



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**“EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA 5G IMPLEMENTADA CON  
SDR EN LA BANDA FR1 PARA DETERMINAR SUS  
PRESTACIONES”**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**AUTOR: BYRON STALYN MAYORGA OROZCO**

Riobamba - Ecuador

2024



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

**“EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA 5G IMPLEMENTADA CON  
SDR EN LA BANDA FR1 PARA DETERMINAR SUS  
PRESTACIONES”**

**Trabajo de Titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**AUTOR: BYRON STALYN MAYORGA OROZCO**

**DIRECTOR: ING. PAUL DAVID MORENO AVILÉS Ph.D.**

Riobamba - Ecuador

2024

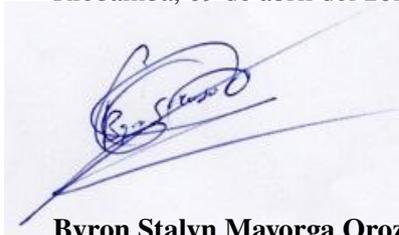
© 2024, Byron Stalyn Mayorga Orozco

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Byron Stalyn Mayorga Orozco, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 09 de abril del 2024



**Byron Stalyn Mayorga Orozco**

**1719831404**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA**

**CARRERA TELECOMUNICACIONES**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El Trabajo de Titulación; Tipo: Proyecto de Investigación “**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA 5G IMPLEMENTADA CON SDR EN LA BANDA FR1 PARA DETERMINAR SUS PRESTACIONES**”, realizado por el señor: **Byron Stalyn Mayorga Orozco**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. Hugo Moreno PhD  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



2024-04-09

Ing. David Moreno PhD  
**DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**



2024-04-09

Ing. Jefferson Ribadeneira PhD  
**ASESOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**



2024-04-09

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo de titulación a la memoria de mi madre Yolanda, que aunque no este conmigo, siempre está en mi corazón guiándome en cada uno de mis pasos. A mi familia que siempre confió en mi y me brindaron su apoyo, desde mi abuela Carmen, que me ayudo con una habitación para poder estudiar, a mi padre Marcelo, que siempre hizo su mejor esfuerzo para ayudarme, a mis hermanas Carol y Gaby grandes profesionales que me motivaron a seguir adelante, a mi tía Mayra que pese a la distancia siempre me ayudó desde el inicio cuando más lo necesitaba, a mi prima Patricia por darme un trabajo con el que pude costear mis gastos, a la familia Galeas Orozco que siempre me han abierto las puertas de su casa y en especial a mi pareja y futura esposa Paulina que siempre estuvo allí en el día a día y jamás dejó de creer en mi incluso cuando yo dejé de hacerlo.

Byron

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi agradecimiento, en primer lugar a Dios por darme la fortaleza necesaria para seguir adelante cada día.

Agradezco a todas aquellas personas e instituciones que hicieron posible culminar este logro académico tan importante, desde la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por abrirme las puertas y darme la oportunidad de forjar mi carácter y probarme a mi mismo para superar cada dificultad que se iba presentando, a la empresa FIBRATELECOM por ser parte del primer grupo de pasantes y aprender en cada una de las áreas laborales y a la Unidad Educativa Simón Rodríguez en Licanportanbuenaacogidaporpartedecadaunadesusautoridades.

A mi tutor, Ing. David Moreno, subdirector del proyecto de investigación 5GFR1EC y coordinador de la carrera de Telecomunicaciones que estuvo pendiente del desarrollo del trabajo escrito dándome las pautas necesarias para realizarlo eficientemente, a mi asesor, Ing. Jefferson Ribadeneira, director del proyecto de investigación 5GFR1EC por su orientación y conocimientos y a los miembros del proyecto Ing. Robert Rodríguez e Ing. Luis Pesantez por ayudarme en la parte técnica, darme siempre buenas ideas y sugerencias.

También quiero agradecer a todos los docentes que han formado parte de mi instrucción a lo largo de la carrera y a todos mis compañeros que han contribuido de alguna manera a este logro, especialmente a los miembros del GICI y del Radio Club FIE-ESPOCH.

Byron

# ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS . . . . .	xiv
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES . . . . .	xvi
ÍNDICE DE ECUACIONES . . . . .	xvii
ÍNDICE DE ANEXOS . . . . .	xviii
RESUMEN . . . . .	xix
SUMARY . . . . .	xx
INTRODUCCIÓN . . . . .	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>2</b>
1.1 Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.2.1 <i>Objetivo General</i> . . . . .	2
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> . . . . .	2
1.3 Justificación . . . . .	2
1.3.1 <i>Justificación Teórica</i> . . . . .	2
1.3.2 <i>Justificación Aplicativa</i> . . . . .	5
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>8</b>
2.1 Estado del arte red móvil 5G . . . . .	8
2.1.1 <i>Descripción de la tecnología</i> . . . . .	8
2.1.1.1 <i>Capa física</i> . . . . .	8
2.1.1.2 <i>Modulación</i> . . . . .	10
2.1.2 <i>Visión general de la red 5G</i> . . . . .	11

<b>2.1.3</b>	<b><i>Características de la red 5G</i></b> . . . . .	11
<b>2.1.4</b>	<b><i>Aspectos que considerar de la UIT sobre 5G</i></b> . . . . .	12
<b>2.1.5</b>	<b><i>Estandarización de redes 5G</i></b> . . . . .	14
2.1.5.1	<i>Release 16</i> . . . . .	15
2.1.5.2	<i>Release 17</i> . . . . .	15
2.1.5.3	<i>Release 18 y 19</i> . . . . .	16
<b>2.2</b>	<b>Opciones de implementación</b> . . . . .	16
<b>2.2.1</b>	<b><i>Non-standalone vs Standalone</i></b> . . . . .	16
<b>2.3</b>	<b>Arquitectura 5G</b> . . . . .	17
<b>2.3.1</b>	<b><i>Núcleo de la red</i></b> . . . . .	18
2.3.1.1	<i>UPF</i> . . . . .	18
2.3.1.2	<i>AMF</i> . . . . .	19
2.3.1.3	<i>NRF</i> . . . . .	19
<b>2.3.2</b>	<b><i>Estación base para 5G</i></b> . . . . .	20
<b>2.4</b>	<b>Espectro para 5G</b> . . . . .	20
<b>2.4.1</b>	<b><i>Espectro por debajo de 1 GHz</i></b> . . . . .	21
<b>2.4.2</b>	<b><i>Espectro entre 1 y 6 GHz</i></b> . . . . .	22
<b>2.4.3</b>	<b><i>Espectro por encima de 6 GHz</i></b> . . . . .	22
<b>2.4.4</b>	<b><i>Clasificación de las bandas</i></b> . . . . .	22
2.4.4.1	<i>Banda FR1</i> . . . . .	23
<b>2.5</b>	<b>Panorama internacional</b> . . . . .	25
<b>2.5.1</b>	<b><i>Asia y Europa</i></b> . . . . .	25
<b>2.5.2</b>	<b><i>Estados Unidos, México y Canadá</i></b> . . . . .	27
2.5.2.1	<i>EE. UU:</i> . . . . .	27
2.5.2.2	<i>Canadá</i> . . . . .	27
2.5.2.3	<i>México</i> . . . . .	27
<b>2.5.3</b>	<b><i>Latinoamérica</i></b> . . . . .	28

