



**Desarrollo de una plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40 GHz.**

Rosero Romero, Cyntia Ibeth

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones

Msc. León Vásquez, Rubén Darío

08 de marzo de 2021





**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

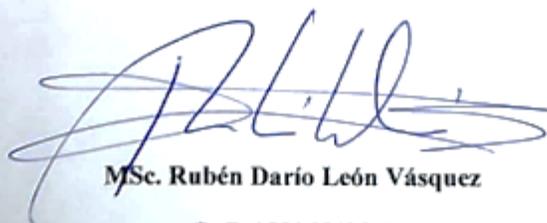
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “Desarrollo de una plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40 GHz” fue realizado por **Cyntia Ibeth Rosero Romero**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 08 de marzo de 2021

Firma:



**MSc. Rubén Darío León Vásquez**

C. C. 180165428-4



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

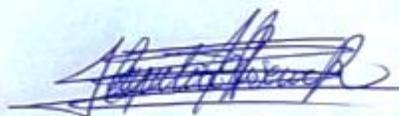
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo, **Rosero Romero Cyntia Ibeth**, con cédula de ciudadanía No. 171864046-7, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: "**Desarrollo de una plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40 GHz**", es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 08 de marzo de 2020**

Firma:



**Rosero Romero Cyntia Ibeth**

C.C: 171864046-7



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**  
**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Rosero Romero Cyntia Ibeth** con cédula de ciudadanía n° 171864046-7, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "**Desarrollo de una plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40 GHz**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 08 de marzo de 2021**

Firma:



**Rosero Romero Cyntia Ibeth**

C.C: 171864046-7

### **Dedicatoria**

Este trabajo de titulación está dedicado a mi familia, que sin lugar a duda son el pilar fundamental que sostiene mi vida y por ende artífice de los logros que he alcanzado.

Mis padres Katty y Federico, mi esposo Juan Carlos, mi hija Sarita y mi hermano Marlon, son mi motivación para salir adelante y superar mis propios límites. Este ha sido un largo camino de esfuerzo, pero ha valido cada segundo transcurrido.

Cyntia Rosero Romero

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios que con su infinita sabiduría escogió este camino para mí, confiando en mi perseverancia y capacidad de reinventarme.

De una forma muy particular a mi madre, quién ha estado acompañándome todos estos años, desde el inicio, hasta ahora que he cumplido esta meta.

A mi esposo Juan Carlos y mi razón de ser, mi hija Sara Victoria, quiénes me motivan siempre a salir adelante y son mi motor.

A mi padre Federico y mi hermano Marlon, quiénes me han apoyado siempre.

A mi querida Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y al Glorioso Ejército Ecuatoriano, instituciones de gran prestigio, a las cuales les debo mi formación académica como Ingeniera.

A mi tutor de tesis MSc. Rubén León, por su paciencia, tenacidad y amor por la enseñanza, un gran maestro.

A mis profesores, que en este camino académico han hecho de mí una mejor persona y sobre todo han cultivado el hábito de la preparación académica.

Cyntia Rosero Romero

## Contenido

ANÁLISIS DE URKUND .....	2
CERTIFICACIÓN.....	3
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA .....	4
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento.....	7
Contenido .....	8
Índice de tablas .....	11
Índice de figuras .....	12
Resumen .....	13
Abstract .....	14
Capítulo I .....	17
Introducción .....	17
Antecedentes .....	17
Planteamiento del Problema.....	18
Justificación.....	19
Objetivos.....	19
Objetivo General .....	19
Objetivos Específicos .....	19
Alcance.....	20
Capítulo II .....	21
Fundamentos Teóricos .....	21
Ondas milimétricas.....	21
Quinta generación de las tecnologías y estándares de comunicación inalámbrica (5G).....	21

Dispositivos de generación, recepción y medición para sistemas que usen ondas milimétricas.....	22
Primera Etapa .....	22
Oscilador de Diodo <i>Gunn</i> . .....	22
Adaptador de guía de onda a coaxial PE9804.....	23
Segunda Etapa.....	25
Dispositivos del bloque “Downconverter” .....	25
<i>Downconverter LNB-2660-40</i> . .....	25
<i>Mixer</i> .....	27
<i>Mixer triple balanceado TB0440LW1</i> .....	28
<i>Amplificadores de bajo ruido (LNA)</i> . .....	29
<i>Amplificador JS4-26004000-35-5P</i> .....	30
<i>Amplificador AFS4-02001800-35-10P-4</i> .....	31
<i>Oscilador</i> . .....	31
<i>Oscilador DLDPLM-10-14000-015P</i> . .....	32
<i>Multiplicador de Frecuencia Activo 3X SYS3X3842</i> . .....	34
Tercera Etapa.....	34
Analizador de Espectro y receptor de monitorización SM200B. ....	34
Dispositivos adicionales .....	35
Fuente de alimentación de corriente directa, modelo 1761 .....	35
<i>Antenas de bocina</i> .....	36
Antena MWH-2640/B.....	37
Antena MWH-1826B.....	37
Antena DRG-1840/A.....	38
Capítulo III .....	40
Implementación de la plataforma básica de pruebas .....	40
Diseño de la plataforma básica de pruebas .....	40

	10
Montaje y conexión entre equipos de la Plataforma de pruebas .....	18
Fuente de alimentación 1761 con oscilador de diodo Gunn .....	18
Fuente de alimentación del downconverter LNB-2660-40.....	18
Oscilador de diodo <i>Gunn</i> con <i>downconverter</i> LNB.2660-40.....	18
Downconverter LNB-2660-40 con analizador de espectro SM200B. ....	18
SMA200B con la computadora. ....	19
Determinación de los parámetros de prueba. ....	19
Simulación de la plataforma de pruebas .....	20
Software Spike .....	21
Requisitos del Sistema. ....	21
Instalación.....	21
Conexión computadora con SM200B.....	21
Ejecución de <i>Spike</i> por primera vez. ....	21
Capítulo IV.....	22
Pruebas con los dispositivos.....	22
Resultados preliminares.....	22
Gráficas obtenidas .....	23
Capítulo V .....	26
Conclusiones y recomendaciones .....	26
Conclusiones.....	26
Recomendaciones .....	27
Referencias .....	28

**Índice de tablas**

Tabla 1. Características técnicas del adaptador de onda coaxial PE9804 .....	23
Tabla 2. Características técnicas del downconverter .....	26
Tabla 3. Características técnicas del mixer triple balanceado TB0440LW1 .....	28
Tabla 4. Características técnicas del amplificador JS4-26004000-35-5P .....	30
Tabla 5. Características técnicas del amplificador AFS4-02001800-35-10P-4 .....	31
Tabla 6. Características técnicas del oscilador DLDPLM-10-14000-0-15P .....	33
Tabla 7. Características técnicas del multiplicador de frecuencia activo 3X SYS3X3842.....	34
Tabla 8. Características técnicas de la antena MWH-2640/B .....	37
Tabla 9. Características técnicas de la antena MWH-1826B .....	37
Tabla 10. Características técnicas de la antena DRG-1840.....	38
Tabla 11. Tabla de frecuencias, potencia y armónicos. ....	20
Tabla 12. Tabla de frecuencias obtenida en relación al oscilador local de 42GHz. ....	22

## Índice de figuras

Figura 1. Oscilador de Diodo Gunn.....	23
Figura 2. Adaptador de guía de onda a coaxial PE9804 .....	24
Figura 3. Downconverter LBN-2660-40.....	26
Figura 4. Diagrama de bloques del downconverter LNB-2660-40 .....	27
Figura 5. Mixer .....	27
Figura 6. Mixer triple balanceado TB0440LW1 .....	29
Figura 7. Oscilador.....	32
Figura 8. Analizador de espectro SM200B .....	35
Figura 9. Fuente de alimentación de corriente directa, modelo 1761 .....	36
Figura 10. Antena DGR-1840/A .....	39
Figura 11. Montaje de la plataforma de pruebas .....	17
Figura 12. Gráfica de Barrido .....	23
Figura 13. Barrido en tiempo real.....	24
Figura 14. Análisis de modulación digital .....	24

## Resumen

El proyecto desarrolla una plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40 GHz, para fortalecer el cumplimiento de planes desarrollo e innovación en los sistemas de información y comunicación en el ámbito de la seguridad y defensa nacional.

