^2 (|G_{Z1ZcRedEntrada}|^4) (1)$$

Del caso anterior de circuito abierto, podemos despejar la atenuación interna de la red de entrada “ $|G_{Z1ZcRedEntrada}|^2$ ” como:

$$|G_{Z1ZcRedEntrada}|^2 = \sqrt{\frac{|\Gamma_{total2}|^2 - |\Gamma_{RedEntrada}|^2}{(|\Gamma_{RedEntrada}|^2 - 1)^2}}$$

Para obtener todos los parámetros restantes de la red que va al puerto de entrada, será necesario apoyarnos en la **medición 4**, la cual, utilizó como carga estándar la red de referencia con $PR_{EntradaRedReferencia(dB)} = 8.262dB$, por lo que, transformando a valores lineales para conseguir su coeficiente de reflexión de entrada obtendremos $|\Gamma_{EntradaRedReferencia}| = 0.3862$. A su vez, el coeficiente de reflexión total obtenido en la medición 4 a partir de $PR_{RedEntrada-RedReferencia(dB)} = 9.573dB$, será $|\Gamma_{total4}|^2 = 0.1103$. Al sustituir la ecuación de

la atenuación interna en la ecuación general del coeficiente de reflexión total 4, llegaremos a la siguiente expresión:

$$|\Gamma_{total4}|^2 = |\Gamma_{RedEntrada}|^2 + \frac{(|\Gamma_{EntradaRedReferencia}| - |\Gamma_{RedEntrada}|)^2 (|\Gamma_{total2}|^2 - |\Gamma_{RedEntrada}|^2)}{(|\Gamma_{RedEntrada}| |\Gamma_{EntradaRedReferencia}| - 1)^2}$$

Al introducir los valores, obtendremos:

$$0.1103 = |\Gamma_{RedEntrada}|^2 + \frac{(0.3862 - |\Gamma_{RedEntrada}|)^2 (0.667 - |\Gamma_{RedEntrada}|^2)}{(0.3862 |\Gamma_{RedEntrada}| - 1)^2}$$

$$0 = |\Gamma_{RedEntrada}|^2 + \frac{(0.3862 - |\Gamma_{RedEntrada}|)^2 (0.667 - |\Gamma_{RedEntrada}|^2)}{(0.3862 |\Gamma_{RedEntrada}| - 1)^2} - 0.1103$$

Como puede notarse, la expresión anterior solo tiene como incógnita el coeficiente de reflexión de la red de entrada “ $|\Gamma_{RedEntrada}|$ ”, dado a que, esta ecuación no puede despejarse por métodos algebraicos comunes, se optó por utilizar una solución numérica para obtener el valor del coeficiente de reflexión. Para este caso, se utilizó por medio del algoritmo de la rutina de calibración un ciclo “FOR” que variaba el valor de $|\Gamma_{RedEntrada}|$ en un intervalo de [0.000001, 1.0] utilizando incrementos de 0.001, de forma que, el valor de $|\Gamma_{RedEntrada}|$ en la iteración que provocaba que la ecuación anterior fuera igual a “0” o, muy cerca a este (utilizando una tolerancia de 0.0001), nos brindaba el valor correcto del coeficiente de reflexión de la red de entrada. Así, por este método, encontramos que:

$$|\Gamma_{RedEntrada}|^2 = 0.1076$$

$$|\Gamma_{RedEntrada}| = 0.328$$

Ahora, volviendo a la ecuación de la atenuación interna de la red de entrada, obtenemos el siguiente resultado:

$$|G_{Z1ZcRedEntrada}|^2 = \sqrt{\frac{|\Gamma_{total2}|^2 - |\Gamma_{RedEntrada}|^2}{(|\Gamma_{RedEntrada}|^2 - 1)^2}} = 0.8175$$

Finalmente, para obtener la **atenuación total en decibeles de la red que va al puerto de entrada “ $A_{RedEntrada}(dB)$ ”**, haremos uso del coeficiente de reflexión de esta y su atenuación interna, obteniendo:

$$A_{RedEntrada}(dB) = 10 \log_{10} [(1 - |\Gamma_{RedEntrada}|^2) (|G_{Z1ZcRedEntrada}|^2)]$$

$$A_{RedEntrada}(dB) = 10 \log_{10} [(1 - 0.1076)(0.8175)] = -1.3695dB$$

Este procedimiento, se aplicará de manera similar con las mediciones 3 y 5, para obtener el **coeficiente de reflexión de la red que va al puerto de salida, así como su atenuación interna y atenuación total en decibeles:**

$$|\Gamma_{RedSalida}|^2 = 0.0299$$

$$|\Gamma_{RedSalida}| = 0.1728$$

$$|G_{Z1ZcRedSalida}|^2 = 0.6901$$

$$A_{RedSalida}(dB) = 10 \log_{10}[(1 - |\Gamma_{RedSalida}|^2)(|G_{Z1ZcRedSalida}|^2)] = -1.7427 \text{ dB}$$

Ahora bien, para la **medición 6**, obtuvimos una potencia medida de “ $P_{Medida6}(dBm) = -5.467 \text{ dBm}$ ”, por lo que, tomando en cuenta todos los otros términos ya obtenidos previamente, podemos resolver para la atenuación de la red de amplificación y atenuación cuando el atenuador está programado en 0 dB:

$$P_{Medida6}(dBm) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) + A_{RedEntrada}(dB) + A_{RedReferencia}(dB) + A_{RedAmpAt(0)}(dB)$$

$$A_{RedAmpAt(0)}(dB) = -(P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) - A_{RedEntrada}(dB) - A_{RedReferencia}(dB) + P_{Medida6}(dBm)$$

$$A_{RedAmpAt(0)}(dB) = -(-30dBm - 0.9dB - 1.1dB) + 1.3695dB + 0.55 - 5.467dBm$$

$$A_{RedAmpAt(0)}(dB) = 28.4525 \text{ dB}$$

La **medición 7** será muy similar a la anterior, el único cambio es que, en este caso, el atenuador será programado a 40 dB:

$$P_{Medida7}(dBm) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) + A_{RedEntrada}(dB) + A_{RedReferencia}(dB) + A_{RedAmpAt(40)}(dB)$$

$$A_{RedAmpAt(40)}(dB) = -(P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) - A_{RedEntrada}(dB) - A_{RedReferencia}(dB) + P_{Medida7}(dBm)$$

$$A_{RedAmpAt(40)}(dB) = -(-30dBm - 0.9dB - 1.1dB) + 1.3695dB + 0.55 - 44.398dBm$$

$$A_{RedAmpAt(40)}(dB) = -10.4785 \text{ dB}$$

Para la **medición 8**, en base a la potencia medida de $P_{Medida8}(dBm) = -34.8dBm$, obtendremos que la atenuación en el switch 3 será:

$$P_{Medida8}(dBm) = (P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) + A_{RedSalida}(dB) + A_{RedReferencia}(dB) + A_{S3}(dB)$$

$$A_{S3}(dB) = -(P_{Entrada}(dBm) + A_{AcDir}(dB) + A_{Comb-S6}(dB)) - A_{RedSalida}(dB) - A_{RedReferencia}(dB) + P_{Medida8}(dBm)$$

$$A_{S3}(dB) = -(-30dBm - 0.9dB - 1.1dB) + 1.7427dB + 0.55dB - 34.8dBm$$

$$A_{S3}(dB) = -0.5073 \text{ dB}$$

Finalmente, hemos conseguido todos los parámetros relevantes del sistema que nos permitirán aplicar las correcciones o compensaciones adecuadas a los datos obtenidos de las pruebas ejecutadas por la rutina de caracterización, de forma que, el sistema se acercará mucho a lo que mediríamos con instrumentación de laboratorio calibrada. Sin embargo, es importante mencionar que, cada tipo de prueba, tiene su propio método para aplicar dichas compensaciones, como se verá en la siguiente sección. Todos los parámetros de calibración obtenidos de nuestro sistema, se guardarán en un archivo de calibración que será consultado automáticamente por el sistema al ejecutar cada medición de la rutina de caracterización. La información que contendrá el archivo de calibración puede mostrarse en la siguiente tabla:

Tabla 5.2 – Tabla de parámetros de calibración obtenidos del sistema de caracterización secuencial.

Parámetros caracterizados del sistema	Valores de los parámetros
Perdida de retorno en la entrada de red de referencia	$PR_{EntradaRedReferencia(dB)} = 8.262dB$
Perdida de retorno en la salida de red de referencia	$PR_{SalidaRedReferencia(dB)} = 18.818dB$
Atenuación de la red de referencia	$A_{RedReferencia(dB)} = -0.55dB$
Atenuación del acoplador direccional	$A_{AcDir(dB)} = -0.9dB$
Factor de acoplamiento	$FA_{AcDir(dB)} = -20.3dB$
Atenuación en conjunto de combinador y switch 6	$A_{Comb-S6(dB)} = -1.1dB$
Pérdida de retorno en la red de entrada al conectarse a una carga de circuito abierto	$PR_{RedEntrada-CA(dB)} = 1.759dB$
Pérdida de retorno en la red de salida al conectarse a una carga de circuito abierto	$PR_{RedSalida-CA(dB)} = 3.341dB$
Pérdida de retorno en la red de entrada al conectarse a la red de referencia	$PR_{RedEntrada-RedReferencia(dB)} = 9.573dB$
Pérdida de retorno en la red de salida al conectarse a la red de referencia	$PR_{RedSalida-RedReferencia(dB)} = 15.048dB$
Coefficiente de reflexión de voltaje cuadrado de la red de entrada	$ \Gamma_{RedEntrada} ^2 = 0.1076$
Atenuación interna de voltaje cuadrado de la red de entrada	$ G_{Z1ZcRedEntrada} ^2 = 0.8175$
Atenuación de potencia (dB) de la red de entrada	$A_{RedEntrada(dB)} = -1.3695dB$
Coefficiente de reflexión de voltaje cuadrado de la red de salida	$ \Gamma_{RedSalida} ^2 = 0.0299$
Atenuación interna de voltaje cuadrado de la red de salida	$ G_{Z1ZcRedSalida} ^2 = 0.6901$
Atenuación de potencia (dB) de la red de salida	$A_{RedSalida(dB)} = -1.7427dB$
Atenuación/ganancia de la red de amplificación y atenuación al estar el atenuador en 0 dB	$A_{RedAmpAt(0)(dB)} = 28.4525dB$
Atenuación/ganancia de la red de amplificación y atenuación al estar el atenuador en 40 dB	$A_{RedAmpAt(40)(dB)} = -10.4785dB$
Atenuación del switch 3	$A_{S3(dB)} = -0.5073dB$

De este modo, al terminar los cálculos, el sistema mostrará un cuadro de dialogo de confirmación para el usuario de que se ha generado el archivo de calibración, como se puede observar en la siguiente figura:

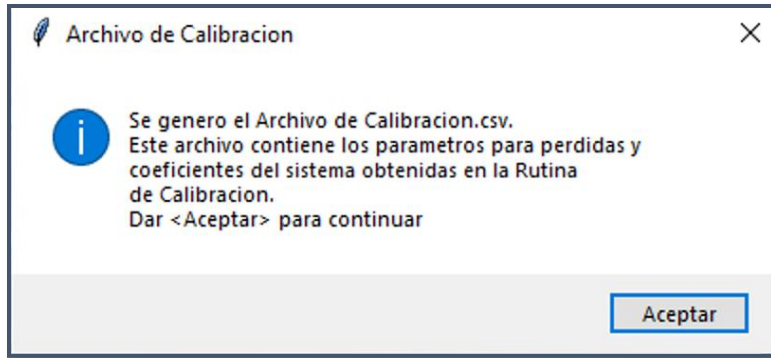


Figura 5.19 – Cuadro de dialogo de confirmación de generación de archivo de calibración.