2.5.3.1	<i>Argentina</i>	28
2.5.3.2	<i>Brasil</i>	29
2.5.3.3	<i>Chile</i>	29
2.5.3.4	<i>Colombia</i>	30
2.5.3.5	<i>Perú</i>	32
<b>2.5.4</b>	<b><i>Ecuador</i></b>	<b>32</b>
<b>2.6</b>	<b>Equipos necesarios</b>	<b>33</b>
<b>2.6.1</b>	<b><i>SDR</i></b>	<b>33</b>
2.6.1.1	<i>USRP B210</i>	33
<b>2.6.2</b>	<b><i>Antena ANT-120-008.</i></b>	<b>34</b>
<b>2.6.3</b>	<b><i>Equipo de usuario Redmi Note 12 Pro 5G</i></b>	<b>36</b>
<b>2.7</b>	<b>Parámetros 5G NR</b>	<b>36</b>
<b>2.7.1</b>	<b><i>SS-RSRP</i></b>	<b>36</b>
2.7.1.1	<i>Características</i>	37
2.7.1.2	<i>SS-RSRPP filtrado de capa 1</i>	37
2.7.1.3	<i>SS-RSRPP filtrado de capa 3</i>	37
<b>2.7.2</b>	<b><i>NR-RSSI</i></b>	<b>38</b>
<b>2.7.3</b>	<b><i>SS-RSRQ</i></b>	<b>38</b>
2.7.3.1	<i>Características</i>	39
2.7.3.2	<i>Cálculo teórico</i>	39
<b>2.7.4</b>	<b><i>SINR</i></b>	<b>40</b>

### **CAPÍTULO III**

<b>3</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	<b>41</b>
<b>3.1</b>	<b>Introducción</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>Bandas de frecuencia</b>	<b>41</b>
<b>3.2.1</b>	<b><i>Criterios de selección de las bandas</i></b>	<b>41</b>

<b>3.2.2</b>	<b><i>Asignación a nivel mundial</i></b> . . . . .	42
3.2.2.1	<i>Asía y Europa</i> . . . . .	42
3.2.2.2	<i>Norte América</i> . . . . .	45
3.2.2.3	<i>América del Sur</i> . . . . .	45
3.2.2.4	<i>Ecuador</i> . . . . .	49
<b>3.2.3</b>	<b><i>Frecuencias factibles</i></b> . . . . .	49
3.2.3.1	<i>Banda n28 (700 MHz)</i> . . . . .	49
3.2.3.2	<i>Banda n3 (1,8 GHz)</i> . . . . .	50
3.2.3.3	<i>Banda n40 (2,4 GHz)</i> . . . . .	51
3.2.3.4	<i>Banda n78 (3,5 GHz)</i> . . . . .	51
<b>3.3</b>	<b>Parámetros de calidad y disponibilidad de radiofrecuencia</b> . . . . .	52
3.3.1	<i>Cobertura</i> . . . . .	52
3.3.2	<i>Latencia</i> . . . . .	52
3.3.3	<i>Velocidad de conexión:</i> . . . . .	53
<b>3.4</b>	<b>Parámetros evaluables en ambiente de laboratorio</b> . . . . .	53
3.4.1	<i>Toma de mediciones</i> . . . . .	53
3.4.1.1	<i>Cobertura</i> . . . . .	53
3.4.1.2	<i>Velocidad de transmisión</i> . . . . .	54
3.4.1.3	<i>Latencia</i> . . . . .	54
<b>3.5</b>	<b>Implementación de la red 5G SA</b> . . . . .	55
3.5.1	<i>Instalación núcleo de la red</i> . . . . .	56
3.5.1.1	<i>Prerrequisitos para la instalación del núcleo</i> . . . . .	56
3.5.1.2	<i>Construcción del núcleo</i> . . . . .	57
3.5.1.3	<i>Modificación de las funciones del núcleo</i> . . . . .	58
3.5.1.4	<i>Ejecución de las funciones del núcleo</i> . . . . .	61
3.5.1.5	<i>Construcción del webUI</i> . . . . .	62
3.5.2	<i>Instalación de srsRAN Project</i> . . . . .	64

3.5.2.1	<i>Configuración del gNB</i>	64
3.5.3	<b>Programación de la tarjeta SIM</b>	65
3.5.4	<b>Configuración del equipo de usuario</b>	67

## CAPÍTULO IV

<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>70</b>
<b>4.1</b>	<b>Ejecución de la red a diferentes frecuencias</b>	<b>70</b>
4.1.1	<i>Frecuencia 780,5 MHz (n28).</i>	70
4.1.2	<i>Frecuencia 1842,5 MHz (n3)</i>	71
4.1.3	<i>Frecuencia 2400 MHz (n40)</i>	72
4.1.4	<i>Frecuencia 3489,42 MHz (n78)</i>	73
<b>4.2</b>	<b>Mediciones de los parámetros de la red 5G SA de manera espacial</b>	<b>74</b>
4.2.1	<b>Cobertura</b>	74
4.2.1.1	<i>Tablas de medidas de RSRP, RSRQ y SNR para la frecuencia 780,5 MHz</i>	74
4.2.1.2	<i>Tablas de medidas de RSRP, RSRQ y SNR para la frecuencia 1842,5 MHz</i>	75
4.2.1.3	<i>Tablas de medidas de RSRP, RSRQ y SNR para la frecuencia 2400 MHz</i>	76
4.2.1.4	<i>Tablas de medidas de RSRP, RSRQ y SNR para la frecuencia 3489,42 MHz</i>	77
4.2.1.5	<i>Resultados RSRP</i>	78
4.2.1.6	<i>Resultados para RSRQ.</i>	79
4.2.1.7	<i>Resultados para SNR.</i>	81
4.2.2	<b>Velocidad de transmisión</b>	82
4.2.2.1	<i>Tablas de valores de velocidad de transmisión para la frecuencia 780,5 MHz</i>	82
4.2.2.2	<i>Tablas de medidas de velocidad de transmisión para la frecuencia 1842,5 MHz</i>	82
4.2.2.3	<i>Tablas de medidas de velocidad de transmisión para la frecuencia 2400 MHz</i>	83
4.2.2.4	<i>Tablas de medidas de velocidad de transmisión para la frecuencia 3489,42 MHz</i>	83
4.2.2.5	<i>Resultados velocidad de transmisión.</i>	83
4.2.3	<b>Latencia</b>	85