Inicialmente, se realizará el estudio del arte de dispositivos de generación, recepción, medición y posteriormente se desarrollará una plataforma de pruebas básica utilizando dispositivos del Centro de Investigación de Aplicaciones Militares (CICTE). Este tipo de plataformas de prueba (26 GHz a 40 GHz) no son muy comunes dentro del campo de las Telecomunicaciones, incluso a pesar de los grandes avances tecnológicos, por lo tanto, disponer de una plataforma de estas características en el ámbito militar, permitirá que instituciones como el Centro de Metrología del Ejército Ecuatoriano (CMEE), con una alternativa de bajo costo, pueda brindar el mantenimiento y posible calibración de equipos de transmisión y recepción. Como referencia, los sistemas 5G usando ondas milimétricas alrededor del mundo, ha comenzado su despliegue a partir de marzo 2020 y en el Ecuador se espera su llegada para 2025. La esencia de este proyecto, en términos académicos, se basa en el estudio del estado del arte de la tecnología de: *mixers*, amplificadores de banda ancha de bajo ruido y osciladores de alta estabilidad.

### Palabras Clave:

- **ONDAS MILIMÉTRICAS**
- **AMPLIFICADORES DE BANDA ANCHA DE BAJO RUIDO**
- **MIXERS**
- **ANTENAS**

## **Abstract**

The project develops a test platform for telecommunications systems with millimeter waves up to 40 GHz, to strengthen compliance with development and innovation plans in information and communication systems in the field of national security and defense. Initially, the study of the art of generation, reception, and measurement devices will be carried out, and later a basic test platform will be developed using devices from the Military Applications Research Center (CICTE). This type of test platforms (26 GHz to 40 GHz) are not very common in the field of Telecommunications, even despite the great technological advances, therefore, having a platform of these characteristics in the military field will allow that institutions such as the Ecuadorian Army Metrology Center, with a low-cost alternative, can provide maintenance and possible calibration of transmission and reception equipment. As a reference, 5G systems using millimeter waves around the world, has begun its deployment from March 2020 and its arrival in Ecuador is expected in 2025. The essence of this project, in academic terms, is based on the study of the state from the art of technology: mixers, low noise broadband amplifiers and high stability oscillators.

### **Keywords:**

- **MILLIMETER WAVES**
- **LOW NOISE BROADBAND AMPLIFIERS**
- **MIXERS**
- **ANTENNAS**

## Capítulo I

### Introducción

Este capítulo realiza una descripción de los principales factores que permiten tener una visión general del trabajo de investigación titulado: “Desarrollo de una plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40GHz”.

### Antecedentes

Desde 1980, las instituciones que generan tecnología y regulan los sistemas de telecomunicaciones y comunicación inalámbrica móvil, lanzan un nuevo tipo de tecnología casi cada década, esperando que para el año 2020 se inicie la introducción y despliegue comercial de 5G que superará con creces a las tecnologías anteriores, ofreciendo conectividad a gran velocidad, fiabilidad más sólida, mayor eficiencia espectral y menor consumo de energía (Busari et al., 2018).

La banda de frecuencia de onda milimétrica, cuyo rango de frecuencias va desde 30GHz hasta 300GHz, es parte fundamental de la solución para satisfacer la necesidad urgente de incremento en la capacidad de los sistema de comunicación inalámbrica ya que forma parte del espectro de frecuencia no utilizado (Hemadneh et al., 2018).

El espectro de onda milimétrica es parte de muchas aplicaciones como: radioastronomía, radares, militares (Jeon & Bang, 2018), comunicaciones por satélite y punto a punto (PTP) aplicaciones de comunicación, pero no para redes inalámbricas comerciales, sin embargo, recientemente se ha utilizado para comunicaciones de corto

alcance (Maltsev et al., 2010), redes de banda ancha móvil (Rappaport et al., 2013) y redes punto a punto (Vychodil et al., 2014) y (Rappaport et al., 2012).

Las ondas milimétricas marcarán un nuevo horizonte tecnológico para los sistemas de telecomunicaciones, por lo tanto, es necesario que el Ejército Ecuatoriano a través de los proyectos tecnológicos que impulsa el CICTE, promueva la investigación en este campo, con el uso de equipos electrónicos disponibles en apoyo a unidades militares como el CMEE.

### **Planteamiento del Problema**

El vertiginoso avance de la tecnología obliga a Instituciones como el Ejército Ecuatoriano y la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE a través del CICTE a evolucionar por medio de la investigación para adaptar su tecnología a las necesidades actuales especialmente dentro del campo de las telecomunicaciones.

El CMEE, que tiene como misión, brindar servicios de calibración y caracterización a equipos electrónicos que se utilizan en el campo militar y civil; coadyuvando al desarrollo tecnológico de calidad del país (Centro de Metrología del Ejército Ecuatoriano, 2016), no cuenta con una plataforma de prueba para dispositivos electrónicos que trabajen en el rango de ondas milimétricas hasta 40GHz, lo que reduce su campo de ejecución y trabajo. Por esta razón, es indispensable contribuir al fortalecimiento de las capacidades de esta Institución, en el campo de las telecomunicaciones con proyectos como este, que sean de bajo costo y garanticen la transferencia tecnológica en cada uno de las etapas de implementación y generación de masa crítica para la investigación aplicada con fines de seguridad y defensa.

## **Justificación**

El presente proyecto es indispensable para fortalecer la misión fundamental de los laboratorios de Telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y del CMEE, ya que en la actualidad solo cuentan con equipos que permiten la calibración y mantenimiento de dispositivos hasta 26GHz, por lo tanto, es necesario desarrollar un portafolio de protocolos para diversas mediciones que usen ondas milimétricas hasta 40GHz, utilizando los equipos disponibles actualmente en el CICTE como: *downconverter*, Circuitos Integrados de Microondas Monolíticos (MMIC), antenas y analizador de espectro, para de esta manera ampliar el campo de servicios técnicos que ofrecen a un bajo costo.

Como referencia a los sistemas 5G, usando tecnologías o puntos de acceso de ondas milimétricas alrededor del mundo, ha comenzado su despliegue a partir de 2020 y en el Ecuador se espera su llegada para 2025.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Desarrollar una plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40GHz, enfocado a incrementar la capacidad de los sistemas de telecomunicaciones.

### ***Objetivos Específicos***

Realizar el estudio del arte referente a equipos y bandas de frecuencia que utilizan ondas milimétricas hasta 40GHz.

Estudiar los dispositivos de generación, recepción y medición para sistemas que usen ondas milimétricas.

Desarrollar una plataforma de pruebas básica utilizando dispositivos (*downconverter* y analizador de espectro) existentes en el CICTE.

Desarrollar un portafolio de protocolos para diversas mediciones que usen ondas milimétricas.

### **Alcance**

El presente proyecto está enfocado al desarrollo de una plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40GHz, con el fin de incrementar la capacidad tecnológica y contribuir al fortalecimiento de las Fuerzas Armadas del Ecuador. El CMEE con la implementación de este sistema, a través de protocolos para diversas mediciones como: *Voltage Standing Wave Ratio* (VSWR), coeficiente de reflexión, eficiencia de radiación e impedancia de entrada, ampliará su portafolio de servicios de mantenimiento, parametrización y calibración de equipos con estándares militares y convencionales.

## Capítulo II

### Fundamentos Teóricos

En este capítulo se describe el campo teórico, los conceptos sobre ondas milimétricas, tecnología 5G, dispositivos de generación, recepción y medición para sistemas de ondas milimétricas hasta 40GHz en cada una de sus respectivas etapas.

#### Ondas milimétricas

La banda de frecuencias de ondas milimétricas (*mmWave*) comprende un espectro de frecuencias no utilizado aproximadamente desde 30GHz hasta 300GHz (Hemadeh et al., 2018), con un rango de longitudes de onda que va desde 1 milímetro a 10 milímetros. Este recurso es el futuro de comunicación inalámbrica, ya que sin lugar a duda se constituye como una opción para poder satisfacer la demanda de capacidad. Dadas las mejoras en los circuitos integrados de microondas monolíticos (MMIC) y la eficiencia energética mejorada a altas frecuencias, los sistemas inalámbricos pueden operar en la banda de frecuencia de ondas milimétricas, en donde los principales contribuyentes son el modelado de canales, los avances de hardware, el procesamiento de señales y la estandarización (Robertson et al., 2016)

#### Quinta generación de las tecnologías y estándares de comunicación inalámbrica (5G)

La tecnología de quinta generación, promete transformar la manera común de relacionarnos con nuestro alrededor los años próximos, al permitir un tiempo de respuesta rápido, una entrega de gigabytes por segundo (GB/s) y la Internet de las cosas (IoT). Para dar este gran paso se necesitan varios avances tecnológicos; uno

está relacionado con el campo de las antenas y la propagación, que consiste en hacer uso de frecuencias de ondas milimétricas de 28GHz o 39GHz, varias antenas para lograr *beamforming* y el seguimiento en redes móviles. El posible uso de un ancho de banda amplio de 4GHz a unos 79GHz permite una alta resolución espacial o incluso la conducción autónoma (Zhang & Mao, 2019)

### **Dispositivos de generación, recepción y medición para sistemas que usen ondas milimétricas**

En el desarrollo de la plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40GHz, es necesario determinar tres partes fundamentales dentro del diseño y funcionamiento.