Por último, en la siguiente figura se muestra una captura del archivo de calibración generado por el sistema de caracterización, el cual, se encuentra en formato de tabla Excel y los valores almacenados van de acuerdo con la tabla anterior:

	A	B	C
1	Parametro	Valor	Unidad
2	A_AcDir	-0.9	dB
3	FA_AcDir	-20.3	dB
4	PR_Entrada_RedReferencia	8.262	dB
5	PR_Salida_RedReferencia	18.818	dB
6	A_RedReferencia	-0.55	dB
7	PR_Abierto	0	dB
8	A_Comb_S6	-1.1	dB
9	PR_RedEntrada_Abierto	1.759	dB
10	PR_RedSalida_Abierto	3.341	dB
11	PR_RedEntrada_Referencia	9.573	dB
12	PR_RedSalida_Referencia	15.048	dB
13	Coeficiente_Refleccion_cuadrado_Red_Entrada	0.1076	razon
14	Coeficiente_Refleccion_cuadrado_Red_Salida	0.0299	razon
15	G_cuadrada_RedEntrada	0.8175	razon
16	G_cuadrada_RedSalida	0.6901	razon
17	A_RedEntrada	-1.3695	dB
18	A_RedSalida	-1.7427	dB
19	A_RedAmpAt_0dB	28.4525	dB
20	A_RedAmpAt_40dB	-10.4785	dB
21	A_S3	-0.5073	dB

Figura 5.20 – Captura de archivo de calibración.

5.12 Compensaciones y calibración de las mediciones de las mediciones en la rutina de caracterización

Ahora que, contamos con todos los parámetros necesarios para aplicar las respectivas compensaciones y correcciones a las distintas pruebas del sistema, comenzaremos por mostrar primero el método para la prueba de pérdida de retorno en la entrada del módulo de recepción que estamos caracterizando, siendo el siguiente:

Medimos la pérdida de retorno total de entrada “ $PR_{RedEntrada-Módulo(dB)}$ ”, al conectar el módulo de recepción a caracterizar al sistema con la red que se conecta al puerto de entrada:

$$PR_{RedEntrada-Módulo(dB)} = (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + FA_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)}) - P_{Medida(dBm)}$$

Convertimos la pérdida de retorno obtenida a su valor lineal, es decir, al coeficiente de reflexión total en conjunto de la red con el módulo:

$$|\Gamma_{total}| = |\Gamma_{RedEntrada-Módulo}| = 10^{\left(\frac{-PR_{RedEntrada-Módulo(dB)}}{20}\right)}$$

Por medio de solución numérica, utilizamos un ciclo “FOR” para variar el coeficiente de reflexión del módulo “ $|\Gamma_{MóduloEntrada}|$ ” en un rango de [0.0000001, 1] con incrementos de 0.001 para encontrar el valor de “ $|\Gamma_{MóduloEntrada}|$ ” que nos acerque lo mayor posible a 0, con una tolerancia menor de 0.0001, al cumplir con esta condición en la siguiente ecuación, tomaremos dicho dato como el valor final del coeficiente de reflexión del módulo:

$$0 = |\Gamma_{RedEntrada}|^2 + (1 - |\Gamma_{RedEntrada}|^2)^2 (|G_{Z1ZcRedEntrada}|^4) \left(\frac{(|\Gamma_{MóduloEntrada}| - |\Gamma_{RedEntrada}|)^2}{(|\Gamma_{RedEntrada}| |\Gamma_{MóduloEntrada}| - 1)^2} \right) - |\Gamma_{RedEntrada-Módulo}|^2$$

Al contar con el valor de $|\Gamma_{MóduloEntrada}|$, lo convertiremos a su representación en decibeles, para obtener la pérdida de retorno en la entrada del módulo de recepción que estamos caracterizando:

$$\text{Pérdida de retorno entrada}_{Módulo(dB)} = -20 \log_{10} |\Gamma_{MóduloEntrada}|$$

Para la **pérdida de retorno en la salida del módulo de recepción**, seguiremos el mismo procedimiento anterior, solo que, en vez de utilizar los parámetros de la red de entrada, usaremos los de la red que va al puerto de salida. En el caso de la **ganancia para una frecuencia dentro de la banda 3400-4000 MHz**, al valor medido en decibeles, simplemente se le restará la atenuación de la red de entrada “ $A_{RedEntrada(dB)}$ ”, así como, la de la red de amplificación y atenuación utilizando 40 dB en el atenuador “ $A_{RedAmpAt(40)(dB)}$ ”, incluyendo las atenuaciones del acoplador direccional y, el combinador con el switch 6. Por lo que, la **ganancia calibrada para una frecuencia dentro de la banda “ $Ganancia_{Módulo(dB)}$ ”** será:

$$\begin{aligned} \text{Ganancia}_{Módulo(dB)} &= [P_{Medida(dBm)} - (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)})] \\ &- A_{RedEntrada(dB)} - A_{RedAmpAt(40)(dB)} \end{aligned}$$

Cabe mencionar que, las atenuaciones son ganancias negativas, o bien, pérdidas, es por esto por lo que, son restadas durante la corrección de las mediciones para compensar los valores. Para la **ganancia para una frecuencia fuera de la banda 3400-4000 MHz “ $Ganancia fuera de Banda_{Módulo(dB)}$ ”**, también se le restará la atenuación de la red de entrada, sin embargo, para el caso de la red de amplificación y atenuación, se utilizará el caso del atenuador en 0 dB “ $A_{RedAmpAt(0)(dB)}$ ”:

$$\begin{aligned}
& \mathbf{Ganancia\ fuera\ de\ Banda}_{Módulo(dB)} \\
& = [P_{Medida(dBm)} - (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)})] \\
& \quad - A_{RedEntrada(dB)} - A_{RedAmpAt(0)(dB)}
\end{aligned}$$

Ahora, para la **ganancia en reversa** “**GananciaReversa**_{Módulo(dB)}”, se compensará la atenuación de la red que va al puerto de salida y, del switch 3:

$$\begin{aligned}
& \mathbf{GananciaReversa}_{Módulo(dB)} \\
& = [P_{Medida(dBm)} - (P_{Entrada(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + A_{Comb-S6(dB)})] \\
& \quad - A_{RedSalida(dB)} - A_{S3(dB)}
\end{aligned}$$

Para el caso de la **medición calibrada del punto de intercepción de tercer orden del módulo** “**PI3**_{Módulo(dBm)}”, en donde, reportamos la potencia de entrada aplicada al módulo de recepción en la que ocurre dicho punto, primero, se tomará la medición del punto de intercepción de tercer orden del sistema “**PI3**_{Sistema(dBm)}”, para la cual, la compensación estará también determinada por las atenuaciones del acoplador direccional, del combinador y el switch 6, así como, de la red de entrada:

$$\mathbf{PI3}_{Módulo(dBm)} = \mathbf{PI3O}_{Sistema(dBm)} + A_{AcDir(dB)} + A_{CombS6(dB)} + A_{RedEntrada(dB)}$$

Para la prueba calibrada de **figura de ruido** “**FiguraRuido**_{Módulo(dB)}”, la compensación debe realizarse desde la fórmula de Friis del sistema, partiendo de los factores de ruido en cada etapa. En donde, manejaremos valores lineales, como el factor de ruido del sistema que surge de la medición total del sistema “ $F_{Sistema}$ ”, mientras que, el factor de ruido de la red de amplificación y atenuación cuando el atenuador está en 0 dB “ $F_{RedAmpAt(0)}$ ”, la atenuación lineal del switch 3 “ A_{S3} ” y, el factor de ruido resultante para el switch 3 “ F_{S3} ”, son derivados obtenidos de la calibración. Por otro lado, la ganancia lineal del módulo de recepción “**Ganancia**_{Módulo}”, la obtenemos al pasar el valor de la medición de ganancia de decibeles a unidades lineales, quedando únicamente el factor de ruido del módulo “ $F_{Módulo}$ ” como la incógnita a obtener por medio de la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
F_{Sistema} &= F_{S3} + \frac{F_{Módulo} - 1}{A_{S3}} + \frac{F_{RedAmpAt(0)} - 1}{A_{S3} G_{Módulo}} \\
F_{Módulo} &= A_{S3}(F_{Sistema} - F_{S3}) + \frac{G_{Módulo} - F_{RedAmpAt(0)} + 1}{G_{Módulo}}
\end{aligned}$$

Por último, tras haber obtenido el factor de ruido del módulo, será posible calcular la figura de ruido compensada en decibeles, por medio de la siguiente expresión:

$$\mathbf{FiguraRuido}_{Módulo(dB)} = 10 \log_{10} |F_{Módulo}|$$

De esta forma, al aplicar todas las condiciones anteriores, hemos calibrado las pérdidas en todas las mediciones que realizaremos durante la rutina de caracterización al evaluar el módulo de recepción deseado.

5.13 Resultados y comparación entre mediciones con o sin calibración con respecto a los datos de laboratorio

Ahora, para obtener una comparativa de los resultados antes y después de aplicar la rutina de calibración, se caracterizó un ejemplar de referencia del módulo de recepción seleccionado en dos casos, el primero de ellos en donde, no se utilizaron mediciones calibradas y, el segundo en donde, si se efectuó el uso de las compensaciones obtenidas del proceso de calibración, con el motivo de comparación con respecto a los datos obtenidos del equipo manual de laboratorio calibrado. Nótese que, para obtener los datos de laboratorio a partir de los instrumentos manuales, se utilizaron las mismas cargas de calibración vistas en la rutina de calibración (circuito abierto y red de referencia) para calibrar sus respectivas pérdidas propias. Así, la comparativa de los distintos casos, se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 5.3 – Tabla comparativa de las mediciones de la rutina de caracterización sin calibración, con calibración y datos de laboratorio para el ejemplar del módulo de recepción seleccionado.

Mediciones de rutina de caracterización	Nivel de amp.	Datos sin calibración	Datos con calibración	Datos de laboratorio	Delta sin calibración	Delta con calibración	Delta lineal (%) sin calibración	Delta lineal % con calibración
Ganancia para frecuencia dentro de banda	Bajo	-0.426 dB	2.429 dB	2.482 dB	2.908 dB	0.053 dB	48.81%	1.21%
Ganancia en reversa para frecuencia dentro de banda		-42.217 dB	-39.85 dB	-40.026 dB	2.191 dB	0.175 dB	65.63%	3.96%
Ganancia para frecuencia fuera de banda		-25.466 dB	-22.905 dB	-23.418 dB	2.047 dB	0.514 dB	37.59%	12.56%
Pérdida de retorno en la entrada		9.597 dB	9.049 dB	9.097 dB	0.5 dB	0.048 dB	12.19%	1.10%
Pérdida de retorno en la salida		25.750 dB	25.763 dB	25.801 dB	0.051 dB	0.038 dB	1.16%	0.87%
Corriente de consumo		2.66 mA	2.658 mA	2.558 mA	0.101 mA	0.100 mA	3.96%	3.9%
Punto de intercepción de tercer orden		-5.528 dBm	-6.81 dBm	-6.62 dBm	1.09 dBm	0.192 dBm	28.54%	4.33%
Figura de ruido		6.398 dB	5.345 dB	5.032 dB	1.366 dB	0.313 dB	36.97%	7.47%
Ganancia para frecuencia dentro de banda	Medio	6.276 dB	9.128 dB	9.169 dB	2.894 dB	0.041 dB	48.64%	0.94%
Ganancia en reversa para frecuencia dentro de banda		-40.316 dB	37.797 dB	37.941 dB	2.375 dB	0.145 dB	72.78%	3.28%
Ganancia para frecuencia fuera de banda		-19.651 dB	-16.795 dB	-17.176 dB	2.476 dB	0.38 dB	43.45%	9.15%
Pérdida de retorno en la entrada		9.816 dB	9.484 dB	9.578 dB	0.238 dB	0.095 dB	5.63%	2.16%
Pérdida de retorno en la salida		14.626 dB	16.261 dB	16.223 dB	1.597 dB	0.038 dB	30.77%	0.88%
Corriente de consumo		3.497 mA	3.496 mA	3.397 mA	0.1 mA	0.098 mA	2.94%	2.89%
Punto de intercepción de tercer orden		-6.156 dBm	-7.466 dBm	-7.107 dBm	0.951 dBm	0.359 dBm	24.47%	7.94%
Figura de ruido		5.507 dB	4.822 dB	4.626 dB	0.882 dB	0.196 dB	22.51%	4.61%
Ganancia para frecuencia dentro de banda	Alto	14.375 dB	17.256 dB	17.553 dB	3.178 dB	0.297 dB	51.9%	6.62%
Ganancia en reversa para frecuencia dentro de banda		-38.67 dB	-36.202 dB	-36.527 dB	2.143 dB	0.325 dB	63.8%	7.21%
Ganancia para frecuencia fuera de banda		-17.917 dB	-15.185 dB	-15.446 dB	2.471 dB	0.261 dB	43.39%	6.19%
Pérdida de retorno en la entrada		9.431 dB	8.391 dB	8.407 dB	1.024 dB	0.016 dB	26.6%	0.37%
Pérdida de retorno en la salida		16.31 dB	19.38 dB	19.337 dB	3.027 dB	0.044 dB	50.19%	1.01%
Corriente de consumo		6.906 mA	6.901 mA	6.8 mA	0.106 mA	0.101 mA	1.56%	1.48%
Punto de intercepción de tercer orden		-12.122 dBm	-13.409 dBm	-13.24 dBm	1.118 dBm	0.168 dBm	29.36%	3.8%
Figura de ruido		4.448 dB	3.804 dB	3.599 dB	0.849 dB	0.205 dB	21.58%	4.82%