4.2.3.1	<i>Tablas de valores de latencia para la frecuencia 780,5 MHz</i> . . . . .	85
4.2.3.2	<i>Tablas de medidas de latencia para la frecuencia 1842,5 MHz</i> . . . . .	85
4.2.3.3	<i>Tablas de medidas de latencia para la frecuencia 2400 MHz</i> . . . . .	86
4.2.3.4	<i>Tablas de medidas de latencia para la frecuencia 3489,42 MHz</i> . . . . .	86
4.2.3.5	<i>Resultados de latencia</i> . . . . .	86
<b>4.3</b>	<b>Mediciones de los parámetros de la red 5G SA de manera temporal</b> . . . . .	<b>88</b>
4.3.1	<i>Cobertura</i> . . . . .	88
4.3.2	<i>Velocidad de transmisión</i> . . . . .	88
4.3.3	<i>Latencia</i> . . . . .	89
<b>4.4</b>	<b>Discusión de resultados</b> . . . . .	<b>89</b>
4.4.1	<i>Cobertura</i> . . . . .	89
4.4.2	<i>Velocidad de transmisión</i> . . . . .	90
4.4.3	<i>Latencia</i> . . . . .	90

**CAPÍTULO V**

<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>91</b>
5.1	<i>Conclusiones</i> . . . . .	91
5.2	<i>Recomendaciones</i> . . . . .	91

**BIBLIOGRAFÍA**

**ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla2-1:</b>	Canales físicos de control . . . . .	10
<b>Tabla2-2:</b>	Rangos de frecuencias para 5G 3GPP. . . . .	23
<b>Tabla2-3:</b>	Bandas de frecuencia para 5G. . . . .	24
<b>Tabla2-4:</b>	Redes comerciales activadas en el mundo. . . . .	25
<b>Tabla2-5:</b>	Bandas de frecuencias IMT sin asignar en Colombia. . . . .	31
<b>Tabla2-6:</b>	Redes Celulares Redmi Note 12 Pro 5G. . . . .	36
<b>Tabla3-1:</b>	Características de las bandas más utilizadas en 5G. . . . .	44
<b>Tabla3-2:</b>	Bandas FDD en Argentina. . . . .	46
<b>Tabla3-3:</b>	Bandas TDD en Argentina. . . . .	46
<b>Tabla3-4:</b>	Bandas FDD en Brasil. . . . .	47
<b>Tabla3-5:</b>	Bandas TDD en Brasil. . . . .	47
<b>Tabla3-6:</b>	Bandas FDD en Colombia. . . . .	47
<b>Tabla3-7:</b>	Bandas TDD en Colombia. . . . .	48
<b>Tabla3-8:</b>	Bandas FDD en Chile. . . . .	48
<b>Tabla3-9:</b>	Bandas TDD en Chile. . . . .	48
<b>Tabla3-10:</b>	Umbrales para RSRP, RSRQ y SINR. . . . .	53
<b>Tabla4-1:</b>	Parámetros de 0 a 135 grados. . . . .	74
<b>Tabla4-2:</b>	Parámetros de 180 a 315 grados. . . . .	75
<b>Tabla4-3:</b>	Parámetros de 0 a 135 grados. . . . .	75
<b>Tabla4-4:</b>	Parámetros de 180 a 315 grados. . . . .	76
<b>Tabla4-5:</b>	Parámetros de 0 a 135 grados. . . . .	76
<b>Tabla4-6:</b>	Parámetros de 180 a 315 grados. . . . .	77
<b>Tabla4-7:</b>	Parámetros de 0 a 135 grados. . . . .	77
<b>Tabla4-8:</b>	Parámetros de 180 a 315 grados. . . . .	78
<b>Tabla4-9:</b>	Media y Normalidad . . . . .	78
<b>Tabla4-10:</b>	Media y Normalidad . . . . .	80
<b>Tabla4-11:</b>	Media y Normalidad . . . . .	81
<b>Tabla4-12:</b>	Velocidad de transmisión n28 desde 0° a 315°. . . . .	82
<b>Tabla4-13:</b>	Velocidad de transmisión n3 desde 0° a 315°. . . . .	82
<b>Tabla4-14:</b>	Velocidad de transmisión n40 desde 0° a 315°. . . . .	83
<b>Tabla4-15:</b>	Velocidad de transmisión n78 desde 0° a 315°. . . . .	83
<b>Tabla4-16:</b>	Media y Normalidad . . . . .	84
<b>Tabla4-17:</b>	Latencia n28 desde 0° a 315°. . . . .	85
<b>Tabla4-18:</b>	Latencia n3 desde 0° a 315°. . . . .	85

<b>Tabla4-19:</b> Latencia n40 desde 0° a 315° . . . . .	86
<b>Tabla4-20:</b> Latencia n78 desde 0° a 315° . . . . .	86
<b>Tabla4-21:</b> Media y Normalidad . . . . .	87
<b>Tabla4-22:</b> Media y Normalidad . . . . .	88