#### ***Primera Etapa***

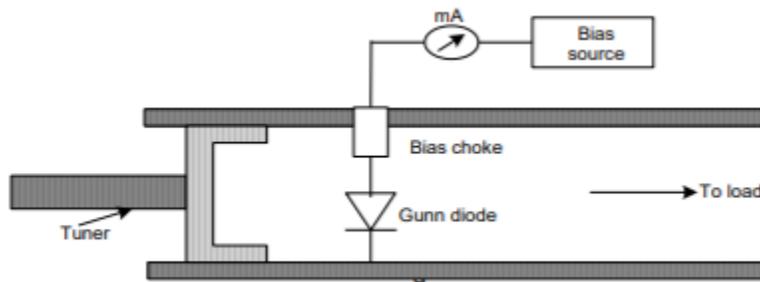
Esta etapa tiene como objetivo generar de una señal de RF a través de un oscilador de diodo *Gunn* tipo 6061A en el rango de 26GHz a 40GHz. Este dispositivo trabaja de 8 GHz a 12GHz y está disponible en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, sin embargo, experimentalmente es posible utilizar el tercer armónico de una frecuencia específica dentro de este rango, la cual debe estar en el intervalo de 24GHz a 36GHz.

**Oscilador de Diodo *Gunn*.** Este tipo de oscilador tiene un sistema regenerativo que incorpora un elemento no lineal de tipo limitador, obteniendo de esta manera una señal más fuerte y rechazando la más débil, con una conductancia negativa no lineal. Después de montar correctamente el diodo *Gunn* en la cavidad de una guía de ondas, la polarización requerida se aplica al diodo *Gunn*. El diodo oscila a una frecuencia que

se puede sintonizar mecánicamente en un amplio rango (Chatterjee & Biswas, 2012), conforme se ilustra en la Figura 1.

### Figura 1.

*Oscilador de Diodo Gunn*



*Nota:* Tomado de (Chatterjee & Biswas, 2012).

**Adaptador de guía de onda a coaxial PE9804.** Este adaptador opera con un rango de frecuencia de 8.2GHz a 12.4GHz, en la banda X, tiene el tamaño de interfaz de guía de ondas WR-90 junto con una brida de tipo cuadrado de tolerancia de precisión. Está construido de aluminio por la durabilidad y el conector SMA hembra que posee se fabrica con conectores de 2,92 milímetros y 3,5 milímetros (PASTERNAK, 2018). Este adaptador permite convertir la salida de guía de onda WR90 del Oscilador Gunn a coaxial SMA(F). Las características técnicas y físicas del dispositivo se muestran en la Tabla 1 y Figura 2.

### Tabla 1.

*Características técnicas del adaptador de onda coaxial PE9804*

Parámetros	Detalle
Rango de frecuencia	8.2 GHz a 12.4 GHz
VSWR	1.3:1
Alimentación (pico)	100 vatios
Pérdida de inserción	0.5 dB
Impedancia	50 ohmios
Tipo de conector	SMA hembra

*Nota.* Recuperado de (PASTERNAK, 2018).

## Figura 2.

*Adaptador de guía de onda a coaxial PE9804*



*Nota:* Tomado de (PASTERNAK, 2018).

## **Segunda Etapa**

En esta etapa, se realiza la recepción de la señal de ondas milimétricas (26GHz a 40GHz) para convertirla en una señal de RF en el rango de 2GHz a 18GHz, mediante un bloque “Downconverter”.

**Dispositivos del bloque “Downconverter”.** Los dispositivos de ondas milimétricas hasta 40GHz, forman parte del bloque “Downconverter”, en donde se recibe una señal de ondas milimétricas de 26GHz a 40GHz proporcionada por el oscilador de diodo *Gunn* tipo 6061A a través del tercer armónico de la frecuencia elegida. Posteriormente, se realiza el proceso de conversión a una señal de RF de 2GHz a 18GHz, a través del equipo Low Noise Block Converter LNB-2660-40, que está compuesto por dispositivos MMIC tales como: mixer triple balanceado TB0440LW1, amplificadores de bajo ruido JS4-26004000-35-5P y AFS-02001800-35-10P-4, multiplicador de frecuencia activo 3X SYS3X3842 y oscilador DLDPLM-10-14000-015P, los cuáles se describen a continuación:

**Downconverter LNB-2660-40.** Este convertidor de radio frecuencia (RF) a frecuencia intermedia (IF) con amplios anchos de banda y frecuencia del oscilador local (LO) fija, se utiliza comúnmente para procesar o medir señales de RF milimétricas (por ejemplo, de 26GHz a 40GHz) con dispositivos de medición en el intervalo de 2GHz a 18GHz. Los denominados LNB (Low Noise Block) con ruido de 4dB, permiten el funcionamiento con potencias de señal de entrada bajas. Además, el ruido de modulación de fase (PM) del convertidor se minimiza mediante una fuente de LO interna multiplicada y enganchada en fase. El dispositivo a utilizar disponible en el CICTE e ilustrado en la Figura 3, tiene las siguientes especificaciones técnicas, las cuales se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2.***Características técnicas del downconverter*

Parámetro	Detalle
Rango de frecuencia RF	24 GHz a 40 GHz
Ganancia de conversión	42 dB típico
Figura de ruido	4 dB máximo
Energía DC	+ 15 VDC/1 A
VSWR RF	50 ohmios referencia
Rango de frecuencia IF	2 GHz mínimo 16 GHz máximo
LO frecuencia interna	42 GHz

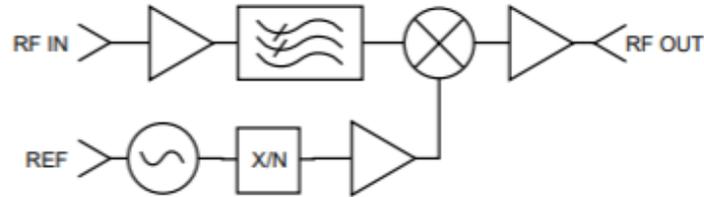
*Nota.* Recuperado de LBN-2660-40 (MITEQ, n.d.-b, p. 471).

**Figura 3.***Downconverter LBN-2660-40*

*Nota:* Recuperado de (MITEQ, n.d.-b, p. 471).

### Figura 4.

Diagrama de bloques del downconverter LNB-2660-40

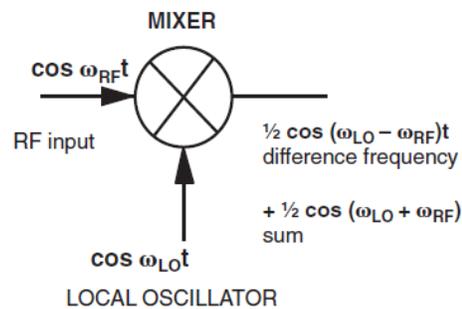


Nota: Recuperado de (MITEQ, n.d.-b, p. 472).

Internamente el *downconverter* LNB-2660-40, tal como muestra el diagrama de bloques de la Figura 4, está compuesto por dispositivos que se detallan a continuación.

### Figura 5.

*Mixer*



Nota: Recuperado de (Robertson et al., 2016, p. 35).

**Mixer.** Es un MMIC que transforma la frecuencia de la señal de RF en la entrada, en una de frecuencia intermedia, mediante la multiplicación con una segunda señal llamada oscilador local, tal como lo muestra la Figura 5. El mezclador es un dispositivo de tres puertos, y se pueden usar tanto para la conversión ascendente como para la conversión descendente. Los tres puertos de un mezclador se denominan RF, IF y LO. La señal aplicada al puerto LO es una señal sinusoidal del oscilador local, el RF

es el puerto de alta frecuencia, mientras que el IF es el puerto de salida. Un mezclador de conversión ascendente se utiliza en un transmisor para transformar el espectro de una señal de banda base a una frecuencia más alta y para la transmisión el puerto de RF es el puerto de salida mientras que el puerto IF es el puerto de entrada. En un mezclador de conversión descendente objeto de nuestro proyecto, la señal recibida se convierte de forma descendente, ya sea a una frecuencia intermedia (IF) para un mayor filtrado y amplificación, o directamente a la banda base. La ganancia de conversión o pérdida de conversión se define como la relación entre la potencia de salida del mezclador y la potencia de entrada, dependiendo si el mezclador es activo o pasivo. Mientras que un mezclador ideal se puede modelar simplemente con una función de multiplicación, los mezcladores prácticos generan muchas señales de salida no deseadas o armónicos. Para reducir la demanda del filtrado o mitigación de los armónicos, se pueden utilizar varios arreglos de mezcladores balanceados, que emplean señales diferenciales, para la cancelación parcial de estas señales no deseadas (Robertson et al., 2016, pp. 34–35).