En la tabla anterior, las columnas “Datos sin calibración” y “Datos con calibración” fueron generadas a partir de los datos obtenidos de probar el mismo ejemplar de referencia del modelo de módulo de recepción seleccionado. Por otro lado, la columna de “Datos de laboratorio” indica el valor obtenido en cada una de las mediciones durante la caracterización con instrumentos de laboratorio para el mismo ejemplar que estamos probando en nuestro sistema de caracterización

secuencial, de modo que, estos datos, nos sirven como referencia para conocer qué tan desviados son los valores de lo esperado. Las columnas “Delta sin calibración” y “Delta con calibración” indican el valor absoluto de la diferencia entre el dato de laboratorio y el valor sin calibración o con calibración del sistema, respectivamente; por otro lado, las columnas “Delta lineal (%) sin calibración” y “Delta lineal (%) con calibración”, muestran el cambio porcentual de las mediciones sin calibración y con calibración, respectivamente, con respecto a los datos de laboratorio, al convertir los datos de su representación en dB o dBm a razón lineal (excepto para mA).

Como puede observarse en la tabla, la diferencia o delta entre los datos de laboratorio y los datos sin calibración están por encima de 1 dB y suele llegar hasta un máximo de 3.178 dB en la ganancia para frecuencia dentro de banda para el nivel de amplificación alto, por lo que, estas diferencias son muy notables y, no se consideran aceptables para caracterizar dispositivos de recepción, en donde, sus parámetros eléctricos son relativamente sensibles. Por otro lado, la diferencia entre los datos de laboratorio y los datos de las mediciones con calibración, no superan los 0.6 dB como máximo, llegando a obtener diferencias en el orden de los 0.3 dB o 0.1 dB, o incluso, tan pequeñas como 0.016 dB.

Similarmente, el delta lineal porcentual para los datos sin calibración con respecto al laboratorio puede llegar a tener diferencias de hasta 72.78% para mediciones de baja potencia muy sensibles como la ganancia en reversa para una frecuencia dentro de la banda en nivel de amplificación medio, como se muestra en la tabla anterior. Por otro lado, al hacer la comparación del delta lineal porcentual con los datos calibrados, el porcentaje máximo es de 12.56% para la medición de ganancia para una frecuencia fuera de la banda en el nivel de amplificación bajo, lo cual, es bastante aceptable dado a que dicha medición también maneja una potencia muy baja a captar por el instrumento de medición. Así, la información que nos muestra la tabla comparativa, nos indica que, la calibración del sistema reduce drásticamente la desviación de los datos con respecto a la referencia de laboratorio, convirtiendo al sistema de caracterización calibrado en un medio confiable para evaluar módulos de recepción basándonos únicamente en los datos obtenidos pero, sin considerar la variabilidad del sistema; sin embargo, en la siguiente sección, se mostrará como se realizó un estudio de repetibilidad y reproducibilidad para cuantificar la variabilidad en las mediciones y así, evaluar que tan repetible y reproducible es el sistema de caracterización secuencial diseñado en comparación con la referencia, que es el equipo de laboratorio.

6 Capítulo 6: Estudio de la repetibilidad y reproducibilidad (Gage R&R) del sistema de caracterización secuencial y resultados obtenidos

Para comprobar que el sistema de caracterización secuencial ya calibrado es confiable y consistente en sus mediciones, se investigó en la literatura y en artículos donde ya se han realizado estudios de confiabilidad para ciertos sistemas de medición [34-38], encontrándose que, un método eficaz para confirmar la confiabilidad de las mediciones de un sistema es mediante un **estudio de la medición de la repetibilidad y reproducibilidad** de dicho sistema, también llamado estudio “**Gage R&R**” en inglés. Este tipo de estudio se enfoca en cuantificar la variabilidad en las mediciones causada por el sistema mismo, en donde, se compara esta última contra la variabilidad total producida por la muestra de los distintos especímenes que se están midiendo en conjunto con el usuario que está realizando las mediciones; determinando así, si la variabilidad del sistema mismo es aceptable en comparación con la generada por la muestra y el usuario [34-36].

Si un sistema o proceso de medición se considera aceptable bajo estos criterios, quiere decir entonces, que es repetible y reproducible en sus valores medidos. En donde, la repetibilidad es la variación que existe entre mediciones sucesivas realizadas por el mismo usuario sobre el mismo espécimen, si la variación es pequeña, se dice que existe buena repetibilidad. Por otro lado, la reproducibilidad es el desfase o diferencia en el promedio general de las mediciones realizadas por distintos usuarios al utilizar el mismo instrumento bajo condiciones idénticas de medición sobre el mismo espécimen, si la diferencia es insignificante, se considera que el sistema de medición es reproducible.

6.1 Tipos de interacción del usuario con la muestra considerados en el estudio de la medición de la repetibilidad y reproducibilidad

En función del número de equipos disponibles, usuarios, cantidad y tipo de datos, en términos generales, de acuerdo con la literatura [34-38], existen tres tipos importantes del manejo de la interacción entre usuario y muestra, para un estudio de la repetibilidad y reproducibilidad:

- **Estudio cruzado:** En este tipo, cada usuario o equipo mide cada espécimen de la muestra de manera aleatoria para no alterar o sesgar las distribuciones estadísticas, en donde, los factores principales son el usuario o equipo y el espécimen. Es recomendable utilizar este tipo de estudio cuando se realizan pruebas no destructivas de los especímenes [35].
- **Estudio anidado:** Para este, cada usuario o equipo mide un conjunto distinto de especímenes de forma aleatoria. También, el usuario o equipo y el espécimen son los factores principales en este estudio, sin embargo, este se recomienda para pruebas destructivas [34, 35].

- **Estudio expandido:** Este estudio, puede llevarse a cabo similarmente como uno cruzado o bien, como uno anidado, sin embargo, la diferencia radica en que se definen más factores importantes a parte del usuario y el espécimen, los cuales pueden ser fijos o aleatorios [35].

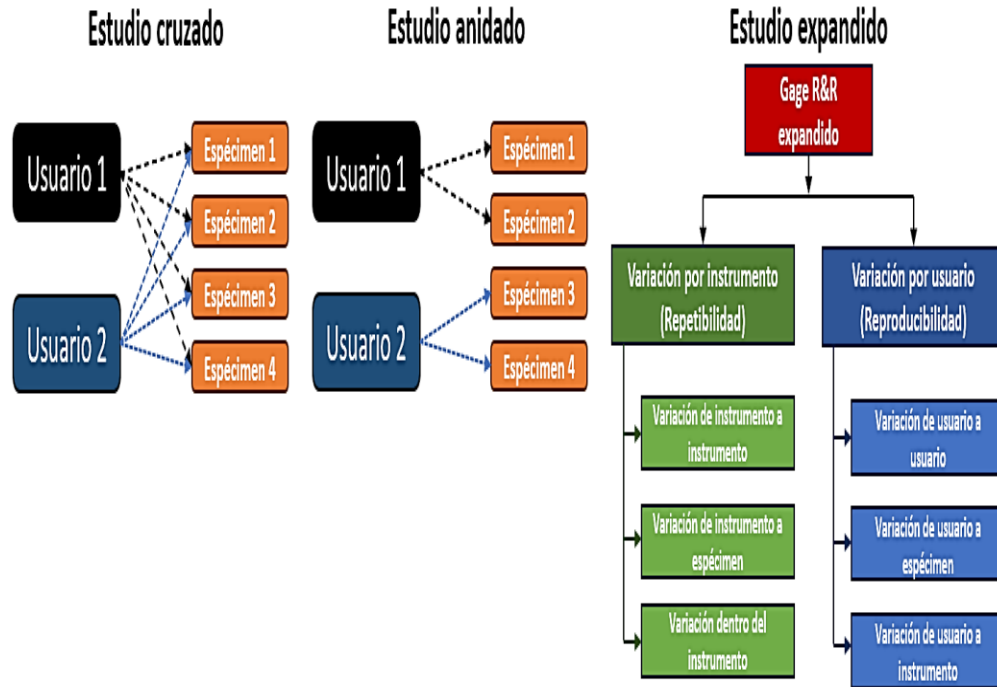


Figura 6.1 – Tipos de interacción entre el usuario y la muestra para el estudio de repetibilidad y reproducibilidad.

Como en nuestro estudio manejaremos mediciones no destructivas de los especímenes, seleccionamos el estudio cruzado dado a que es el más conveniente en nuestro caso.

6.2 Métodos considerados para procesar los datos obtenidos en el estudio de la medición de la repetibilidad y reproducibilidad

Similarmente al proceso de seleccionar el tipo estudio, también existen distintas maneras de realizar los cálculos de la variabilidad de un sistema de medición, considerando la repetibilidad y reproducibilidad. Estos métodos, en base a la literatura [34-38], se resumen en los siguientes tres:

- **Método del rango:** Este método, provee una aproximación relativamente rápida de la medición de la variabilidad del sistema, sin embargo, no puede calcular la repetibilidad y reproducibilidad de manera individual [35].
- **Método del promedio y el rango:** Esta metodología, ofrece una forma de cuantificar la variabilidad del sistema, al mismo tiempo que provee información de la reproducibilidad, repetibilidad y la variación entre los distintos especímenes medidos de la muestra, sin embargo, solo puede utilizarse con el estudio de tipo cruzado [35].

- **Método del análisis de la varianza:** Este método, es popularmente conocido como “ANOVA” y, es el más utilizado debido a que es el más preciso en cuantificar la repetibilidad y reproducibilidad de un sistema de medición, a su vez, es capaz de proveer la variabilidad de la interacción existente entre el usuario y los especímenes de la muestra. Aunado a esto, los tres tipos de estudios (cruzado, anidado y expandido) pueden utilizarse con este método. En el método ANOVA, se recomienda seleccionar dos usuarios y, utilizar una muestra de 10 o más especímenes, los cuales, serán medidos en un mínimo de dos corridas de manera aleatoria [35, 37, 38].

Para nuestro caso de estudio, dado a que las mediciones eléctricas de los módulos de recepción son relativamente sensibles, fue necesario enfocarnos en el método del análisis de la varianza “ANOVA”, puesto a que es el que ofrece mejor precisión en los cálculos de la variabilidad del sistema y se acomoda mejor a nuestras necesidades. El procedimiento que se utilizó en nuestro caso para realizar los cálculos del método ANOVA se muestra en la siguiente sección.