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-1:</b>	Aplicaciones de la Tecnología 5G . . . . .	3
<b>Ilustración 1-2:</b>	Despliegue de la red 5G en el mundo . . . . .	5
<b>Ilustración 1-3:</b>	Esquema del estado del arte . . . . .	6
<b>Ilustración 1-4:</b>	Esquema general de la red 5G SA . . . . .	7
<b>Ilustración 2-1:</b>	Señal OFDM en el dominio del tiempo y la frecuencia. . . . .	9
<b>Ilustración 2-2:</b>	Variación de tiempo de símbolo respecto al SCS. . . . .	10
<b>Ilustración 2-3:</b>	Evolución del IMT-2020 e IMT-Avanzada. . . . .	13
<b>Ilustración 2-4:</b>	IMT-2020 parámetros de la especificación M.2083 de la ITU-R. . . . .	14
<b>Ilustración 2-5:</b>	Release 16 y 17. . . . .	15
<b>Ilustración 2-6:</b>	Release 18 y 19. . . . .	16
<b>Ilustración 2-7:</b>	Non-standalone vs Standalone. . . . .	17
<b>Ilustración 2-8:</b>	Arquitectura general 5G. . . . .	17
<b>Ilustración 2-9:</b>	Rango de Frecuencia 5G. . . . .	21
<b>Ilustración2-10:</b>	Carrera por el 5G en Asia. . . . .	26
<b>Ilustración2-11:</b>	USRP B210 . . . . .	34
<b>Ilustración2-12:</b>	ANT-120-008 . . . . .	35
<b>Ilustración 3-1:</b>	Plano del laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas. . . . .	54
<b>Ilustración 3-2:</b>	Diagrama general de la red 5G SA . . . . .	56
<b>Ilustración 3-3:</b>	Comandos ogs tun. . . . .	57
<b>Ilustración 3-4:</b>	Comando para la instalación de las dependencias. . . . .	57
<b>Ilustración 3-5:</b>	Comando para clonar el núcleo. . . . .	58
<b>Ilustración 3-6:</b>	Comprobación de la instalación del núcleo. . . . .	58
<b>Ilustración 3-7:</b>	Archivos del núcleo. . . . .	58
<b>Ilustración 3-8:</b>	Configuración del archivo NRF. . . . .	59
<b>Ilustración 3-9:</b>	Configuración del archivo AMF. . . . .	60
<b>Ilustración3-10:</b>	Configuración del archivo UPF. . . . .	60
<b>Ilustración3-11:</b>	Inicialización del AMF . . . . .	62
<b>Ilustración3-12:</b>	Procesos del core. . . . .	62
<b>Ilustración3-13:</b>	Configuración del WebUI. . . . .	63
<b>Ilustración3-14:</b>	Interfaz WebUI. . . . .	63
<b>Ilustración3-15:</b>	Datos del usuario. . . . .	63
<b>Ilustración3-16:</b>	Dependencias de srsRAN Project. . . . .	64
<b>Ilustración3-17:</b>	Test de instalación srsRAN Project. . . . .	64
<b>Ilustración3-18:</b>	Configuración del gNB. . . . .	65

<b>Ilustración3-19:</b>	Activación de la red. . . . .	65
<b>Ilustración3-20:</b>	Equipos para la programación. . . . .	66
<b>Ilustración3-21:</b>	Modo shell. . . . .	66
<b>Ilustración3-22:</b>	Servicios desactivados. . . . .	66
<b>Ilustración3-23:</b>	Tarjerta programada correctamente. . . . .	67
<b>Ilustración3-24:</b>	UE reconociendo la tarjeta SIM. . . . .	68
<b>Ilustración3-25:</b>	Ajustes previos a la conexión del UE. . . . .	68
<b>Ilustración3-26:</b>	Configuración del APN del UE. . . . .	68
<b>Ilustración3-27:</b>	Conexión del UE a la red 5G. . . . .	69
<b>Ilustración3-28:</b>	Registro del UE en la red 5G. . . . .	69
<b>Ilustración 4-1:</b>	Configuración para la banda n28. . . . .	70
<b>Ilustración 4-2:</b>	Red operativa en la banda n28. . . . .	71
<b>Ilustración 4-3:</b>	Configuración para la banda n3 . . . . .	71
<b>Ilustración 4-4:</b>	Red operativa en la banda n3. . . . .	72
<b>Ilustración 4-5:</b>	Configuración para la banda n40. . . . .	72
<b>Ilustración 4-6:</b>	Red operativa en la banda n40. . . . .	73
<b>Ilustración 4-7:</b>	Configuración para la banda n78. . . . .	73
<b>Ilustración 4-8:</b>	Red operativa en la banda n78. . . . .	74
<b>Ilustración 4-9:</b>	Gráfica de valores RSRP en todas las frecuencias. . . . .	79
<b>Ilustración4-10:</b>	Gráfica de valores RSRQ en todas las frecuencias. . . . .	80
<b>Ilustración4-11:</b>	Gráfica de valores SNR en todas las frecuencias. . . . .	81
<b>Ilustración4-12:</b>	Gráfica de Velocidad de transmisión en todas las frecuencias. . . . .	84
<b>Ilustración4-13:</b>	Gráfica de Latencia en todas las frecuencias. . . . .	87
<b>Ilustración4-14:</b>	Gráfica de Velocidad de transmisión en todas las frecuencias. . . . .	89
<b>Ilustración 5-1:</b>	USRP B210 con antena ANT-120-008 . . . . .	
<b>Ilustración 5-2:</b>	Mediciones de cobertura cercanas . . . . .	
<b>Ilustración 5-3:</b>	Mediciones de cobertura intermedias . . . . .	
<b>Ilustración 5-4:</b>	Mediciones de cobertura lejanas . . . . .	
<b>Ilustración 5-5:</b>	Mediciones de velocidad. . . . .	
<b>Ilustración 5-6:</b>	Datos de cobertura en la aplicación . . . . .	
<b>Ilustración 5-7:</b>	Mediciones de latencia . . . . .	
<b>Ilustración 5-8:</b>	Datos de cobertura n78 . . . . .	
<b>Ilustración 5-9:</b>	Datos de cobertura n40 . . . . .	
<b>Ilustración5-10:</b>	Datos de cobertura n28 . . . . .	
<b>Ilustración5-11:</b>	Datos de cobertura n3 . . . . .	
<b>Ilustración5-12:</b>	Visualización de un video en Youtube con la red 5G . . . . .	

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación2-1:</b>	Ecuación de la subportadora . . . . .	9
<b>Ecuación2-2:</b>	Ecuación SS-RSRQ . . . . .	39
<b>Ecuación2-3:</b>	Ecuación CSI-RSRQ . . . . .	39