#### ***Mixer triple balanceado TB0440LW1.***

El modelo TB0440LW1 de MITEQ es un mixer triple balanceado para ondas milimétricas. El diseño balun único y el empaquetado de semiconductores personalizado permiten una cobertura de 4GHz a 40GHz a través del puerto RF y LO con operación IF simultánea de 0.5GHz a 20GHz. Este dispositivo funciona como un convertidor ascendente y descendente (MITEQ, 2012) y sus características técnicas y forma se ilustran en la Tabla 3 y Figura 6, respectivamente.

#### **Tabla 3.**

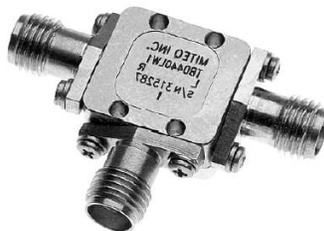
*Características técnicas del mixer triple balanceado TB0440LW1*

Parámetros	Detalle
Cobertura RF	4 GHz a 40 GHz
Cobertura LO	4 GHz a 40 GHz/utilizable
Operación IF	50Ghz
Rango de potencia LO	0.5 GHz a 20 GHz
Aislamiento de RF a IF	+10 a +15 dBm
Conectores K extraíbles	30 dB típico

*Nota.* Recuperado de (MITEQ, 2012).

### Figura 6.

*Mixer triple balanceado TB0440LW1*



*Nota:* Recuperado de (MITEQ, 2012).

**Amplificadores de bajo ruido (LNA).** Es un circuito activo de dos puertos muy crucial en transmisores y receptores, cuyo propósito es aumentar los niveles de potencia de la señal para vencer la interferencia, el ruido y la pérdida en la transmisión de la señal. El amplificador de potencia debe amplificar la potencia de la señal del transmisor hasta el nivel de potencia objetivo, para lograr que la información transmitida llegue al receptor. En el receptor, la señal recibida es muy pequeña y comúnmente se requiere un LNA. Los amplificadores prácticos no son lineales, agregan distorsión a la

señal amplificada, y esto afectará el desempeño de un sistema de comunicación. En el amplificador transmisor, la no linealidad puede causar señales de transmisión fuera de banda no deseadas, lo que requiere filtrado adicional y distorsión de la señal, lo que puede conducir a errores de datos (Robertson et al., 2016, pp. 33–34). Este sistema requiere de dos LNA, uno para preparar la señal de RF de entrada al *mixer* (banda de 26GHz a 40GHz) y otro para la señal de salida del mixer (banda de 2GHz a 18GHz).

**Amplificador JS4-26004000-35-5P.** Los diseños de amplificadores para banda de 26GHz a 40GHz de la serie JS de MITEQ tienen un solo extremo y muchas son combinaciones de este tipo con etapas distribuidas. Las unidades de mayor potencia pueden utilizar etapas equilibradas. Para aplicaciones especiales, las técnicas de diseño van más allá de la optimización, buscan un mejor rendimiento confiable, con el objetivo de eliminar la necesidad de sintonizar unidades incluso para aplicaciones (MITEQ, 2009, p. 4). La Tabla 4 muestra las características técnicas del LNA para un rango de frecuencia de 26GHz a 40GHz.

**Tabla 4.**

*Características técnicas del amplificador JS4-26004000-35-5P*

<b>Parámetros</b>	<b>Detalle</b>
Rango de frecuencia	26 GHz a 40 GHz
Ganancia	23 dB mínimo
Ganancia plana	±2.5 dB máximo
Figura de ruido	3.5 dB máximo
VSWR	proporción 2.5:1
Energía DC	+ 15 VDC/200 mA

Nota. Recuperado de (MITEQ, 2009, p. 24)

**Amplificador AFS4-02001800-35-10P-4.** Los diseños de amplificadores para la banda de 2GHz a 18GHz de la serie AFS de MITEQ centran su atención en el chasis AFS el mismo que es una construcción de dos partes que incluye la carcasa del amplificador montada en un dispositivo al que están conectados los conectores SMA. Este chasis ha demostrado ser extremadamente versátil para adaptarse a aplicaciones coaxiales o microcinta. Debido a su tamaño, el chasis AFS solo admite diseños de un solo extremo. (MITEQ, 2009, p. 4). En la Tabla 5 se ilustra las características técnicas del LNA mencionado.

**Tabla 5.**

*Características técnicas del amplificador AFS4-02001800-35-10P-4*

<b>Parámetros</b>	<b>Detalle</b>
Rango de frecuencia	2 GHz a 18 GHz
Ganancia	30 dB mínimo
Ganancia plana	±2.5 dB máximo
Figura de ruido	3.5 dB máximo
VSWR	proporción 2.5:1
Energía DC	+ 15 VDC/175 mA

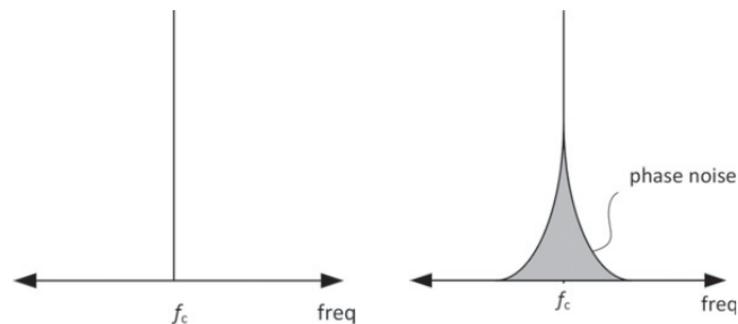
Nota. Recuperado de (MITEQ, 2009, p. 37).

**Oscilador.** Es un MMIC con una entrada de alimentación de corriente continua que genera una señal de salida sinusoidal que se puede utilizar como señal del

oscilador local para un mezclador, modulador o demodulador. El espectro de una señal sinusoidal pura, en el dominio de la frecuencia es una sola línea en la frecuencia del oscilador ( $f_c$ ), la cual está representada en la primera gráfica de la Figura 5. En la práctica, el ruido generado por los dispositivos electrónicos en el circuito del oscilador se convierte y amplifica por efectos variables lineales o no lineales para transformarse en amplitud y ruido de fase en la señal de salida del oscilador. Un oscilador real tiene un espectro de la señal representado en dos bandas laterales situadas alrededor de la  $f_c$ , como se muestra en la segunda gráfica de la Figura 7. (Robertson et al., 2016, p. 34).

### Figura 7.

*Oscilador*



*Nota:* Recuperado de (Robertson et al., 2016, p. 35).

**Oscilador DLDPLM-10-14000-015P.** Se trata de un oscilador compuesto por un resonador coaxial de bloqueo de fase, independientemente de la configuración, la ganancia es superior a 0dB, límite para que se cumpla la condición de arranque, al existir pérdidas reducidas. Uno de los rasgos más importantes de estos osciladores es que pueden exhibir muy bajo ruido de fase, cualquier energía espectral a la frecuencia resonante se amplifica por el oscilador, lo que resulta en una colección de tonos en diferentes fases. Esta propiedad los hace particularmente útiles en Telecomunicaciones,

donde se necesitan señales de alta estabilidad (MITEQ, n.d.-c). La Tabla 6 ilustra sus características técnicas.

**Tabla 6.**

*Características técnicas del oscilador DLDPLM-10-14000-0-15P*

<b>Especificación</b>	<b>Detalle</b>
Frecuencia de salida	4 GHz a 15 GHz
Potencia de salida	+ 10 dBm mínimo
Rango de referencia de salida	5 MHz a 20 MHz
Temperatura de operación	-30 °C a +75°C
Salida de señales espurias	-70 dB <sub>c</sub> mínimo
Salida de armónicos	-55 dB <sub>c</sub> mínimo
Impedancia de salida	50 ohmios nominal
Carga VSWR	1.5:1 nominal
Voltaje DC	15, 20 o 24 voltios/400mA 5 voltios/300 mA

*Nota.* Recuperado de (MITEQ, n.d.-c)

En este caso, es necesario que se realice una multiplicación por tres la señal de salida del oscilador, para obtener la señal del oscilador local a utilizar en el LNB que en este caso es 42GHz. Se debe recordar que la banda de 26GHz a 40GHz es necesario convertirla en una banda de 2GHz a 18GHz.