6.3 Proceso de cálculos para determinar la variabilidad del sistema utilizando el método del análisis de la varianza (ANOVA)

Para este procedimiento, considerando la variable “t” como el número de usuarios, “r” como el número de corridas y “p” como el número de especímenes en la muestra, el proceso del método de análisis de la varianza se puede descomponer en los siguientes pasos, como se muestra a continuación, basándonos en la literatura [35, 38]:

- 1) **Calcular la suma de los cuadrados de los usuarios “ $SS_{usuarios}$ ”:** Este paso se realiza para obtener la suma de los cuadrados por medio del cálculo de las desviaciones cuadradas con respecto al promedio de cada usuario “ \bar{X}_i ” y el promedio general total “ \bar{X} ”:

$$SS_{usuarios} = \sum_{i=1}^t (p)(r)(\bar{X}_i - \bar{X})^2$$

- 2) **Calcular la suma de los cuadrados de los especímenes “ $SS_{especímenes}$ ”:** Se obtiene la suma de los cuadrados por medio del cálculo de las desviaciones cuadradas con respecto al promedio de cada espécimen “ \bar{X}_j ” y el promedio general total “ \bar{X} ”:

$$SS_{especímenes} = \sum_{j=1}^p (t)(r)(\bar{X}_j - \bar{X})^2$$

- 3) **Calcular la suma total de los cuadrados “ SS_{Total} ”:** Se calcula a partir de la desviación cuadrada de cada resultado individual “ X_{ijm} ” con respecto al promedio general “ \bar{X} ”:

$$SS_{Total} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r \sum_{m=1}^p (X_{ijm} - \bar{X})^2$$

O bien, si se tiene previamente el valor de la suma de los cuadrados de la interacción usuario-espécimen “ $SS_{usuario*espécimen}$ ” y del instrumento de medición “ $SS_{instrumento}$ ”, se puede utilizar la expresión siguiente en su lugar:

$$SS_{Total} = SS_{usuarios} + SS_{especímenes} + SS_{usuario*espécimen} + SS_{instrumento}$$

- 4) **Calcular la suma de los cuadrados del instrumento de medición considerando las interacciones usuario-espécimen “ $SS_{instrumentoConInt}$ ”:** Se obtiene la suma de los cuadrados del instrumento por medio del cálculo de las desviaciones cuadradas de cada dato individual “ X_{ijm} ” en todas las corridas para un espécimen dado y un usuario, con respecto al promedio de ese espécimen y ese usuario:

$$SS_{instrumentoConInt} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r \sum_{m=1}^p (X_{ijm} - \overline{X_{im}})^2$$

- 5) **Calcular la suma de los cuadrados de la interacción usuario y espécimen “ $SS_{usuario*espécimen}$ ”:** A partir de la expresión para la suma de los cuadrados total, se despeja la correspondiente a la interacción entre usuario y espécimen:

$$SS_{usuario*espécimen} = SS_{Total} - (SS_{usuarios} + SS_{especímenes} + SS_{instrumento})$$

- 6) **Generar la tabla “ANOVA”:** Este paso, consiste en generar una tabla denominada “tabla ANOVA”, la cual, contiene varios cálculos útiles para la determinación del resultado de nuestro estudio y la realizamos de acuerdo con la literatura [35, 38]:

Tabla 6.1 – Ejemplo de tabla “ANOVA”.

Tipo de variabilidad	Grados de libertad del estudio	Suma de los cuadrados de las desviaciones (SS)	Promedio de los cuadrados de las desviaciones (MS)	Razón entre promedios “F”
Usuario	$t - 1$	$SS_{usuarios}$	$MS_{usuarios} = \frac{SS_{usuarios}}{(t - 1)}$	$F_{usuarios} = \frac{MS_{usuarios}}{MS_{usuario*espécimen}}$
Espécimen	$p - 1$	$SS_{especímenes}$	$MS_{especímenes} = \frac{SS_{especímenes}}{(p - 1)}$	$F_{especímenes} = \frac{MS_{especímenes}}{MS_{usuario*espécimen}}$
Interacción usuario-espécimen	$(t - 1)(p - 1)$	$SS_{usuario*espécimen}$	$MS_{usuario*espécimen} = \frac{SS_{usuario*espécimen}}{(t - 1)(p - 1)}$	$F_{usuario*espécimen} = \frac{MS_{usuario*espécimen}}{MS_{instrumento}}$
Instrumento de medición (considerando interacciones)	$(t)(p)(r - 1)$	$SS_{instrumentoConInt}$	$MS_{instrumentoConInt} = \frac{SS_{instrumentoConInt}}{(t)(p)(r - 1)}$	
Instrumento de medición (sin considerar interacciones)	$(t - 1)(p - 1) + (t)(p)(r - 1)$	$SS_{instrumentoSinInt} = SS_{instrumentoConInt} + SS_{usuario*espécimen}$	$MS_{instrumentoSinInt} = \frac{SS_{instrumentoSinInt}}{(t - 1)(p - 1) + (t)(p)(r - 1)}$	
Total	$(t)(p)(r) - 1$	SS_{Total}		

Una vez calculada la razón “ $F_{\text{usuario*espécimen}}$ ” para la interacción entre usuario y espécimen, se utilizan tablas de la distribución estadística “F” considerando los grados de libertad “ $(t-1)(p-1)$ ” para el numerador y, en el denominador “ $(t)(p)(r-1)$ ”, para encontrar los valores críticos considerando el estándar de confianza recomendado de valor-p menor al 5% (intervalo de confianza del 95%). Dicho eso, si el valor de “ $F_{\text{usuario*espécimen}}$ ” supera al valor crítico correspondiente (es decir, **el valor-p es mayor a 0.05**), significa **que la varianza de la repetibilidad del sistema (o bien, del instrumento) no está afectada por la interacción usuario-espécimen** (hipótesis nula original es correcta); sin embargo, si “ $F_{\text{usuario*espécimen}}$ ” no supera el valor crítico de la distribución “F” (**el valor-p es menor a 0.05**), entonces, significa que **la varianza de la repetibilidad si está siendo afectada por la interacción mencionada (hipótesis alternativa es correcta)**. Por lo tanto, si el valor-p es mayor a 0.05, utilizaremos la sección de la variabilidad del instrumento de medición (sin considerar interacciones): $MS_{\text{instrumento}} = MS_{\text{instrumentoSinInt}}$, si el valor-p es menor a 0.05, entonces utilizaremos la variabilidad del instrumento (considerando interacciones) $MS_{\text{instrumento}} = MS_{\text{instrumentoConInt}}$.

- 7) **Evaluar repetibilidad y la varianza correspondiente al usuario, al espécimen y a la interacción entre ellos:** Para este paso, se calculan las varianzas utilizando el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 = MS_{\text{instrumento}}$$

$$\sigma_{\text{usuario*espécimen}}^2 = \frac{(MS_{\text{usuario*espécimen}} - \sigma_{\text{Repetibilidad}}^2)}{r}$$

$$\sigma_{\text{especímenes}}^2 = \frac{(MS_{\text{especímenes}} - MS_{\text{usuario*espécimen}})}{(r)(t)}$$

$$\sigma_{\text{usuarios}}^2 = \frac{(MS_{\text{usuarios}} - MS_{\text{usuario*espécimen}})}{(r)(p)}$$

Nota, si alguno de los valores resultantes es negativo, debe considerarse como cero en el estudio.

- 8) **Cálculo del valor de la medición de repetibilidad y reproducibilidad (Gage R&R):** Durante este paso, se calcula la medición de la repetibilidad y reproducibilidad como la suma de las varianzas del instrumento y del usuario; también, se define la variación o repetibilidad del equipo como la varianza del instrumento de medición, la variación o reproducibilidad del usuario como la suma de la varianza del usuario con la de la interacción entre usuario-espécimen. Finalmente, se denota la variación de espécimen a espécimen y, obtendremos la variación total como la suma de todas las varianzas.

$$\text{Variación instrumento (Repetibilidad)} = \sigma_{\text{Repetibilidad}}^2$$

$$\text{Variación usuario (Reproducibilidad)} = \sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2 = \sigma_{\text{usuarios}}^2 + \sigma_{\text{usuario*espécimen}}^2$$

$$\text{Gage R\&R (Varianza)} = \sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2$$

$$\text{Varianza espécimen a espécimen} = \sigma_{\text{especímenes}}^2$$

$$\text{Variación total} = \sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2 + \sigma_{\text{especímenes}}^2$$

$$= \sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{especímenes}}^2 + \sigma_{\text{usuarios}}^2 + \sigma_{\text{usuario*espécimen}}^2$$

- 9) **Contribución porcentual con respecto a la variación total e interpretación de resultados:** Ahora, se toman los valores obtenidos del estudio Gage R&R, variación del instrumento (repetibilidad), variación del usuario (reproducibilidad) y variación de espécimen a espécimen, con el fin de compararlos con la variación total, aplicando raíz cuadrada para obtener sus desviaciones estándar equivalentes para así definir la contribución porcentual de cada uno:

$$\text{Contribución \% Gage R\&R} = \sqrt{\frac{\text{Gage R\&R}}{\text{Variación total}}} * 100\%$$

$$\text{Contribución \% Repetibilidad} = \sqrt{\frac{\text{Variación instrumento (Repetibilidad)}}{\text{Variación total}}} * 100\%$$

$$\text{Contribución \% Reproducibilidad} = \sqrt{\frac{\text{Variación usuario (Reproducibilidad)}}{\text{Variación total}}} * 100\%$$

$$\text{Contribución \% espécimen a espécimen} = \sqrt{\frac{\text{Varianza espécimen a espécimen}}{\text{Variación total}}} * 100\%$$

O bien, representado de otra manera:

$$\text{Contribución \% Repetibilidad} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{Repetibilidad}}^2}{\sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2 + \sigma_{\text{especímenes}}^2}} * 100\%$$

$$\text{Contribución \% Reproducibilidad} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2}{\sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2 + \sigma_{\text{especímenes}}^2}} * 100\%$$

$$\text{Contribución \% Gage R\&R} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2}{\sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2 + \sigma_{\text{especímenes}}^2}} * 100\%$$

$$\text{Contribución \% espécimen a espécimen} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{especímenes}}^2}{\sigma_{\text{Repetibilidad}}^2 + \sigma_{\text{Reproducibilidad}}^2 + \sigma_{\text{especímenes}}^2}} * 100\%$$

Una vez han sido calculadas las respectivas contribuciones de la desviación estándar de cada elemento, se evalúan con respecto a los criterios globalmente utilizados del organismo “Automotive Industry Action Group (AIAG)”, los cuales, definen en base a un histórico de diversos estudios los porcentajes del estudio Gage R&R considerados como aceptables o no aceptables [35]. Por lo tanto, la siguiente tabla, fue nuestra referencia para definir si el sistema de medición es repetible y reproducible, es decir, confiable para llevar a cabo las mediciones deseadas basándonos en la literatura [34, 35, 38]:

Tabla 6.2 – Tabla de resultados del estudio en base al porcentaje de contribución del Gage R&R.

Valor Contribución % Gage R&R	Resultado
$Contribución\ \% \ Gage\ R\&R < 10\%$	Sistema de medición aceptable, se considera repetible y reproducible.
$10\% \leq Contribución\ \% \ Gage\ R\&R \leq 30\%$	El sistema puede ser aceptable dependiendo de la aplicación y el factor económico, relativamente repetible y reproducible.
$Contribución\ \% \ Gage\ R\&R > 30\%$	El sistema no es aceptable, no es ni repetible ni reproducible.

Una vez definido este último criterio, fue posible determinar si nuestro sistema era repetible y reproducible, es decir, la prueba de confiabilidad en sus mediciones indicó si fue o no fue, un sistema de medición confiable.