## ÍNDICE DE ANEXOS

**ANEXO A:** Red 5G SA

**ANEXO B:** Instalación del core Open5GS

**ANEXO C:** Instalación de srsRAN

**ANEXO D:** Programación de la tarjeta SIM

**ANEXO E:** Aplicaciones para las mediciones

## RESUMEN

La tecnología 5G ya es una realidad en algunos países del mundo. Sin embargo, es importante analizar sobre cómo lograron estos países su implementación, qué frecuencias utilizaron y qué procedimientos siguieron para evaluar la viabilidad de esta tecnología. Por tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar la tecnología 5G implementada con SDR en la banda FR1 para determinar sus prestaciones. Inicialmente se desarrolló un estudio del estado del arte para la comprensión del Standard así como la arquitectura 5G. También se realizó un estudio del despliegue de las redes 5G en Asia, Europa, América del Norte y Latinoamérica donde se identificaron 4 bandas de frecuencia que ya han sido probadas y están actualmente operativas en esos lugares, así como los parámetros de evaluación de calidad establecidos en la normativa vigente (IMT-2020). Posteriormente, se procedió a implementar una red 5G SA en un ambiente controlado de laboratorio. Mediante esta investigación, se evaluaron las frecuencias de 700 MHz (n28), 1800 MHz (n3), 2400 MHz (n40) y 3500 MHz (n78) en base a umbrales de cobertura (RSRP, RSRQ y SNR), velocidad de transmisión y latencia, parámetros fundamentales para determinar la calidad y disponibilidad de la red. Se concluye que las frecuencias más bajas, como la de 700 MHz, ofrecen una cobertura mucho mejor, aunque a costa de una velocidad de transmisión más lenta y mayor latencia. A medida que aumenta la frecuencia, la cobertura disminuye, pero se observa un aumento significativo en la velocidad de transmisión y una reducción en la latencia. La frecuencia de 3500 MHz se destaca como la más equilibrada y óptima para la implementación a gran escala.

**Palabras Clave:** <FIFTH GENERATION (5G)>, <NEW RADIO (NR)>, <STAND ALONE (SA)>, <FREQUENCY RANGE 1 (FR1)>, <NEXT GENERATION NODE B (GNB)>, <REFERENCE SIGNAL RECEIVED POWER (RSRP)>, <REFERENCE SIGNAL RECEIVED QUALITY (RSRQ)>.



03-04-2024

0364-DBRA-UPT-2024

## SUMMARY

The 5G technology is already a reality in some countries worldwide. However, it is fundamental to analyze how these countries achieved its implementation, which frequencies they used, and what procedures they followed to assess the viability of this technology. Therefore, the research objective is to evaluate the 5G technology implemented with SDR in the FR1 band to determine its performance. A comprehensive review was conducted to understand the Standard and the 5G architecture. A study of the deployment of 5G networks in Asia, Europe, North America, and Latin America was also conducted, where four frequency bands that have already been tested and are currently operational in those locations were identified, as well as the quality evaluation parameters established in current regulations (IMT-2020). Subsequently, a 5G SA network was implemented in a controlled laboratory environment. Through this research, frequencies of 700 MHz (n28), 1800 MHz (n3), 2400 MHz (n40), and 3500 MHz (n78) were evaluated based on coverage thresholds (RSRP, RSRQ, and SNR), transmission speed, and latency, fundamental parameters for determining network quality and availability. It is concluded that lower frequencies, such as 700 MHz, offer much better coverage, albeit at the cost of slower transmission speed and higher latency. As the frequency increases, coverage decreases, but there is a significant increase in transmission speed and a reduction in latency. The 3500 MHz frequency is the most balanced and optimal for large-scale implementation.

**KEY WORDS:** <FIFTH GENERATION (5G)>, <NEW RADIO (NR)>, <STAND ALONE (SA)>, <FRECUENCY RANGE 1 (FR1)>, <NEXT GENERATION NODE B (GNB)>, <REFERENCE SIGNAL RECEIVED POWER (RSRP)>, <REFERENCE SIGNAL RECEIVED QUALITY (RSRQ)>.



Lic. Maritza Larrea Mg.

0603370784

## INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, las comunicaciones a distancia han aportado grandes avances a la humanidad, por ejemplo, Claude Chappe, sacerdote e ingeniero francés, inventó un sistema de telégrafo óptico en 1792 (ABRIL et al., 2019) el Italiano Marconi, en el año 1894, efectuó la transmisión de señales inalámbricas a través de una distancia de 2 millas (*Sistemas de Telecomunicación*, 2018) y el teléfono de Graham Bell en 1876 son solo algunos de tantos logros que surgieron por la necesidad de comunicarse.

Actualmente, existen varias formas de comunicación a distancia, en las que se distinguen dos grandes grupos: alámbricas (fibra óptica) e inalámbricas (conexiones Wi-Fi, comunicaciones satelitales o redes celulares). Martin Cooper considerado “el padre de la telefonía celular” introdujo el primer radioteléfono en 1973, así también, la primera red comercial automática fue NTT de Japón en 1974, seguido por NMT, que funcionaba simultáneamente en países nórdicos como Suecia o Finlandia en 1981 con teléfonos Ericsson y Mobira antecesor de Nokia (CIRO et al., 2013).

La telefonía móvil deriva dos tipos de red, analógica (TMA), cuya primera versión funcionó en la banda radioeléctrica de 450 MHz y digital cuya calidad de transmisión de señales tiene una mejora notable gracias a GSM considerada como la segunda generación operando en las bandas de 850/900 MHz (CIRO et al., 2013).

La telefonía móvil deriva dos tipos de red, analógica (TMA), cuya primera versión funcionó en la banda radioeléctrica de 450 MHz y digital cuya calidad de transmisión de señales tiene una mejora notable gracias a GSM considerada como la segunda generación operando en las bandas de 850/900 MHz (CIRO et al., 2013).

La evolución de las comunicaciones ha desarrollado tecnologías GPRS y EDGE (red 2.5G), posteriormente UMTS (3G) y LTE (4G) (HUERTAS, 2019, pág. 42) Recientemente, en el 2019, se estandarizó el 5G-NR para mejorar parámetros de tecnologías anteriores, como rangos de cobertura, velocidad de transmisión, menor latencia, inclusión de diversos servicios, entre otros.

Un limitante para implementar la tecnología 5G-NR son las frecuencias de uso, las cuales operan en rangos: <1 GHz, [1-6] GHz y >6GHz (GSMA, 2019, pág. 2), que tienden a atenuarse con mayor facilidad. Un problema mayor incide en la ocupación de canales del espectro móvil, como consecuencia, los entes reguladores deben garantizar correctamente la asignación de espectro y otorgamiento de licencias en base a los concursos desarrollados en cada país, tomando en consideración planes técnicos y comerciales de despliegue por parte de los operadores.

# CAPÍTULO I

## 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema

¿Es posible realizar la evaluación de la tecnología 5G implementada con SDR en la banda FR1 para determinar sus prestaciones?

### 1.2 Objetivos

#### 1.2.1 *Objetivo General*

Evaluar la tecnología 5G implementado con SDR en la banda FR1 para determinar sus prestaciones.

#### 1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Realizar un estudio del estado del arte de la tecnología 5G NR en la banda FR1 en otros países.
- Determinar al menos 3 bandas de operación de 5G FR1 y los parámetros de evaluación de calidad y disponibilidad de radiofrecuencia según las normas IMT-2020 basado en antecedentes de otros países.
- Implementar el setup de laboratorio con SDR para la evaluación del sistema 5G en las bandas seleccionadas.
- Evaluar los parámetros radioeléctricos para determinar el rendimiento de la tecnología 5G en las bandas seleccionadas.