**Multiplicador de Frecuencia Activo 3X SYS3X3842.** Los sistemas para multiplicación de frecuencia han demostrado ser una técnica alternativa válida para alcanzar señales de alta frecuencia desde señales de baja frecuencia. (MITEQ, n.d.-a). En la Tabla 7 se ilustra las características técnicas del multiplicador utilizado en el LNB.

**Tabla 7.**

*Características técnicas del multiplicador de frecuencia activo 3X SYS3X3842*

<b>Especificación</b>	<b>Detalle</b>
Rango de frecuencia RF in	12.6 GHz a 14 GHz
VSWR RF	Proporción 2.5:1/50 ohmios
Rango de frecuencia RF	12 dBm
Temperatura de operación	-40°C a +65°C

*Nota.* Recuperado de (MITEQ, n.d.-a).

### **Tercera Etapa**

Esta etapa está compuesta por un dispositivo de nueva generación para la medición y análisis de señales de RF en la banda de 2GHz a 18GHz, que tiene un ancho de banda de análisis instantáneo mínimo de 150MHz mediante la digitalización de las componentes fase (I) y cuadratura (Q) de la señal de RF objeto de análisis.

**Analizador de Espectro y receptor de monitorización SM200B.** Es un equipo electrónico de alto rendimiento, sintonizando de 100kHz a 20GHz, que cuenta con un ancho de banda instantáneo de 160MHz, 110dB de rango dinámico, velocidad de barrido de 1THz/seg. a 30kHz RBW y un rendimiento de ruido de fase con un error

menor al 0,1% en las mediciones de la magnitud del vector de error (EVM). El procesamiento de la señal lo realiza mediante la digitalización de las componentes en fase (I) y cuadratura (Q), que se distribuye entre una *Field Programmable Gate Array* (FPGA) Altera muy potente y una computadora personal (PC) externa que tiene un procesador Intel Core i7. El Signal Hound SM200B es de fácil conexión, ya que utiliza una *Application Programming Interfaces* (API) local, a un sistema de monitoreo automatizado o a un equipo de prueba automatizado (Signal Hound, 2019). La Figura 8 ilustra el sistema SM200B.

### Figura 8.

*Analizador de espectro SM200B*



*Nota:* Tomado de (Signal Hound, 2019).

### Dispositivos adicionales

#### ***Fuente de alimentación de corriente directa, modelo 1761***

Esta fuente de alimentación de corriente directa de salida triple, tiene una pantalla LED de 4 dígitos ofrece una resolución de 10mV y 1mA, lo que brinda la capacidad de establecer valores de voltaje y corriente con mayor precisión que las pantallas de 3 dígitos, tensión constante (CV) y corriente de operación constante (CC), su funcionamiento es en modo paralelo, seguimiento en serie o independiente para

doble voltaje y corriente, limitación de corriente ajustable y además posee protección contra sobretensión y polaridad inversa (B&K Precision Corp., 2015).

### Figura 9.

*Fuente de alimentación de corriente directa, modelo 1761*



*Nota:* Tomado de (B&K Precision Corp., 2015).

### **Antenas de bocina**

Las antenas de bocina de guía de ondas de la serie MWH están polarizadas linealmente, son desmontables y se acoplan a las bridas de guía de ondas estándar. Las dimensiones físicas de cada antena están diseñadas para reducirse desde un tamaño de guía de ondas estándar, a través de una sección ensanchada, hacia el espacio libre con pérdidas mínimas. Las mediciones de cámara anecoica y espacio libre se realizan con precisión utilizando estas bocinas como radiadores primarios. Las bocinas MWH están disponibles con y sin guía de onda de VSWR bajo para adaptadores coaxiales. Los conectores hembra Tipo N o hembra SMA se utilizan para antenas de bocina que funcionan en frecuencias menores a 18GHz y los conectores Tipo K se utilizan para antenas que funcionan por encima de 18GHz, tienen una ganancia de 13db a 17dB, patrones de planos E y H uniformes y ROE baja (ARA

Antenna Research, n.d.). Serán utilizadas eventualmente cuando se requiera realizar monitoreos espectrales en la banda de 18GHz a 40GHz en el espacio libre.

### **Antena MWH-2640/B.**

**Tabla 8.**

*Características técnicas de la antena MWH-2640/B*

<b>Especificación</b>	<b>Detalle</b>
Rango de frecuencia	26.5 GHz a 40 GHz
VSWR	2.0:1
Ganancia	23.5 dBi a 25.1 dBi típica
Potencia	10 W
<u>Beamwidth</u>	12° - 8°
Tipo de conector	K-f

*Nota. Recuperado de (ARA Antenna Research, n.d., p. 54)*

### **Antena MWH-1826B**

**Tabla 9.**

*Características técnicas de la antena MWH-1826B*

<b>Especificación</b>	<b>Detalle</b>
Rango de frecuencia	18 GHz a 26.5 GHz
VSWR	2.0:1
Ganancia	23.5 dBi a 25.1 dBi típica
Potencia	10 W
<u>Beamwidth</u>	12° - 8°
Tipo de conector	K-f

*Nota.* Recuperado de (ARA Antenna Research, n.d., p. 54)

**Antena DRG-1840/A.** Las bocinas de guía de onda de banda ancha de la serie DRG están polarizadas linealmente y proporcionan un medio eficiente y de bajo costo para mediciones de banda ancha. Las antenas de corneta estriadas trabajan en la banda de frecuencia de 200MHz a 40GHz en rangos superpuestos. Estas bocinas son ideales para pruebas de EMC, radiogoniometría, vigilancia, ganancia de antena y mediciones de patrones y otras aplicaciones. Sus principales características son: alta ganancia, patrones uniformes en los planos E y H en anchos de banda de varias octavas, VSWR bajo y la ventaja del tamaño pequeño y el peso ligero (ARA Antenna Research, n.d., p. 54).

**Tabla 10.**

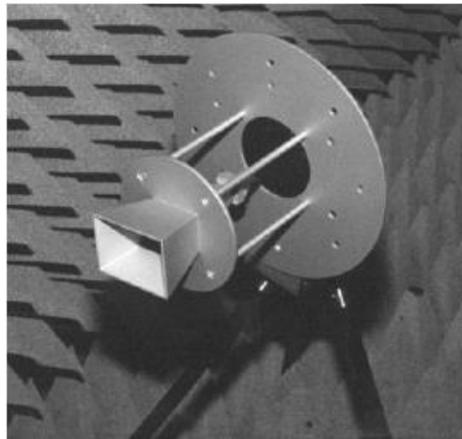
*Características técnicas de la antena DRG-1840*

<b>Especificación</b>	<b>Detalle</b>
Rango de frecuencia	18 GHz a 40 GHz
VSWR	2.0:1
Ganancia	19 dBi a 24 dBi típica
Potencia	10 W
<u>Beamwidth</u>	15° - 10°
Tipo de conector	K-f

*Nota.* Recuperado de (ARA Antenna Research, n.d., p. 54).

**Figura 10.**

*Antena DGR-1840/A*



*Nota:* Tomado de (ARA Antenna Research, n.d., p. 57).