6.4 Diseño y condiciones del estudio de repetibilidad y reproducibilidad para el sistema de caracterización secuencial

Como se mencionó en secciones anteriores, se planeó la realización de un estudio de la medición de la repetibilidad y reproducibilidad (también llamado, Gage R&R) para comparar nuestro sistema de caracterización secuencial con el equipo manual de laboratorio. A su vez, la literatura [34-38], nos explicó que un estudio Gage R&R evalúa un solo tipo de medición o parámetro cuantitativo a la vez, por ejemplo, para nuestro sistema, solo se pudo evaluar la ganancia o la corriente de consumo en estudios individuales. Así pues, dado a que, nuestro sistema corre una rutina completa de caracterización con 24 mediciones o pruebas distintas, fue requerido ejecutar un estudio Gage R&R para cada una de ellas de manera independiente, en donde, los “usuarios” que realizan las mediciones en el estudio, fueron el equipo de laboratorio y el sistema de caracterización secuencial.

De esta forma, en nuestro caso, fue muy conveniente diseñar un estudio Gage R&R basado en la interacción de usuario-muestra del estilo “**estudio cruzado**” dado a que, las mediciones ejecutadas no son destructivas de los especímenes de referencia y pueden repetirse sin problemas de alterar la muestra. Por otro lado, como necesitamos una gran precisión en la forma de calcular la variabilidad del sistema, se escogió el “**método de análisis de la varianza**” también llamado “**ANOVA**”, el cual, es el que provee de cálculos más certeros. Dicho esto, en base a las recomendaciones de la literatura [34-38] y, considerando que se realizarían 24 estudios independientes de Gage R&R (uno para cada medición), se seleccionaron las siguientes condiciones para el diseño y ejecución del estudio de repetibilidad y reproducibilidad:

- **Tamaño de la muestra:** Se utilizaron 10 especímenes de referencia para el estudio.

- **Cantidad de usuarios (equipos) que medirán la muestra:** Se utilizaron dos equipos, el primero fue el de laboratorio y el segundo, el sistema de caracterización secuencial diseñado.
- **Corridas de la muestra:** La muestra se corrió 3 veces en cada equipo.

Por lo tanto, ejecutando un estudio Gage R&R para cada una de las 24 mediciones de la rutina de caracterización, aplicando las condiciones descritas, se capturó un total de 1440 datos eléctricos.

6.5 Ejecución del estudio cruzado

Para la ejecución del estudio cruzado, se realizaron tres corridas con cada equipo, primero con el de laboratorio y luego, con el sistema de caracterización. Siguiendo las recomendaciones de la literatura [34-38], los especímenes de la muestra se acomodaron de forma aleatoria en cada una de las corridas para ambos equipos, de modo que, no existiera un sesgo en las mediciones debido a un orden común establecido para probar cada elemento. A su vez, dado a que, el estudio Gage R&R se ejecutaría con cada una de las 24 mediciones de la rutina de caracterización, se optó por realizar la rutina completa cada vez que un espécimen fuera a medirse por alguno de los equipos en cada corrida. Por lo tanto, la rutina de caracterización se realizó 3 veces para cada espécimen por cada equipo, de modo que, gracias a esto, fue posible obtener los datos requeridos en el estudio cruzado para elaborar el análisis de Gage R&R. A continuación, en la siguiente figura, se muestra el orden en que se midió cada espécimen en cada una de las corridas para ambos equipos:



Figura 6.2 – Diseño del estudio cruzado elaborado para ambos usuarios (equipos).

6.6 Organización de los datos

Después de realizar todas las mediciones pertinentes del estudio cruzado, se obtuvieron un total de 1440 datos, los cuales, corresponden a las tres mediciones de cada espécimen para cada una de las

pruebas de la rutina de caracterización que ejecutó cada equipo. Sin embargo, dado a que, en el estudio cruzado estos datos fueron tomados en orden aleatorio, fue requerido organizarlos de forma ordinal utilizando el software Excel, identificando el equipo que tomó la medición, el número de corrida, el número de espécimen y el tipo de medición correspondiente. A continuación, se muestra una tabla, en la cual, se observa una porción de los datos organizados en el formato mencionado:

Tabla 6.3 – Tabla de datos de las mediciones en el nivel de baja amplificación.

Equipo	Corrida	Espécimen	Ganancia en frecuencia de banda (Baja amplificación)	Ganancia en reversa frecuencia de banda (Baja amplificación)	Ganancia para frecuencia fuera de banda (Baja amplificación)	Pérdida de retorno en la entrada (Baja amplificación)	Pérdida de retorno en la salida (Baja amplificación)	Corriente de consumo (Baja amplificación)	Punto de intercepción de tercer orden (Baja amplificación)	Figura de ruido (Baja amplificación)
Laboratorio	Corrida 1	1	2.411	-39.699	-22.101	9.905	26.39	3.054	-3.629	3.414
Laboratorio	Corrida 1	2	1.989	-39.665	-25.061	9.349	26.25	2.188	-6.404	5.701
Laboratorio	Corrida 1	3	2.159	-41.379	-26.649	8.698	25.122	1.681	-8.543	7.84
Laboratorio	Corrida 1	4	2.235	-40.006	-22.92	9.145	25.576	2.372	-6.639	5.254
Laboratorio	Corrida 1	5	1.291	-42.362	-28.527	8.131	23.67	0.496	-10.868	10.146
Laboratorio	Corrida 1	6	1.981	-39.212	-24.735	9.334	26.001	2.343	-6.410	5.575
Laboratorio	Corrida 1	7	4.233	-38.994	-21.252	10.38	27.895	4.713	-2.034	1.522
Laboratorio	Corrida 1	8	2.682	-39.946	-22.507	9.095	26.153	2.639	-6.785	4.901
Laboratorio	Corrida 1	9	3.319	-39.786	-22.445	9.268	26.2	2.919	-7.035	4.707
Laboratorio	Corrida 1	10	2.48	-40.023	-23.345	9.084	25.741	2.556	-6.531	5.179
Laboratorio	Corrida 2	1	2.408	-39.697	-22.109	9.069	26.473	3.050	-3.410	3.739
Laboratorio	Corrida 2	2	1.969	-39.604	-24.652	9.306	26.296	2.189	-6.341	5.529
Laboratorio	Corrida 2	3	2.161	-41.354	-26.541	8.645	25.123	1.68	-8.398	8.117
Laboratorio	Corrida 2	4	2.225	-39.977	-23.164	9.154	25.581	2.374	-6.512	5.502
Laboratorio	Corrida 2	5	1.296	-42.419	-27.96	8.127	23.61	0.408	-10.891	9.971
Laboratorio	Corrida 2	6	1.951	-39.227	-24.871	9.292	26.125	2.33	-6.643	5.248
Laboratorio	Corrida 2	7	4.225	-39.002	-21.142	10.345	27.891	4.705	-2.057	1.498
Laboratorio	Corrida 2	8	2.684	-39.918	-22.392	9.118	26.275	2.635	-6.628	5.058
Laboratorio	Corrida 2	9	3.334	-39.768	-22.387	9.284	26.172	2.933	-7.176	5.019
Laboratorio	Corrida 2	10	2.487	-40.02	-23.408	9.088	25.748	2.557	-6.411	5.008
Laboratorio	Corrida 3	1	2.404	-39.68	-22.192	9.893	26.442	3.059	-3.339	3.456
Laboratorio	Corrida 3	2	1.996	-39.644	-24.768	9.302	26.18	2.195	-6.326	5.334
Laboratorio	Corrida 3	3	2.152	-41.419	-26.879	8.69	25.114	1.672	-8.619	7.77
Laboratorio	Corrida 3	4	2.226	-39.978	-22.962	9.142	25.502	2.372	-6.853	5.537
Laboratorio	Corrida 3	5	1.315	-42.416	-27.944	8.121	23.66	0.491	-10.539	10.405
Laboratorio	Corrida 3	6	1.977	-39.236	-24.346	9.287	26.138	2.338	-6.26	5.508
Laboratorio	Corrida 3	7	4.226	-39.028	-20.759	10.393	27.831	4.698	-2.201	1.796
Laboratorio	Corrida 3	8	2.679	-39.909	-22.359	9.117	26.193	2.635	-6.449	4.701
Laboratorio	Corrida 3	9	3.352	-39.756	-22.326	9.31	26.068	2.916	-7.089	4.637
Laboratorio	Corrida 3	10	2.502	-40.008	-23.38	9.082	25.875	2.56	-6.492	5.299
Sistema	Corrida 1	1	2.317	-39.378	-21.647	9.83	26.399	3.957	-3.77	3.703
Sistema	Corrida 1	2	1.834	-39.551	-24.738	9.292	26.197	2.288	-6.266	5.768
Sistema	Corrida 1	3	2.059	-41.188	-26.29	8.63	25.093	1.768	-8.732	7.863
Sistema	Corrida 1	4	2.129	-39.839	-22.5	9.101	25.669	2.467	-6.834	5.53
Sistema	Corrida 1	5	1.263	-42.172	-27.732	8.099	23.59	0.589	-10.946	10.501
Sistema	Corrida 1	6	1.833	-39.051	-24.284	9.287	26.057	2.439	-6.459	5.607
Sistema	Corrida 1	7	4.155	-38.671	-20.519	10.309	27.974	4.809	-2.119	1.73
Sistema	Corrida 1	8	2.533	-39.764	-22.224	9.063	26.08	2.74	-6.857	5.301
Sistema	Corrida 1	9	3.229	-39.605	-21.808	9.221	26.111	3.011	-7.386	4.978
Sistema	Corrida 1	10	2.426	-39.846	-22.605	9.042	25.763	2.657	-6.838	5.192
Sistema	Corrida 2	1	2.327	-39.412	-21.631	9.806	26.303	3.958	-3.679	3.394
Sistema	Corrida 2	2	1.831	-39.536	-24.732	9.265	26.235	2.285	-6.176	6.041
Sistema	Corrida 2	3	2.07	-41.174	-26.287	8.649	25.046	1.774	-8.804	8.153
Sistema	Corrida 2	4	2.128	-39.845	-22.507	9.135	25.657	2.473	-6.393	5.412
Sistema	Corrida 2	5	1.266	-42.181	-27.731	8.096	23.564	0.586	-10.786	10.654
Sistema	Corrida 2	6	1.806	-39.067	-24.291	9.274	26.129	2.438	-6.302	5.787
Sistema	Corrida 2	7	4.158	-38.665	-20.511	10.327	27.979	4.801	-1.941	2.083
Sistema	Corrida 2	8	2.533	-39.762	-22.224	9.06	26.126	2.732	-7.001	5.482
Sistema	Corrida 2	9	3.238	-39.597	-21.788	9.222	26.122	3.025	-7.264	5.023
Sistema	Corrida 2	10	2.426	-39.85	-22.604	9.053	25.763	2.657	-6.976	5.458
Sistema	Corrida 3	1	2.34	-39.423	-21.612	9.794	26.337	3.955	-3.666	3.329
Sistema	Corrida 3	2	1.835	-39.541	-24.735	9.258	26.204	2.291	-6.117	6.048
Sistema	Corrida 3	3	2.058	-41.173	-26.267	8.636	25.06	1.768	-8.648	8.438
Sistema	Corrida 3	4	2.132	-39.847	-22.495	9.114	25.664	2.471	-6.298	5.797
Sistema	Corrida 3	5	1.259	-42.194	-27.732	8.063	23.607	0.589	-11.047	10.622
Sistema	Corrida 3	6	1.837	-39.095	-24.285	9.288	26.149	2.442	-6.103	5.674
Sistema	Corrida 3	7	4.164	-38.661	-20.507	10.346	27.969	4.801	-2.416	1.732
Sistema	Corrida 3	8	2.533	-39.771	-22.229	9.063	26.051	2.742	-6.733	5.16
Sistema	Corrida 3	9	3.227	-39.596	-21.785	9.222	25.987	3.027	-7.327	4.632
Sistema	Corrida 3	10	2.434	-39.854	-22.607	9.037	25.755	2.658	-6.738	5.288

Como puede verse, la tabla anterior, nos muestra el concepto seleccionado para la organización de los datos, en donde, este mismo formato se siguió para las pruebas correspondientes al nivel de amplificación bajo, medio y alto. Esta forma de organizar los datos fue muy útil para realizar los cálculos futuros que necesita el estudio Gage R&R, puesto a que, ofrece una manera práctica de obtener promedios, sumas, restas, entre otras operaciones, mientras se puede estar seguro de que se está seleccionando el valor correcto correspondiente a un usuario, corrida y espécimen deseado.