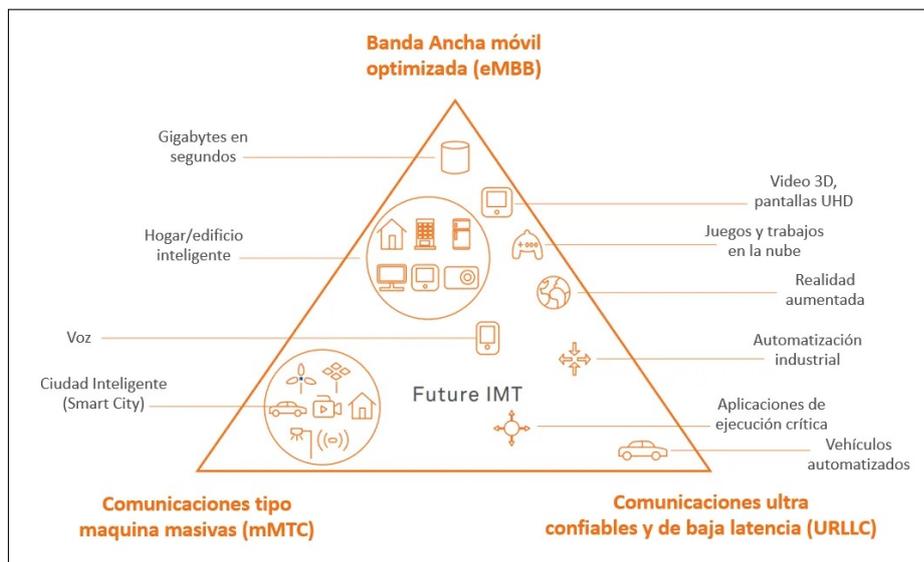
### 1.3 Justificación

#### 1.3.1 *Justificación Teórica*

El conjunto de categorías de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) menciona tres categorías principales del uso de 5G: eMBB, mMTC y uRLL que se presenta como una herramienta valiosa para delinear la progresión de la tecnología móvil requerida en cada país (VERGARA BARRIOS, 2020, pág. 10).

- Banda ancha móvil mejorada (eMBB): ampliación de la capacidad LTE (4G), proporciona un rendimiento superior para aplicaciones de transmisión de streaming, acceso a la web, videoconferencias y realidad aumentada. La velocidad de transmisión mejorada se consigue en células pequeñas con movimiento limitado de usuarios finales, basado en la primera fase 5G y especificada en la Release 15 de las especificaciones del 3GPP.
- Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC): aumenta la capacidad IoT (Internet de las cosas) de LTE (4G), puede soportar un mayor número de dispositivos con menor costo, mayor cobertura y duración de la batería. Según las especificaciones de la UIT, 5G admite diez veces más dispositivos en una misma zona que LTE.
- Comunicaciones ultra fiables y de baja latencia (uRLLC): permite nuevas aplicaciones para comunicaciones inalámbricas que requieren un nivel muy bajo de latencia. El impulso llevado a cabo por la alta fiabilidad y una latencia de recorrido de la red extremadamente baja permite a las uRLLC la automatización industrial, control de drones, vehículos autónomos y nuevas aplicaciones en el ámbito médico (telecirugía). Esta categoría también se conoce como Comunicaciones críticas de tipo máquina (cMTC).

Algunas aplicaciones 5G en la sociedad se pueden evidenciar en ciudades, casas y edificios inteligentes; vehículos autónomos, industrias automatizadas, realidad aumentada, pantallas UHD (videos 3D), entre otros, como se puede apreciar en la Ilustración 1-1.



**Ilustración 1-1:** Aplicaciones de la Tecnología 5G

Fuente: (HUAWEI, 2021)

En este sentido, 5G se encuentra desplegada en más de 90 países y el resto del mundo aún en desarrollo, lógicamente los países desarrollados cuentan con una red comercial desplegada y funcional.

El Plan Nacional 5G de España (2018-2020), cuya hoja de ruta indica acciones clave para el despliegue 5G y el tiempo de ejecución, tiene como objetivo situar al país en la nueva era del desarrollo tecnológico a través del despliegue 5G. Según el Ministerio de Energía Turismo y Agenda Digital, el plan se convirtió en una palanca para impulsar la experimentación temprana sobre redes 5G y contribuir al desarrollo I+D+i. y de la transformación digital que 5G tendría en los diferentes ámbitos (Plan Nacional 5G 2018-2020, 2018, pág. 6).

Del mismo modo se presentó la hoja de ruta Estonia 2019, su objetivo es lograr la conectividad 5G en las principales ciudades y periferias para 2023 y en corredores de transporte para 2025. Esta hoja de ruta contribuyó con la presentación sintetizada de las estrategias que Estonia empleará para la evolución 5G (United States–Estonia Joint Declaration on 5G Security, 2019).

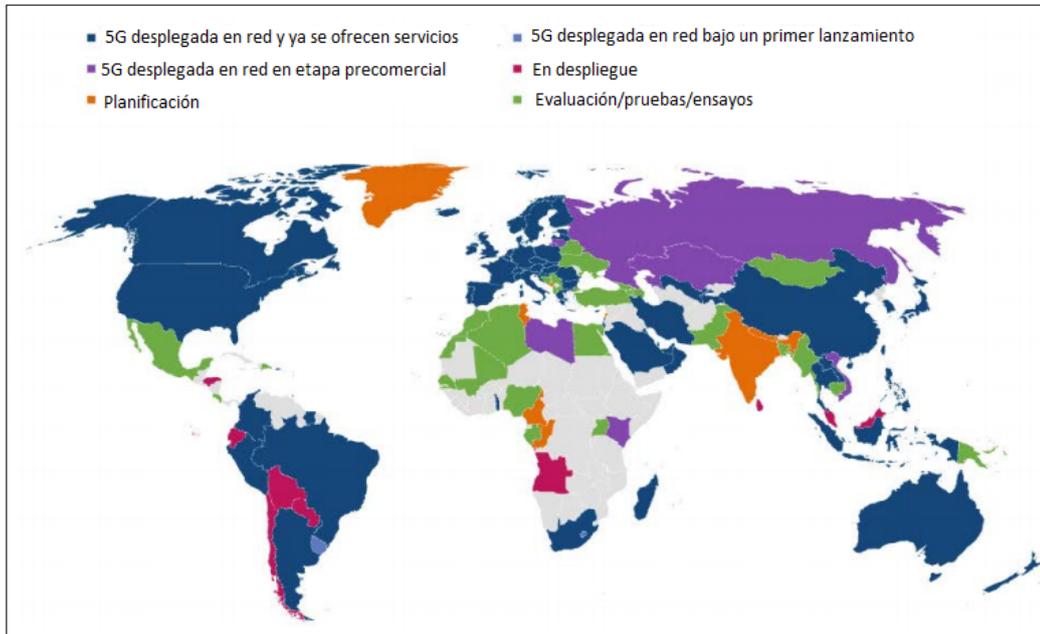
A diferencia de otras planificaciones es evidente que este país posee el 96 % de despliegue en telefonía móvil 4G LTE, en consecuencia, tiene una ventaja en relación con los países anteriores ya que una de las condiciones para ampliar la implementación 5G es el despliegue de la tecnología 4G LTE.