## Capítulo III

### Implementación de la plataforma básica de pruebas

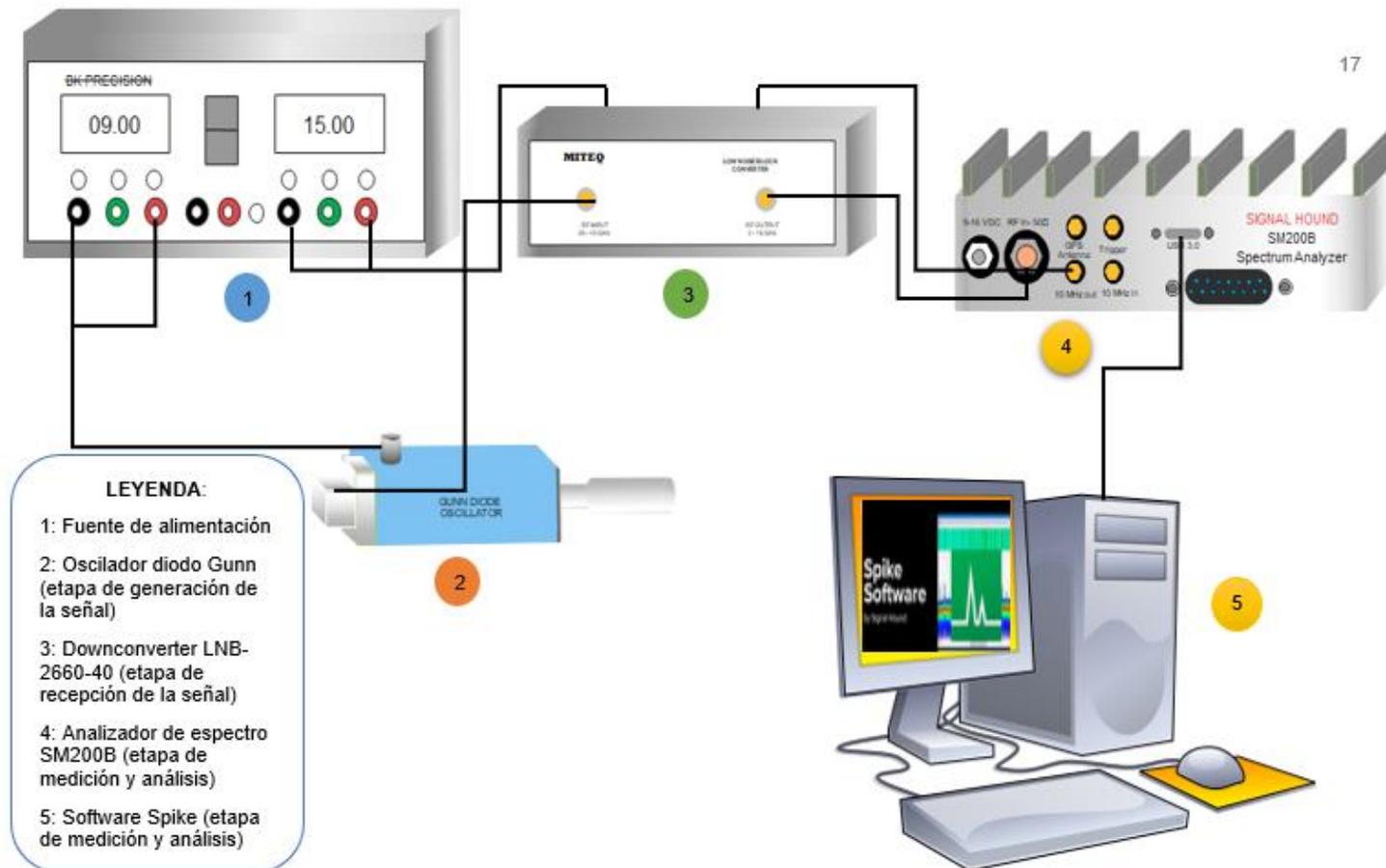
Para la implementación de la plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40GHz, se utilizó el analizador de espectro RF y receptor de monitorización SM200B con su respectivo software *Spike*, en conjunto con el downconverter LNB-2660-40, el oscilador de diodo *Gunn* y la fuente de alimentación de corriente directa de BK PRECISION, modelo 1761.

### Diseño de la plataforma básica de pruebas

La Figura 11, muestra un esquema gráfico de la plataforma básica de pruebas hasta 40GHz, con todos los dispositivos que forma parte de la misma, más una computadora en el cual se ha instalado previamente el *software Spike* correspondiente al analizador de espectro RF y receptor de monitorización SM200B, a través del cual se analizaron los parámetros obtenidos.

Figura 11.

Montaje de la plataforma de pruebas



### **Montaje y conexión entre equipos de la Plataforma de pruebas**

**Fuente de alimentación 1761 con oscilador de diodo Gunn.** Trabaja con voltaje de alimentación de 9 voltios al oscilador de diodo *Gunn* a través de un cable que tenga en un extremo BNC (oscilador) y en el otro, dos conectores cilíndricos de 4 milímetros (fuente de alimentación), la conexión se realiza tomando en cuenta la polaridad.

**Fuente de alimentación del downconverter LNB-2660-40.** En la parte posterior del downconverter se encuentra un puerto RS-232 que tiene las siguientes especificaciones: PIN No.1 +15 voltios, los cuales son administrados a través de la fuente de alimentación, PIN No.2 bloqueo de fase, PIN No.3 alarma, PIN No.5 tierra y PIN No.4, 6-9 sin conexión.

**Oscilador de diodo Gunn con downconverter LNB.2660-40.** Estos dos dispositivos se conectan a través de un cable coaxial de bajas pérdidas que tenga en sus dos extremos conectores SMA macho. En el downconverter va conectado a la entrada RF *input* de 26GHz a 40GHz y en el oscilador de diodo *Gunn* en el adaptador de guía de onda a coaxial PE9804. Este cable fue construido en el CICTE

**Downconverter LNB-2660-40 con analizador de espectro SM200B.** Estos dos dispositivos se conectan de manera doble, la primera es mediante un cable que tenga en un extremo un conector SMA macho colocado en el puerto RF *output* de 2GHz a 18 GHz del *downconverter* y en el otro un conector N macho que va en el puerto RF *In* 50Ω, +20dBm MAX. Y la segunda conexión es a través de un cable que tenga en sus extremos conectores SMA macho, que va dispuestos en el puerto de 10MHz 0dBm (downconverter) y en el puerto de 10MHz *out* (SM200B) para que el *Downconverter* y el SMA200B estén enganchados en fase.

**SMA200B con la computadora.** Estos dos dispositivos van conectados a través de un cable micro-USB (SM200B) USB 3.0 (computadora) en sus respectivos puertos.

**Determinación de los parámetros de prueba.** La primera etapa encargada de generar la señal de RF en la banda de 26GHz a 40Ghz, ha tomado en consideración el rango de frecuencias del oscilador *Gunn* desde 8.5GHz hasta 9.3GHz, determinándose el primer, segundo y tercer armónico, con su respectivo nivel de potencia en (dBm), tal como se muestra en la Tabla 11, para esta medición se utilizó el analizador de espectro Agilent E4408B que tiene un rango de frecuencia que va desde 9kHz hasta 26.5GHz.

Del rango de frecuencias expuesto en la tabla anterior, se ha tomado en cuenta específicamente a 8.85GHz, en donde su segundo armónico corresponde a 17.7GHz y su tercer armónico es 26.5GHz con una intensidad de señal de -28.1dBm.

**Tabla 11.**

*Tabla de frecuencias, potencia y armónicos.*

PRIMER ARMÓNICO		SEGUNDO ARMÓNICO		TERCER ARMÓNICO	
Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad	Frecuencia	Intensidad
(GHz)	(dBm)	(GHz)	(dBm)	(GHz)	(dBm)
8.5	8.36	17	-15.42	25.5	-37.48
8.55	9.2	17.05	-15.12	25.6	-23.5
8.6	10.63	17.15	-19.45	25.8	-19.9
8.65	11.35	17.25	-27.1	25.9	-19.01
8.7	10.7	17.35	-14.9	26	-17.3
8.75	10.8	17.45	-9.2	26.2	-28.4
8.8	9.9	17.55	-17.7	26.35	-25.8
8.85	8.9	17.7	-13.42	26.5	-28.1
8.9	9.32	17.5	-3.66	26.6	-14.1
8.95	9.92	17.9	-2.55	26.8	-19.5
9	9.8	17.95	-2.22	26.9	-17.6
9.05	9.55	18.05	-15.77		
9.1	9.3	18.2	-15.09		
9.15	9.2	18.25	-15.7		
9.2	8.7	18.4	-12.6		
9.25	8.52	18.45	-16.02		
9.3	7.8	18.55	-17.9		

Del rango de frecuencias expuesto en la tabla anterior, se ha tomado en cuenta específicamente a 8.85GHz, en donde su segundo armónico corresponde a 17.7GHz y su tercer armónico es 26.5GHz con una intensidad de señal de -28.1dBm.

### **Simulación de la plataforma de pruebas**

Para la simulación de la plataforma de pruebas se debe realizar la conexión correcta de los dispositivos y la instalación del *software Spike* en la computadora, ya que es la herramienta informática que tiene el analizador de espectro SM200B.

## **Software Spike**

*Spike*, es un software ideal para realizar análisis de RF potente y asequible, permitiendo el control total del analizador de espectro y monitoreo, una pantalla de espectrograma configurable e interfaz de usuario y diversos modos de análisis. Los pasos para su instalación son los siguientes:

**Requisitos del Sistema.** Sistema operativo *Windows 10* o *Ubuntu18.04*, procesador *quad-core* i5/i7, por lo menos 1GB de memoria RAM, controlador de *host* extensible Intel USB 3.0.

**Instalación.** Los instaladores se descargan de la página oficial [www.signalhound.com/Spike](http://www.signalhound.com/Spike). Para los controladores, en el sistema operativo *Windows 10*, se hace clic derecho en el archivo *.inf* en la carpeta del controlador respectivo y selecciona Instalar.

**Conexión computadora con SM200B.** Se debe conectar primero en el puerto USB 3.0 de la computadora el cable USB del dispositivo y luego a éste. Durante la primera conexión puede tardar unos segundos en reconocer al analizador de espectro e instalar los últimos controladores. Una vez que el dispositivo sea detectado, se iniciará automáticamente el software y el LED del panel frontal estará encendido de color naranja sólido.