6.7 Generación de tabla ANOVA para estudio realizado

En la siguiente tabla, se muestra cómo se desarrolló la tabla ANOVA utilizando el software Excel:

Tabla 6.4 – Tabla ANOVA para algunas mediciones del nivel de baja amplificación.

Información del estudio					
Elementos del estudio	Cantidad				
Usuarios (t)	2				
Especímenes (p)	10				
Corridas (r)	3				
Tipo de variabilidad		Grados de libertad			
Usuarios (t)	t - 1	1			
Especímenes (p)	p - 1	9			
Interacción usuario-especímen	(t - 1)(p - 1)	9			
Instrumento de medición (considerando interacciones)	(t)(p)(r - 1)	40			
Instrumento de medición (sin considerar interacciones)	(t - 1)(p - 1) + (t)(p)(r - 1)	49			
Total	(t)(p)(r) - 1	59			
Cálculos de estudio Gage R&R		Ganancia en reversa frecuencia de banda (Baja amplificación)	Ganancia en reversa frecuencia de banda (Baja amplificación)	Ganancia para frecuencia fuera de banda (Baja amplificación)	Pérdida de retorno en la entrada (Baja amplificación)
Promedio general	\bar{X}	2.4288	-40.0074	-23.6512	9.2089
Promedio Usuario 1 (Laboratorio)	\bar{X}_1	2.4783	-40.1044	-23.8721	9.2318
Promedio Usuario 2 (Sistema de Caracterización)	\bar{X}_2	2.3793	-39.9103	-23.4302	9.1861
Suma de cuadrados de Usuarios	$SS_{usuarios} = \sum_{i=1}^t (p)(r)(\bar{X}_i - \bar{X})^2$	0.1469	0.5651	2.9287	0.0314
Suma de cuadrados de Especímenes	$SS_{especimenes} = \sum_{j=1}^p (t)(r)(\bar{X}_j - \bar{X})^2$	35.4784	56.8442	270.6322	19.7440
Suma de cuadrados del Instrumento (considerando interacciones)	$SS_{instrumentoContut} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^p \sum_{m=1}^r (X_{ijm} - \bar{X}_{im})^2$	0.0033	0.0119	0.7121	0.0115
Suma de cuadrados de Interacción usuario-especímen	$SS_{usuario-especimen} = SS_{Total} - (SS_{usuarios} + SS_{especimenes} + SS_{instrumento})$	0.0206	0.0719	0.5197	0.0037
Promedio de los cuadrados de desviaciones por Usuarios	$MS_{usuarios} = \frac{SS_{usuarios}}{(t - 1)}$	0.1469	0.5651	2.9287	0.0314
Promedio de los cuadrados de desviaciones por Especímenes	$MS_{especimenes} = \frac{SS_{especimenes}}{(p - 1)}$	3.9420	6.3160	30.0702	2.1938
Promedio de los cuadrados de desviaciones por Interacción usuario-especímen	$MS_{usuario-especimen} = \frac{SS_{usuario-especimen}}{(t - 1)(p - 1)}$	0.0023	0.0080	0.0577	0.0004
Promedio de los cuadrados de desviaciones por Instrumento (considerando interacciones)	$MS_{instrumentoContut} = \frac{SS_{instrumentoContut}}{(t)(p)(r - 1)}$	0.0001	0.0003	0.0178	0.0003
Razón F para Interacción usuario-especímen	$F_{usuario-especimen} = \frac{MS_{usuario-especimen}}{MS_{instrumento}}$	27.4032	26.7388	3.2437	1.4206
Valor-p para Interacción usuario-especímen		2.12E-14	3.20E-14	4.78E-03	2.12E-01
Varianza de Repetibilidad	$\sigma_{Repetibilidad}^2 = MS_{instrumento}$	0.00008	0.00030	0.01780	0.00031
Varianza de Interacción Usuario-Especímen	$\sigma_{usuario-especimen}^2 = \frac{(MS_{usuario-especimen} - \sigma_{Repetibilidad}^2)}{r}$	0.00074	0.00256	0.01332	0.00003
Varianza de Especímenes	$\sigma_{especimenes}^2 = \frac{(MS_{especimenes} - MS_{usuario-especimen})}{(r)(t)}$	0.65663	1.05134	5.00208	0.36556
Varianza de Usuarios	$\sigma_{usuarios}^2 = \frac{(MS_{usuarios} - MS_{usuario-especimen})}{(r)(p)}$	0.00482	0.01857	0.09570	0.00103
Gage R&R	$Gage\ R\&R = \sigma_{Repetibilidad}^2 + \sigma_{usuarios}^2$	0.00564	0.02143	0.12682	0.00137
Variación de Instrumento (Repetibilidad)	Variación instrumento (Repetibilidad) = $\sigma_{Repetibilidad}^2$	0.00008	0.00030	0.01780	0.00031
Variación de Usuario (Reproducibilidad)	Variación usuario (Reproducibilidad) = $\sigma_{usuarios}^2 + \sigma_{usuario-especimen}^2$	0.00556	0.02113	0.10901	0.00106
Varianza de Especímen a Especímen	Varianza especímen a especímen = $\sigma_{especimenes}^2$	0.65663	1.05134	5.00208	0.36556
Variación Total	Variación total = $\sigma_{Repetibilidad}^2 + \sigma_{especimenes}^2 + \sigma_{usuarios}^2 + \sigma_{usuario-especimen}^2$	0.66227	1.07277	5.12890	0.36694
Contribución % Gage R&R	Contribución % Gage R&R = $\sqrt{\frac{Gage\ R\&R}{Variación\ total}} \cdot 100\%$	9.22814%	14.13452%	15.72448%	6.11787%
Contribución % Repetibilidad	Contribución % Repetibilidad = $\sqrt{\frac{Variación\ instrumento\ (Repetibilidad)}{Variación\ total}} \cdot 100\%$	1.12320%	1.66855%	5.89169%	2.89909%
Contribución % Reproducibilidad	Contribución % Reproducibilidad = $\sqrt{\frac{Variación\ usuario\ (Reproducibilidad)}{Variación\ total}} \cdot 100\%$	9.15953%	14.03569%	14.57900%	5.38735%
Contribución % Especímen a Especímen	Contribución % especímen a especímen = $\sqrt{\frac{Varianza\ especímen\ a\ especímen}{Variación\ total}} \cdot 100\%$	99.57330%	98.99604%	98.75597%	99.81268%
Resultado del estudio		Aceptable	Medio aceptable	Medio aceptable	Aceptable

La tabla anterior, muestra algunas de las mediciones del nivel de amplificación bajo, sin embargo, este mismo formato se aplicó para toda la rutina de caracterización, es decir, las 24 mediciones correspondientes a los niveles de amplificación bajo, medio y alto. En donde, como puede observarse, la tabla sigue los pasos descritos en la literatura [34-38] para desarrollar un estudio de repetibilidad y reproducibilidad del tipo de Análisis de la Varianza (ANOVA). Así, apoyándonos en las funciones del software Excel de Microsoft, se ejecutó el siguiente orden en los cálculos del estudio Gage R&R para cada prueba de la rutina de caracterización:

- a) Se introdujo la información básica del estudio, como la cantidad de usuarios (equipos, siendo el de laboratorio y el sistema de caracterización), la cantidad de especímenes y de corridas.
- b) Se calcularon los grados de libertad para los usuarios (equipos), especímenes, interacción usuario-especimen, el instrumento de medición y el total.
- c) Se calculó el promedio general, el del usuario 1 (laboratorio) y el del usuario 2 (sistema de caracterización).
- d) Se calculó la suma de cuadrados de los usuarios, especímenes, la total, del instrumento y de la interacción.
- e) Se calcularon los promedios de usuarios, especímenes, interacción y por instrumento.
- f) Se calcularon las razones “F” y los valores-p, para los usuarios, especímenes e interacción usuario-muestra. En donde, el valor-p para la interacción usuario-muestra nos indicará que, si es mayor a 0.05 (considerando un intervalo de confianza de 95%), quiere decir que la interacción no es significativa en la varianza de la repetibilidad y no se debe considerar; por otro lado, si es menor a 0.05, entonces si es significativa y si deberá considerarse.
- g) Se calcularon las varianzas por repetibilidad, interacción, especímenes y usuarios.
- h) Se calculó el Gage R&R, la variación del instrumento (repetibilidad), variación del usuario (reproducibilidad), variación de espécimen a espécimen y la total.
- i) Se calcularon la contribución porcentual del Gage R&R, de la repetibilidad, de la reproducibilidad y de espécimen a espécimen en base a la desviación estándar.
- j) Se obtuvo el resultado del estudio, en donde, una contribución de Gage R&R menor al 10% en un tipo de medición, indica que el sistema de caracterización es repetible y reproducible con respecto al de laboratorio, es decir, “aceptable,” para esa medición. Si la contribución del Gage R&R es mayor al 10% pero menor al 30%, indica que es medianamente repetible y reproducible, por lo que se considera “medio aceptable.” Finalmente, si la contribución es mayor al 30%, se considera que no es repetible ni reproducible, por lo tanto, es “no aceptable”.

6.8 Análisis de resultados del estudio Gage R&R

Finalmente, después de realizar todos los cálculos en el estudio Gage R&R, se obtuvieron las contribuciones porcentuales basadas en la desviación estándar para la repetibilidad, reproducibilidad, de espécimen a espécimen y del Gage R&R. Así, al aplicar las ecuaciones

mostradas en secciones anteriores a cada una de las mediciones de la rutina de caracterización, fue posible desarrollar la siguiente tabla con los resultados:

Tabla 6.5 – Tabla de resultados del estudio Gage R&R basado en la desviación estándar.