Asia también presentó el plan de aplicación nacional 5G en 2019 concretamente en Malasia a la Comisión de Comunicaciones y Multimedia de Malasia (MCMC). Este plan tiene como alcance definir los aspectos técnicos para el despliegue 5G según los estándares específicos de esta tecnología. Mediante esta planificación se corroboró la posibilidad del trabajo colaborativo entre sector privado y gobierno debido a que el documento analizado fue elaborado por un grupo de trabajo integrado por miembros del sector privado, ministerios y organismos que representan el lado de la demanda y la oferta del ecosistema 5G (THESTAR, 2023).

Siguiendo la misma línea se presentó el plan 5G Colombia 2019, elaborado por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC). Su misión es establecer lineamientos de política pública y estrategias para el despliegue 5G en el país. Este trabajo aportó una visión holística de la realidad tecnológica de Colombia y en él se presentó un análisis situacional y contextual de ese país (CONSTAIN, 2019, pág. 69).

En Ecuador, la tecnología 5G aún está en fase de pruebas mientras se esperan cambios en la normativa, según las investigaciones realizadas por propias empresas ecuatorianas el 2021 fue el año de la expansión vertiginosa de la tecnología 5G en todo el mundo (PULPO, 2022). Como se

aprecia en la Ilustración 1-2 , las redes alcanzaron 521 millones de conexiones en diciembre de ese año, en el 2020 la cifra fue de apenas 218 millones. Un crecimiento exponencial que se mantiene hoy en día y hace prever más de 4.800 millones de conexiones para el 2026.



**Ilustración 1-2:** Despliegue de la red 5G en el mundo

Fuente: (BNAMÉRICAS, 2021)

### ***1.3.2 Justificación Aplicativa***

La tecnología 5G se ha implementado de manera comercial en varios países debido a las prestaciones que oferta, como se sabe en el país actualmente se encuentra en fase de pruebas, por tanto, es necesario realizar un estudio detallado de parámetros y valores de calidad que contribuya a su implementación.

Como primer paso se debe realizar un estudio del estado del arte de la tecnología 5G y la banda FR1, resumido en tres partes: contextualización, clasificación y categorización. Adicionalmente una fase de análisis con el fin de obtener el flujo de información sobre el tema a tratar, generar una demanda de conocimiento y establecer comparaciones con otras ideas brindando diferentes posibilidades de comprensión.

Contextualización: Parte desde el planteamiento del problema que formula la evaluación de la tecnología 5G en las bandas correspondientes para su posterior medición y evaluación de parámetros de calidad. Para ello se hará uso de tesis y artículos científicos publicados recientemente que traten una problemática parecida, como la abordaron y posibles soluciones planteadas.

Clasificación: Esta fase ordena la información en función de las características de datos y utilidad según los documentos propuestos, establece aspectos cronológicos, objetivos de estudios, métodos de trabajos, líneas de investigación y alcance que ha tenido para llegar a conclusiones concretas y coherentes que los autores han utilizado para tomar decisiones y establecer factores importantes a considerar.

Categorización: Esta última etapa tiene en cuenta la jerarquización para el tratamiento de la información, lo que implica una retroalimentación importante que facilita el estudio de las líneas de investigación. El análisis es interno por lo que se deriva directamente del estudio de la documentación bajo el enfoque de temáticas, metodologías, hallazgos, teorías y estudios prospectivos o retrospectivos.

En la Ilustración 1-3 se puede apreciar el esquema que se va a desarrollar durante el presente trabajo, y gracias a este estudio se sabrá con certeza el proceso llevado a cabo en otros lugares para la designación de bandas de frecuencia y en base a esto se han ido estableciendo parámetros relevantes con el afán de lograr una referencia y realizar un estudio apropiado acerca del rendimiento de la banda FR1.



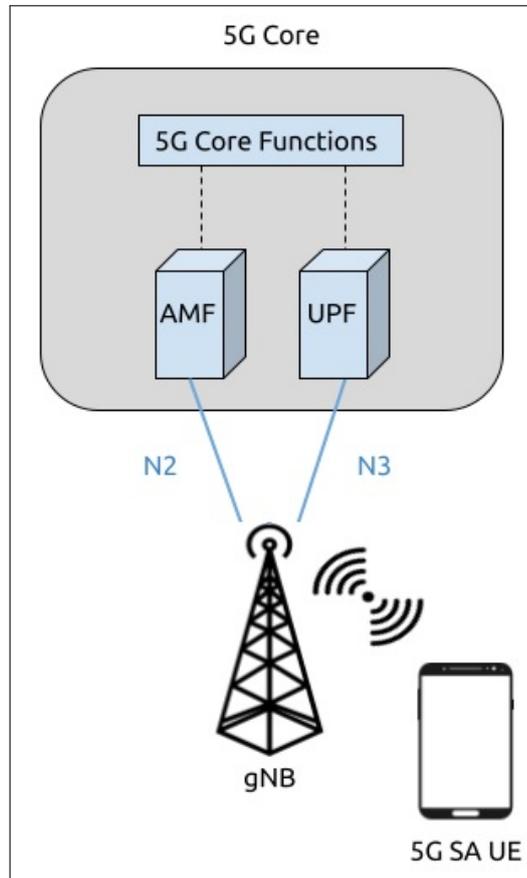
**Ilustración 1-3:** Esquema del estado del arte

Fuente: (Propia)

El estudio no parte desde cero, surge de una línea de investigación que empezó con la implementación de un sistema transmisor de una red 5G NSA, haciendo uso del software de código abierto propuesto por OAI en sus versiones más recientes, desarrollado en el sistema operativo Ubuntu, que brinda los elementos necesarios de RAN y Core para garantizar la funcionalidad de la red, también se utilizó equipos USRP B120, una antena logarítmica y materiales complementarios. La investigación se inicia a partir del estudio del estado del arte mencionado anteriormente hasta seleccionar las frecuencias adecuadas para implementar la red 5G SA y evaluar el rendimiento de los parámetros radio.