**Ejecución de *Spike* por primera vez.** Si un dispositivo USB está conectado a la computadora o se ha guardado la dirección de red de un dispositivo *Ethernet* cuando se inicia el *software*, *Spike* intentará abrir el dispositivo inmediatamente, pero en el caso de que ninguna de estas opciones sea factible, conecte el dispositivo y use la opción de menú: Archivo, Conectar dispositivo, para abrir el dispositivo (Signal Hound, 2020)

## Capítulo IV

### Pruebas con los dispositivos

#### Resultados preliminares

Las pruebas realizadas con los dispositivos como resultado preliminar dieron lugar a la Tabla 12, en la cual se detallan las frecuencias obtenidas después de haber restado el valor de 42GHz correspondiente al oscilador local interno del *downconverter* LNB-2660-40 y cada uno de los respectivos armónicos.

**Tabla 12.**

*Tabla de frecuencias obtenida en relación al oscilador local de 42GHz.*

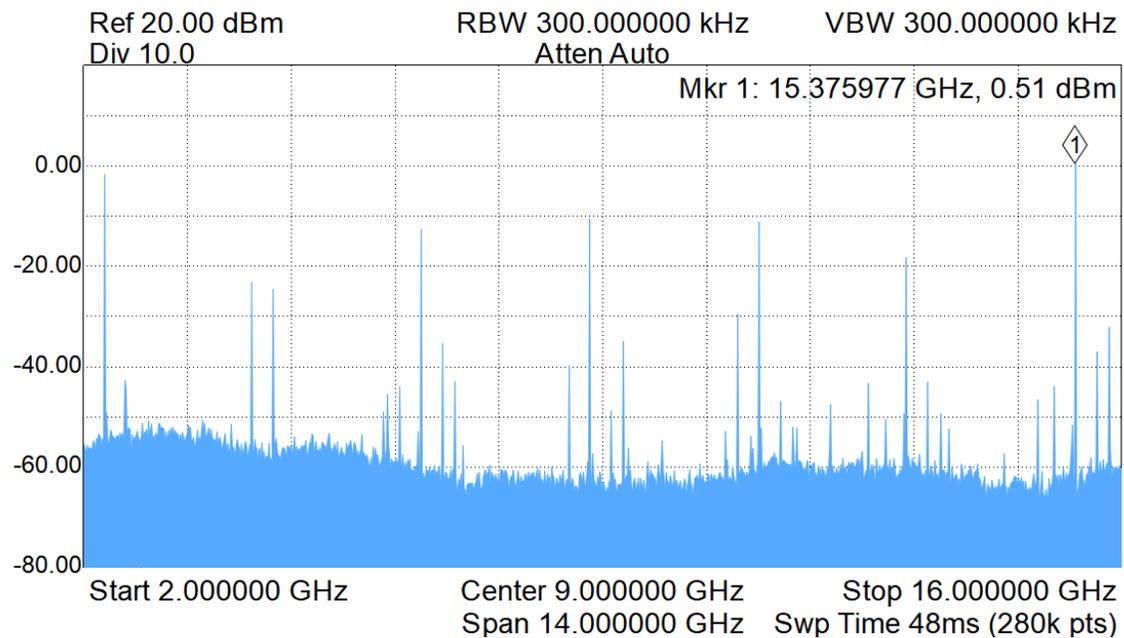
OL-PRIMER ARMÓNICO	OL-SEGUNDO ARMÓNICO	OL- TERCER ARMÓNICO
Frecuencia (GHz)	Frecuencia (GHz)	Frecuencia (GHz)
33.5	25	16.5
33.45	24.95	16.4
33.4	24.85	16.2
33.35	24.75	16.1
33.3	24.65	16
33.25	24.55	15.8
33.2	24.45	15.65
33.15	24.3	15.5
33.1	24.5	15.4
33.05	24.1	15.2
33	24.05	15.1
32.95	23.95	14.85
32.9	23.8	14.7
32.85	23.75	14.55
32.8	23.6	14.4
32.75	23.55	14.25
32.7	23.45	14.1

Si específicamente se toma en cuenta el valor de 8.85GHz en la Tabla 12, se puede observar que los resultados son: 33.15GHz, 24.3GHz y 15.5GHz. De los cuales 5.5GHz es la frecuencia que se ha obtenido mediante el *software Spike*, luego de haber utilizado el analizador de espectro SM200B.

### Gráficas obtenidas

#### Figura 12.

##### Gráfica de Barrido



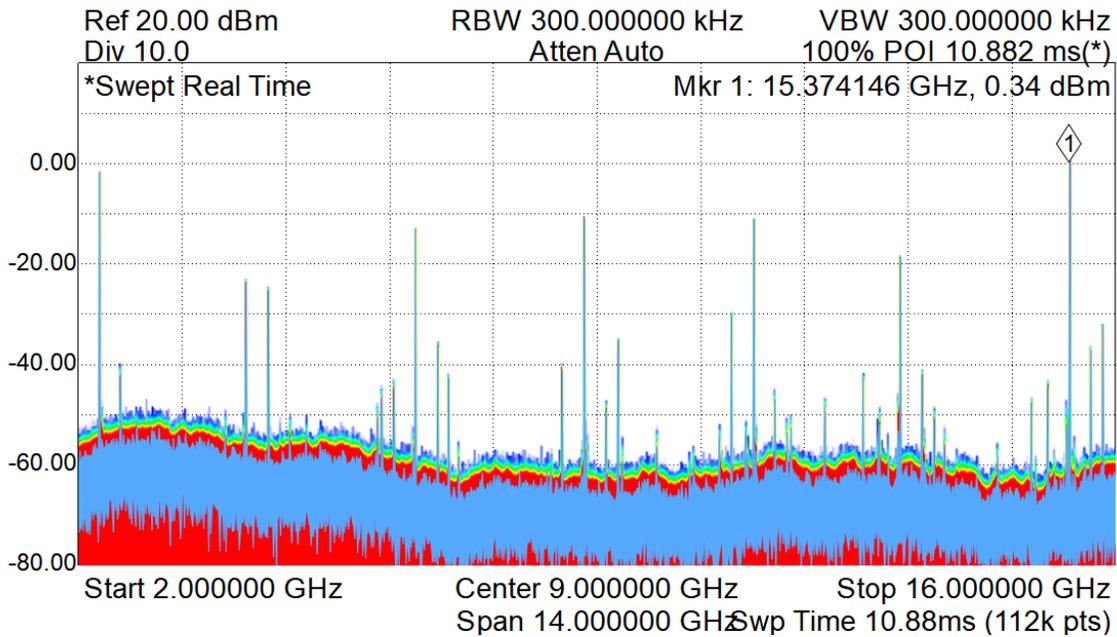
*Nota:* En la gráfica de barrido de frecuencia, se puede apreciar que el pico se encuentra en 15.375977GHz, el cual corresponde a un valor aproximado a 15.5GHz, el mismo que se obtuvo en la Tabla 13 como resultado de la resta del valor del oscilar local menos el tercer armónico de 8.85GHz. El nivel de referencia del instrumento es de 20 dBm y la intensidad de la señal es de 0.51dBm.