Cálculos de estudio Gage R&R	Análisis de la Desviación estándar				Resultado del estudio
	Contribución % Repetibilidad	Contribución % Reproducibilidad	Contribución % Gage R&R	Contribución % Espécimen a Espécimen	
Ganancia en frecuencia de banda (Nivel Amp. Baja)	1.123%	9.160%	9.228%	99.573%	Aceptable
Ganancia en reversa frecuencia de banda (Nivel Amp. Baja)	1.669%	14.036%	14.135%	98.996%	Medio aceptable
Ganancia para frecuencia fuera de banda (Nivel Amp. Baja)	5.892%	14.579%	15.724%	98.756%	Medio aceptable
Pérdida de retorno en la entrada (Nivel Amp. Baja)	2.899%	5.387%	6.118%	99.813%	Aceptable
Pérdida de retorno en la salida (Nivel Amp. Baja)	4.023%	4.416%	5.974%	99.821%	Aceptable
Corriente de consumo (Nivel Amp. Baja)	0.386%	6.089%	6.101%	99.814%	Aceptable
Punto de intercepción de tercer orden (Nivel Amp. Baja)	6.083%	5.233%	8.024%	99.678%	Aceptable
Figura de ruido (Nivel Amp. Baja)	7.735%	7.117%	10.511%	99.446%	Medio aceptable
Ganancia en frecuencia de banda (Nivel Amp. Media)	1.344%	7.295%	7.418%	99.725%	Aceptable
Ganancia en reversa frecuencia de banda (Nivel Amp. Media)	0.612%	9.347%	9.367%	99.560%	Aceptable
Ganancia para frecuencia fuera de banda (Nivel Amp. Media)	6.165%	10.439%	12.124%	99.262%	Medio aceptable
Pérdida de retorno en la entrada (Nivel Amp. Media)	4.138%	8.133%	9.125%	99.583%	Aceptable
Pérdida de retorno en la salida (Nivel Amp. Media)	0.638%	7.586%	7.613%	99.710%	Aceptable
Corriente de consumo (Nivel Amp. Media)	0.430%	5.764%	5.780%	99.833%	Aceptable
Punto de intercepción de tercer orden (Nivel Amp. Media)	4.268%	6.179%	7.510%	99.718%	Aceptable
Figura de ruido (Nivel Amp. Media)	6.187%	4.190%	7.472%	99.720%	Aceptable
Ganancia en frecuencia de banda (Nivel Amp. Alta)	0.275%	7.721%	7.726%	99.701%	Aceptable
Ganancia en reversa frecuencia de banda (Nivel Amp. Alta)	0.755%	8.863%	8.896%	99.604%	Aceptable
Ganancia para frecuencia fuera de banda (Nivel Amp. Alta)	12.664%	2.134%	12.843%	99.172%	Medio aceptable
Pérdida de retorno en la entrada (Nivel Amp. Alta)	3.009%	6.202%	6.893%	99.762%	Aceptable
Pérdida de retorno en la salida (Nivel Amp. Alta)	0.208%	7.563%	7.566%	99.713%	Aceptable
Corriente de consumo (Nivel Amp. Alta)	0.559%	5.718%	5.745%	99.835%	Aceptable
Punto de intercepción de tercer orden (Nivel Amp. Alta)	1.655%	9.293%	9.440%	99.553%	Aceptable
Figura de ruido (Nivel Amp. Alta)	4.743%	6.665%	8.181%	99.665%	Aceptable
Promedio general	3.228%	7.463%	8.730%	99.584%	Aceptable

Como se menciona en la literatura [34-38], de acuerdo con el estándar mundial de “Automotive Industry Action Group (AIAG) que establece criterios para considerar si un sistema es repetible y reproducible, se menciona que, si la contribución del Gage R&R es menor al 10% el sistema se considera aceptable, si es mayor a 10% pero menor a 30% se clasifica como medianamente aceptable; por otro lado, si supera el 30%, es considerado no aceptable [35]. De esta forma, se determinó cuáles de las mediciones se consideraban repetibles y reproducibles entre el equipo de laboratorio (que, es la referencia) y el sistema de caracterización secuencial, así como cuáles no.

Analizando la tabla de resultados mostrada, se puede observar que, de las 24 mediciones, solo 5 de ellas son medianamente aceptables, es decir, tienen una contribución de Gage R&R mayor a 10% pero menor a 30%, en donde, ninguna de ellas supera el 16% de contribución porcentual. Estas mediciones, si son consideradas como correctas, sin embargo, debe tenerse cuidado con ellas

dado a que tienden a tener variación considerable. Por otro lado, las 19 mediciones restantes, obtuvieron un porcentaje por debajo del 10%, siendo totalmente aceptables, en donde, la menor contribución porcentual fue de 5.745%.

Ahora, revisando a más a detalle, se puede encontrar un patrón con aquellas mediciones que tienen una mayor contribución porcentual del Gage R&R, todas estas, involucran medir niveles de potencia muy bajos en comparación a las otras. Por ejemplo, las ganancias para frecuencias fuera de la banda de operación obtuvieron porcentajes mayores al 10%, en donde, la funcionalidad de esta prueba es verificar que tanto se atenúa por medio del filtro pasa bandas una señal que está en una frecuencia que se desea rechazar, por lo que, la potencia que medirá el analizador de espectro será muy baja.

A su vez, para la ganancia en reversa y la figura de ruido en el nivel de amplificación bajo del módulo de recepción, dado a que, el nivel de ganancia es cercano a cero en esta configuración de operación, no habrá una amplificación notable de las señales entrantes; por lo tanto, se tendrán potencias muy bajas a medir por el instrumento, así, la señal de salida es susceptible al ruido electromagnético y al piso de ruido de los mismos instrumentos del sistema, dificultando capturar con precisión los niveles de la señal muestreada. Por las razones mencionadas, aquellas mediciones que involucran mayor potencia en la salida, como la ganancia para una frecuencia dentro de la banda de operación o el punto de intercepción de tercer orden, tenderán a mostrar un porcentaje de contribución menor para el Gage R&R.

Finalmente, el promedio general de la contribución porcentual del Gage R&R para todas las mediciones del sistema nos resulta en un 8.73%, por lo tanto, esto nos dice que, en términos globales, nuestro sistema de caracterización secuencial tiene mediciones coherentes con respecto al equipo de laboratorio, por lo que, podemos determinar que el sistema de caracterización secuencial es repetible y reproducible o bien, aceptable, en base a los resultados del estudio.

7 Capítulo 7: Conclusiones generales y trabajo futuro

Concluyendo con este trabajo de investigación, en esta sección final, se dedica un espacio para elaborar un análisis de los resultados obtenidos de las actividades realizadas con el fin de resolver el problema de investigación planteado inicialmente, así como, indicar si los objetivos generales y específicos previamente propuestos fueron cumplidos a lo largo de la investigación.

7.1 Conclusiones de la investigación en base los objetivos propuestos

En base a la problemática descrita al inicio de este trabajo, el objetivo principal de la investigación fue el diseñar un sistema de caracterización secuencial que fuera capaz de evaluar módulos de recepción genéricos, contemplando también, una rutina de calibración integrada y semiautomática para reducir la mayoría de los pasos manuales que normalmente realiza el investigador, con el fin de simplificar la etapa de caracterización. Así mismo, derivado de este objetivo primario, se derivaron otros específicos que, en conjunto, nos llevaron a las conclusiones y resultados que se mencionaran en esta sección.

Así, para lograr el primero de los objetivos, se diseñó una rutina de caracterización que fuera capaz de validar las pérdidas de potencia por reflexión en la entrada y salida del módulo de recepción a partir de las mediciones de las pérdidas de retorno en ambos puertos. También, con el fin de verificar que la ganancia del módulo fuera apropiada, se optó por medir la ganancia del dispositivo, así como, la corriente que este consume mientras amplifica la señal para conocer si la potencia de corriente directa que utiliza era adecuada. Por otro lado, a sabiendas que, el dispositivo solo debía amplificar desde entrada a salida, se consideró el medir la ganancia en reversa para comprobar si la amplificación era unilateral y a su vez, como este solo debía amplificar aquellas frecuencias dentro de su rango o banda de operación, se midió la ganancia para una señal fuera de banda.

Como para un módulo de recepción, el no agregar distorsión a una señal captada es importante, se agregó la medición del punto de intercepción de tercer orden y también, como verificar que el dispositivo no aporte mucho ruido a la señal incidente es crítico, se contempló el evaluar también la figura de ruido. De este modo, considerando todas las mediciones mencionadas para verificar cada uno de los puntos de funcionalidad de un módulo de recepción y habiendo elegido un modelo genérico con tres niveles de amplificación, se logró diseñar una rutina de caracterización para este que fuera capaz de evaluar su funcionalidad total en cada uno de los niveles, cumpliendo con el primero de nuestros objetivos específicos.

Para cumplir el segundo de nuestros objetivos específicos, se trabajó en adaptar los diversos circuitos independientes en un solo circuito de caracterización que, se interconectó con los instrumentos manuales con el fin de operar sincronizados al ser controlados por software mediante una computadora, completando así, el diseño del sistema de caracterización secuencial para el módulo de recepción seleccionado. A su vez, utilizando el lenguaje de programación Python, se desarrolló el software y la interfaz gráfica que brindó las funciones que el usuario necesitaba para correr la rutina de caracterización para validar el módulo de recepción, así como, la rutina de calibración del sistema. Así, al seleccionar una opción en la interfaz gráfica, el software se

encargaba de controlar los instrumentos y los switches para dirigir las señales de la manera correcta para realizar las mediciones de la rutina de caracterización, automatizando el proceso para caracterización y calibración.

De este modo, se realizó un seguimiento de todo el procedimiento para realizar la rutina de caracterización utilizando solo equipo manual de laboratorio, cuantificando los pasos y tiempos necesarios para completar todas las mediciones, para después, realizar el mismo análisis al utilizar el sistema de caracterización diseñado. Obteniéndose que, mediante la calibración y caracterización manual, fue necesario ejecutar un total de 111 pasos manuales que tomaban aproximadamente 70.25 minutos, mientras que, con el sistema de caracterización, solo fueron requeridos 13 pasos manuales y 11.56 minutos, reduciendo la cantidad de pasos a solo un 11.71% de la cantidad original y, disminuyendo el tiempo que toma el proceso de caracterización a solo el 16.45% del requerido con el método manual. Así, podemos observar que, el esfuerzo en la cantidad de pasos manuales y el tiempo empleado se redujo enormemente al hacer uso del sistema de caracterización secuencial diseñado, simplificando bastante la etapa de caracterización en comparación con el método manual tradicional, por lo que, esto nos demuestra que se cumplió el segundo objetivo específico planteado.

Ahora bien, para lograr el tercer objetivo específico de la investigación, se dividió el sistema de caracterización secuencial en cinco secciones con el fin de realizar 8 mediciones de calibración utilizando los métodos TRL y FDR en conjunto con una carga de circuito abierto y una red de referencia previamente caracterizada para obtener los parámetros eléctricos del sistema. A partir de las 8 mediciones, se obtuvo un sistema de ecuaciones con el cual, se calcularon uno a uno cada parámetro de atenuación, ganancia o reflexión en las distintas secciones del sistema con el fin de utilizar estos datos para calibrar las mediciones de la rutina de caracterización y que así, fueran similares a las obtenidas con la instrumentación de laboratorio calibrada. De este modo, al aplicar la rutina de calibración y, caracterizar un ejemplar de referencia del modelo de módulo de recepción genérico seleccionado, se obtuvieron mediciones muy similares a las obtenidas utilizando el equipo manual de laboratorio. En donde, al comparar los datos del sistema de caracterización previo a la calibración, se obtuvieron diferencias de 1 dB en la mayoría de las mediciones o incluso hasta 3.178 dB (máximo 72.78% lineal) con respecto a las de laboratorio, sin embargo, después de la calibración, estas diferencias se redujeron a tal grado que no superaban los 0.6 dB (máximo 12.56% lineal) como máximo de diferencia, obteniéndose diferencias pequeñas en el orden de entre 0.1 dB a 0.3 dB para la mayoría de las mediciones de caracterización.

Para cumplir el cuarto y último de los objetivos específicos, se verificó la variabilidad del sistema mediante un análisis de la repetibilidad y reproducibilidad, realizando un estudio Gage R&R. Para este estudio, dado a que la naturaleza de las mediciones eléctricas no es destructiva, se optó por diseñar un estudio Gage R&R con interacción de usuario-muestra del tipo “cruzado” dado a que, los mismos especímenes usados pueden medirse múltiples veces, también, la metodología seleccionada para calcular la variabilidad del sistema fue el método ANOVA puesto a que provee de los cálculos más precisos en comparación con los otros métodos, en donde, los usuarios o equipos que realizaron las mediciones fueron 2, el equipo manual calibrado de laboratorio (referencia) y el sistema de caracterización secuencial calibrado diseñado. Así, los resultados del

estudio nos indicaron que, de las 24 mediciones de la rutina de caracterización, afortunadamente, ninguna superó el 30% de contribución a la variabilidad (criterio no aceptable) y, solo 5 de ellas fueron medianamente aceptables contando con contribuciones porcentuales de máximo 16%, mientras que, todas las mediciones de caracterización restantes fueron aceptables al encontrarse por debajo del 10% de contribución a la variabilidad Gage R&R, en donde, el menor porcentaje fue de 5.745%.

Por otro lado, revisando las mediciones que estaban por encima del 10% en la contribución, se pudo notar un patrón que indicaba que todas estas estaban relacionadas a mediciones con niveles de potencia muy bajos, como las ganancias para frecuencias fuera de la banda, la figura de ruido y la ganancia en reversa, en donde estas, son susceptibles al ruido eléctrico y desperfectos comunes en los circuitos e instrumentación de los sistemas de medición, dificultando muestrear estas señales con precisión. Después de cuantificar todos los resultados de las 24 mediciones, se obtuvo un promedio general de la contribución porcentual del Gage R&R de 8.73% para el sistema de caracterización secuencial diseñado al compararlo contra la referencia que fue la instrumentación manual de laboratorio, lo cual, resultó que en términos generales nuestro sistema de medición fue aceptable, es decir, fue repetible y reproducible con respecto al método manual de laboratorio y por lo tanto, con los resultados de este estudio, comprobamos que hemos cumplido con el cuarto objetivo específico propuesto al inicio de este trabajo de investigación.

Finalmente, sabiendo que, al realizar este trabajo de investigación hemos logrado cumplir con todos los objetivos específicos propuestos, tomando en cuenta todas las acciones realizadas en conjunto, se pudo determinar que también el objetivo general de este trabajo de investigación fue completado.

7.2 Trabajo futuro de la investigación

Ahora bien, para finalizar, con respecto al trabajo futuro de esta investigación, se debe tener en cuenta que, el sistema de caracterización secuencial construido puede caracterizar diversos módulos de recepción, sin embargo, tiene ciertas limitaciones con respecto a los niveles mínimos y máximos de potencia que pueden ser medidos debido a la instrumentación utilizada, por lo que, para adaptar al sistema para ser capaz de medir otros módulos de recepción que manejen niveles mucho más bajos o más altos de potencia, se tendría que mejorar el sistema cambiando el analizador de espectro y los generadores de señales actuales por unos con mejores capacidades, así como, añadir más etapas de atenuación o amplificación en las diversas secciones del sistema.

También, como trabajo futuro, se espera que el sistema de caracterización pueda extenderse a no solo caracterizar módulos de recepción, sino que, también sea capaz de medir módulos de transmisión o incluso, módulos que tengan tanto transmisión como recepción en el mismo circuito, para realizar esto, se necesitará de una investigación detallada puesto a que, será necesario agregar nuevas mediciones de caracterización para la funcionalidad de la transmisión así como, modificar los circuitos de caracterización actuales evitando reducir la confiabilidad de las mediciones ya implementadas.

8 Bibliografía y referencias

- [1] D. M. Pozar (2012). *Microwave engineering* (4 ed., pp. 1-7, 48-51, 174-188, 197-202, 318-324, 497-511, 513-518, 559-564, 580-585, 596-598, 676-681): John Wiley & Sons, Inc.
- [2] R. A. Witte (2002). *Electronic Test Instruments: Analog and Digital Measurements* (2 ed., pp. 1-9, 13, 24-28, 30-31, 40-44, 99-102, 208-211, 229-233, 241, 251-257, 335-337): Pearson Education, Inc.
- [3] J. J. Liou and F. Schwierz, "RF/microwave transistors: evolution, current status, and future trend," *Proceedings 2002 IEEE Hong Kong Electron Devices Meeting* (Cat. No.02TH8616), Hong Kong, China, 2002, pp. 5-10, doi: 10.1109/HKEDM.2002.1029145.
- [4] M. Steer (2019). *Microwave and RF Design: Radio Systems* (3 ed., Vol. 1, pp. 1-5, 80-85, 91-97, 121-125, 129-131): NC State University. Doi: https://doi.org/10.5149/9781469656915_Steer
- [5] M. Steer (2019). *Microwave and RF Design: Transmission Lines* (3 ed., Vol. 2, pp. 51-56, 92-104, 227-228): NC State University. Doi: https://doi.org/10.5149/9781469656939_Steer
- [6] M. Steer (2019). *Microwave and RF Design: Networks* (3 ed., Vol. 3, pp. 37-41, 124-125): NC State University. Doi: https://doi.org/10.5149/9781469656953_Steer
- [7] M. Steer (2019). *Microwave and RF Design: Modules* (3 ed., Vol. 4, pp. 11-13, 172-176): NC State University. Doi: https://doi.org/10.5149/9781469656977_Steer
- [8] A. Grochowski, D. Bhattacharya, T. R. Viswanathan and K. Laker, "Integrated circuit testing for quality assurance in manufacturing: history, current status, and future trends," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing*, vol. 44, no. 8, pp. 610-633, Aug. 1997, doi: 10.1109/82.618036.
- [9] J. P. Dunsmore (2020). *Handbook of microwave component measurements: with advanced VNA techniques* (2 ed., pp. 3-11, 13-18, 20-23, 27-43, 47-53, 58-59, 64-66, 127-130, 617-628): John Wiley & Sons, Inc.
- [10] R. A. Witte (2014). *Spectrum and Network Measurements* (2 ed., pp. 11-20, 87-92 195-197): SciTech Publishing.
- [11] M. A. G. Lorenzo y M. T. G. d. Leon, "Comparison of LNA Topologies for WiMAX Applications in a Standard 90-nm CMOS Process," *2010 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, Cambridge, 2010, pp. 642-647, DOI: 10.1109/UKSIM.2010.122.
- [12] C. Bowick, J. Blyler y C. Ajluni (2008). *RF Front-End Design – RF Circuit Design* (pp. 185-201), 2nd ed, Newnes, Elsevier Inc., ISBN 9780750685184, <https://doi.org/10.1016/B978-075068518-4.50010-2>.
- [13] 5G Americas (2014). *Wireless Handset RF Front-End Optimization*: 5G Americas.

- [14] M. Mudavath y K. Harikishore, "Design of CMOS RF Front-End of Low Noise Amplifier for LTE System Applications," Asian Journal of Information Technology, Volume 15, Issue 20, 2016, pp. 4040-4047, ISSN: 1682-3915, DOI: 10.36478/ajit.2016.4040.4047.
- [15] X. F. Dong, C. Jin y A. v. Schaik, "A Low Noise Amplifier Optimized for a GPS Receiver RF Front End," Sidney, Australia, 2007.
- [16] R. Ramzan, L. Zou and J. Dabrowski, "LNA design for on-chip RF test," 2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Island of Kos, 2006, pp. 4 pp.-4239, DOI: 10.1109/ISCAS.2006.1693564.
- [17] M. Mabrouk, "RF and Microwave production test requirements for advanced mixed-signal devices," 2010 11th Latin American Test Workshop, Pule del Este, 2010, pp. 1-4, DOI: 10.1109/LATW.2010.5550381.
- [18] Keysight Technologies (2024). Characterizing the Key Performance Indicators of Power Amplifiers: Keysight Technologies: USA, 2024. Sitio Web: <https://www.keysight.com/us/en/assets/3122-1770/applicationnotes/Characterizing-the-Key-Performance-Indicators-of-Power-Amplifiers.pdf> (accesado 20 de junio, 2024).
- [19] M. Leffel, R. Daniel, Rohde & Schwarz (2021). Application note: The Y factor technique for noise figure measurements: Rohde & Schwarz USA, Inc. Sitio Web: https://www.rohde-schwarz.com/us/applications/the-y-factor-technique-for-noise-figure-measurements-application-note_56280-15484.html (accesado 11 de mayo, 2024).
- [20] G. Ibrahim, "Automated calibration of noise figure measurement path of a low noise RF receiver," 65th ARFTG Conference Digest, 2005. Spring 2005, Long Beach, CA, USA, 2005, pp. 3, DOI: 10.1109/ARFTGS.2005.1500590.
- [21] J. J. Nowakowski, "An Automated LNA/PPA Characterization System," 2007 69th ARFTG Conference, 2007, pp. 1-9, doi: 10.1109/ARFTG.2007.5456327.
- [22] 3GPP (2020). "3GPP TS 38.101-1: NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone," 16.5.0 ed., 3GPP. Recuperado de: https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/38_series/38.101-1/.
- [23] Keysight Technologies (2017). Educational overview of RF power measurement and applications: Keysight Technologies: USA, 2017. Sitio Web: <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-05323/application-notes/5992-1683.pdf> (accesado febrero 19, 2024).
- [24] U. S. Inan, A. S. Inan (1999). Engineering Electromagnetics (pp. 5-14, 18-26, 32-44, 149-158): Addison Wesley Longman, Inc.
- [25] M. Steer (2019). Microwave and RF Design: Amplifiers and Oscillators (3 ed., Vol. 5, pp. 55-57, 172-176): NC State University. Doi: https://doi.org/10.5149/9781469656991_Steer
- [26] R. Gilmore, L. Besser (2003). Practical RF Circuit Design for Modern Wireless Systems: Active Circuits and Systems (Vol. 2, pp. 102-113, 515-520, 531-536): Artech House, Inc.
- [27] K. Chan, Maxim Integrated Products, Inc., Analog Devices, Inc. (2013). IP3 and Intermodulation Guide (The IP3 Specification - Demystified): Analog Devices, Inc. Sitio Web:

<https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/ip3-and-intermodulation-guide.html>
(accesado mayo 21, 2024).

- [28] Maxim Integrated Products, Inc., Analog Devices, Inc. (2003). Noise Figure Measurement Methods and Formulas (Three Methods of Noise Figure Measurement): Analog Devices, Inc. Sitio Web:<https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/noise-figure-measurement-methods-and-formulas--maxim-integrated.html#:~:text=To%20use%20the%20%22Gain%20Method,measured%20with%20a%20spectrum%20analyzer> (accesado, mayo 22, 2024).
- [29] A. Carbajo and K. G. McCarthy, "Improved Test Methodology for Production Testing of RF Switches Using a New Relative Measurement Technique," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 6, pp. 2225-2231, Dec. 2007, doi: 10.1109/TIM.2007.908637.
- [30] M. Kimishima, "Introduction to latest RF test technologies in RF ATE for low test cost and high throughput," 2011 China-Japan Joint Microwave Conference, Hangzhou, China, 2011, pp. 1-8.
- [31] G. Mehdi, H. Anyong, Z. Cheng, J. Miao and A. Mueed, "Characterization of Millimeter-Wave Active and Passive Components Embedded in Test Fixtures," 2013 11th International Conference on Frontiers of Information Technology, Islamabad, Pakistan, 2013, pp. 136-139, doi: 10.1109/FIT.2013.32.
- [32] J. -H. Kim, J. -S. Kang, J. -I. Park and C. -H. Cho, "Backward Unknown-Thru Calibration Method," 2020 95th ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG), Los Angeles, CA, USA, 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/ARFTG47271.2020.9241362.
- [33] R. Ma, G. Han, X. Chen and W. Zhang, "Calibrating an Arbitrary Test Fixture for a Symmetric Device by Three Measurements," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 1, pp. 145-152, Jan. 2010, doi: 10.1109/TIM.2009.2022111.
- [34] C. S. Ackermann, "Evaluating Destructive Measurements using Gage R & R," *Proceedings. IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop*, Boston, MA, USA, 1993, pp. 101-105, doi: 10.1109/ASMC.1993.682490.
- [35] T. Helsing, Ramana PV, Naomi, *Six Sigma Study Guide. "Gage Repeatability and Reproducibility (R&R)."* Sixsigmastudyguide.com, 2016. Sitio Web: <https://sixsigmastudyguide.com/repeatability-and-reproducibility-rr/> (accesado: Oct. 1, 2023).
- [36] S. M. Low, S. Y. Lee and W. K. Yong, "Application of GR&R for productivity improvement," 2009 11th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore, 2009, pp. 996-999, doi: 10.1109/EPTC.2009.5416396.
- [37] M. D'Arco, A. Liccardo and N. Pasquino, "Evaluating DACs linearity and intermodulation errors through an ANOVA approach," 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Hangzhou, China, 2011, pp. 1-5, doi: 10.1109/IMTC.2011.5944196.
- [38] R. Singh, D. Kumar and B. B. Sagar, "Valuation of Significant Difference Between Various Agile Methods Using One Way ANOVA," 2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO), Noida, India, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICRITO51393.2021.9596099.