$$OL - 3er\ armónico = frecuencia\ deseada$$

$$2\text{GHz} - 26.5\text{GHz} = 15.5\text{GHz}$$

**Figura 13.**

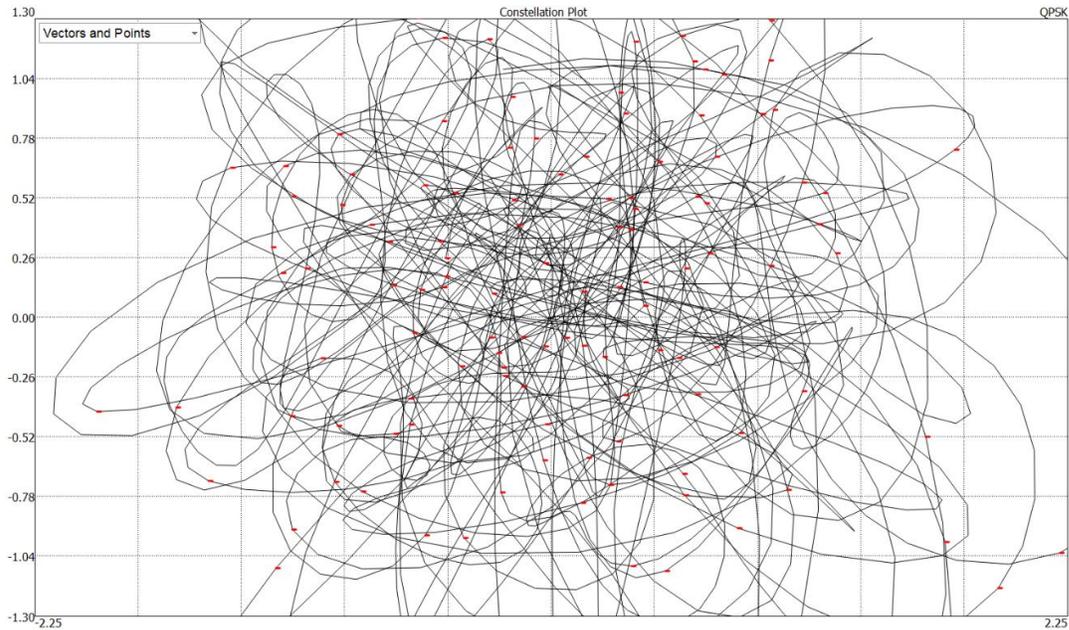
*Barrido en tiempo real*



*Nota:* En la Figura 13, se muestra la captura de la pantalla de persistencia de tiempo real, que es la acumulación de aproximadamente 2/3 de segundo de adquisición de datos en tiempo real. Esta pantalla muestra una vista tridimensional de la densidad de la señal en el intervalo de 2GHz a 16GHz, en donde el color del gráfico es la densidad del espectro en cualquier punto dado, a medida que aumenta la densidad, el color cambia de azul, a verde y posteriormente rojo. El pico de esta gráfica es de 15.374146GHz con una intensidad de señal de 0.34dBm.

**Figura 14.**

*Análisis de modulación digital*



*Nota:* El diagrama de constelación permite al usuario a visualizar la calidad de la señal e identificar las deficiencias de la señal, como ruido de fase, desequilibrio de amplitud y error de cuadratura. La gráfica de constelación muestra los estados de modulación y las transiciones de la señal de entrada en el plano complejo.

## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

El desarrollo de la plataforma de pruebas para sistemas de comunicaciones con ondas milimétricas hasta 40GHz, se realizó mediante el montaje dispositivos electrónicos disponibles en el CICTE, lo cual permitirá dentro del ámbito militar que instituciones como el CMEE, cuenten con una alternativa de bajo costo, que pueda brindar el mantenimiento y posible calibración de equipos de transmisión y recepción que trabajen en esta banda de frecuencias.

El estudio del estado del arte permitió determinar que el *downconverter* LNB-2660-40 es el dispositivo adecuado y disponible en el CICTE para la implementación de la plataforma de pruebas, ya que procesa señales milimétricas de 26GHz a 40GHz (RF *Input*) para convertirlas en señales de 2GHz a 16GHz (RF *Output*), a través de sus componentes internos: *mixer* triple balanceado TB0440LW1, amplificadores de bajo ruido JJS4-260004000-35-5P y AFS4-002001800—35-10P-4, oscilador local interno de 42GHz y multiplicador de frecuencia activo 3X SYS3X3842.

La plataforma para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40GHz, fue ejecutada mediante el montaje de dispositivos electrónicos en tres importantes etapas: Generación de la señal requerida de 26GHz a 40GHz a través del oscilador de diodo tipo Gunn, Recepción por medio del *downconverter* LNB-2660-40 y Medición con el analizador de espectro y receptor de monitorización SM200B.

La plataforma de pruebas se desarrolló mediante los dispositivos existentes en el CICTE tal como muestra la Figura 11, a través de un acertado diseño e implementación, cuyos resultados fueron analizados con el *software Spike*, propio del analizador de espectro y receptor de monitorización SM200B; las gráficas de barrido de frecuencias, barrido en tiempo real, análisis de armónicos y análisis digital, evidencian la existencia de un pico máximo de 15.349512GHz, el cual corresponde a un valor aproximado a 15.5GHz, el mismo que se obtuvo en la Tabla 13, como resultado de la resta del valor del oscilador local menos el tercer armónico de 8.85GHz, con un nivel de referencia es de 20 dBm y la intensidad de la señal de 0.73dBm.

### **Recomendaciones**

Se recomienda implementar esta plataforma de pruebas para sistemas de telecomunicaciones con ondas milimétricas hasta 40GHz en el laboratorio del Centro de Metrología del Ejército, ya que constituye una herramienta de bajo costo desarrollada con equipos disponibles en el CICTE, los cuales de una manera significativa contribuirán al fortalecimiento de sus capacidades y cumplimiento de su misión, a través del mantenimiento y calibración de equipos de transmisión y recepción que operan en este rango de frecuencias.

Fomentar la utilización de equipos electrónicos dentro de la ejecución de proyectos de titulación patrocinados por el CICTE tales como, el analizador de espectro RF y receptor de monitorización SM200B con su respectivo *software Spike*, ya que constituye una herramienta fundamental para la obtención de datos y gráficas que facilitan su ejecución.

## Referencias

- ARA Antenna Research. (n.d.). *Horn Antennas* (pp. 54–61)
- B&K Precision Corp. (2015). *Triple Output DC Power Supplies*.
- Busari, S. A., Huq, K. M. S., Mumtaz, S., Dai, L., & Rodriguez, J. (2018). Millimeter-Wave Massive MIMO Communication for Future Wireless Systems: A Survey. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(2), 836–869. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2787460>
- Centro de Metrología del Ejército Ecuatoriano. (2016). *Centro de Metrología del Ejército Ecuatoriano*. <http://cmee.mil.ec/centrodemetrologia/>
- Chatterjee, S., & Biswas, B. N. (2012). Simultaneous Oscillation in Gunn Oscillator. *Journal of Electron Devices*, 14, 1128–1131.
- Hemadeh, I. A., Satyanarayana, K., El-Hajjar, M., & Hanzo, L. (2018). Millimeter-Wave Communications: Physical Channel Models, Design Considerations, Antenna Constructions, and Link-Budget. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(2), 870–913. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2783541>
- Jeon, Y., & Bang, S. (2018). Front-end module of 18-40 GHz ultra-wideband receiver for electronic warfare system. *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, 18(3), 188–198. <https://doi.org/10.26866/jees.2018.18.3.188>
- Maltsev, A., Erceg, V., Parahia, E., Hansen, C., Maslennikov, R., Lomayev, A., & Sevastyanov, A. (2010). *Channel Models for 60 GHz WLAN Systems*. [https://doi.org/IEEE 802.11-09/0334r8](https://doi.org/IEEE%20802.11-09/0334r8)
- MITEQ. (n.d.-a). *Active 3X Frequency Multiplier Model: SYS3X3842* (p. 1).

- MITEQ. (n.d.-b). *Low-Noise Block Downconverters Model Series : LNB-2640-40* (pp. 471–472).
- MITEQ. (n.d.-c). *Phase-Locked Sources*.
- MITEQ. (2009). *AFS / JS Series Amplifiers* (pp. 3–4).
- MITEQ. (2012). *4 to 40 GHz Triple-Balanced Mixer Model: TB0440LW1* (pp. 105–106).
- PASTERNAK. (2018). *WR-90 Square Type Flange to SMA Female Waveguide to Coax Adapter Operating from 8 . 2 GHz to 12 . 4 GHz* (pp. 1–4).
- Rappaport, T. S., Ben-Dor, E., Murdock, J. N., & Qiao, Y. (2012). 38 GHz and 60 GHz angle-dependent propagation for cellular & peer-to-peer wireless communications. *IEEE International Conference on Communications*, 4568–4573.  
<https://doi.org/10.1109/ICC.2012.6363891>
- Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., Wong, G. N., Schulz, J. K., Samimi, M., & Gutierrez, F. (2013). Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! *IEEE Access*, 1, 335–349.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260813>
- Robertson, I., Somjit, N. y, & Chongcheawchamnan, M. (2016). Microwave and Millimetre-Wave Design for Wireless Communications. In *Microwave and Millimetre-Wave Design for Wireless Communications*. <https://doi.org/10.1002/9781118917312>
- Signal Hound. (2019). *SM200B Real-Time Spectrum Analyzer & Monitoring Receiver* (pp. 1–2).
- Signal Hound. (2020). *Spike Spectrum Analyzer Software User Manual* (p. 125).
- Vychodil, J., Blumenstein, J., Mikulasek, T., Prokes, A., & Derbek, V. (2014). Measurement of in-vehicle channel - Feasibility of ranging in UWB and MMW band. *2014 International*

*Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE 2014 - Proceedings*, 695–698.

<https://doi.org/10.1109/ICCVE.2014.7297639>

Zhang, Y., & Mao, J. (2019). An Overview of the Development of Antenna-in-Package Technology for Highly Integrated Wireless Devices. *Proceedings of the IEEE*, 107(11), 2265–2280. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2933267>