Para implementar la red, se utilizará nuevamente un software de código abierto obtenido de la página srsRAN, donde existen varios manuales para realizar diversos tipos de trabajos

relacionados con las redes celulares. En este caso se va a configurar y conectar un User Equipment (UE) con capacidad 5G a una red 5G SA utilizando srsRAN Project para el gNB y un núcleo externo Open5GS que brinda soporte 5G SA tanto a srsUE como al gNB, tal como se muestra en la Ilustración 1-4.



**Ilustración 1-4:** Esquema general de la red 5G SA

Fuente: (SRSRAN, 2019)

Se debe considerar parámetros como el ancho de banda, latencia, calidad de servicio, velocidad de transmisión, entre otros. También existen estudios de planificación de recursos que se ha implementado con diversos algoritmos facilitando la asignación de frecuencias y desempeño de una red 5G, que se deben analizar previamente para conocer su modo de operación y establecer de manera correcta la designación de parámetros de rendimiento.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Estado del arte red móvil 5G

La tecnología inalámbrica de quinta generación (5G) es la última actualización de la gran cantidad de estándares internacionales que dictan cómo deberían funcionar los teléfonos celulares (FIGUEROA, 2022, pág. 42). Se encuentra en constante evolución, debido a que continúa expandiéndose y mejorando para satisfacer la demanda de conectividad del mundo moderno. Está diseñada para ofrecer velocidades de datos más rápidas, menor latencia y mayor capacidad para conectar un gran número de dispositivos de forma simultánea. Con el despliegue de redes 5G, se espera una revolución en sectores como industria, salud, transporte y ciudades inteligentes. Además, se están desarrollando constantemente nuevas tecnologías y estándares para optimizar y aprovechar al máximo el potencial de la red 5G.

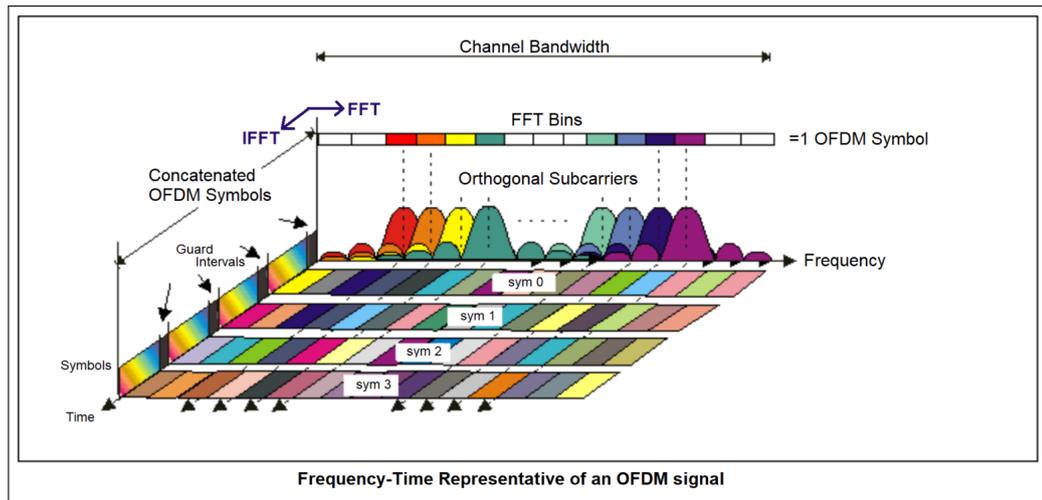
##### 2.1.1 Descripción de la tecnología

La principal diferencia entre LTE y 5G NR radica en la adaptabilidad de los parámetros de la forma de onda que utiliza NR para respaldar la amplia gama de servicios que ofrece. Aunque se mantiene la estructura de la trama LTE con una duración de 10 ms dividida en 10 subtramas de 1 ms, otros parámetros como el ancho de banda que ocupa una subportadora, la SCS (Subcarrier Spacing  $\Delta f$ ) y el número de slots en cada subtrama variarán según la numerología  $\mu$ , la cual se explicará a continuación:

###### 2.1.1.1 Capa física

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con prefijo cíclico (CP) es el esquema de acceso múltiple utilizado en la capa física de NR (New Radio) para transmisiones Uplink y Downlink mostrado en la Ilustración 2-1. Para Uplink, también se utiliza SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) con CP. Aunque el funcionamiento es similar al OFDM utilizado en LTE, CP-OFDM en NR presenta un espaciado de subportadoras variable denominado numerología ( $\mu$ ), que puede ser de 15kHz, 30kHz, 60kHz, 120kHz y 240 KHz (Modulación y multiacceso 5G NR: Visión actual el estándar de capa física, 2020).

Los símbolos OFDM en cada subtrama se agrupan en slots y dependiendo del tipo de CP (normal o extendido), cada slot tiene 12 o 14 símbolos OFDM. El número de slots por cada subtrama varía y es proporcional al valor de  $\mu$ , que es un entero positivo que puede variar de 0 a 4.



**Ilustración 2-1:** Señal OFDM en el dominio del tiempo y la frecuencia.

Fuente: (WITTE, 2020)

Cada símbolo OFDM puede asignarse a transmisiones Uplink o Downlink según el Slot Format Indicator (SFI), un parámetro que indica al Usuario Equipo (UE) el tipo de transmisión y permite asignaciones flexibles para modos de funcionamiento TDD o FDD (Time Division Duplex o Frequency Division Duplex) (VERGARA BARRIOS, 2020, pág. 13). El ancho de banda que ocupa una subportadora SCS en el dominio de la frecuencia, toma valores de acuerdo con la Ecuación 2-1.

$$SCS = 2^{\mu} * 15[KHz]$$

**Ecuación 2-1:** Ecuación de la subportadora

A medida que el Subcarrier Spacing (SCS) aumenta, también se incrementa el número de símbolos que puede alojar cada trama. Esto se debe a que cada subtrama contendrá más slots, y para lograr esto, la duración de cada símbolo debe disminuir. Para compensar esta reducción en la duración del símbolo, el tiempo de escucha del Cyclic Prefix (CP) varía, disminuyendo cuando el SCS aumenta y aumentando cuando el SCS disminuye.

La Tabla 2-1 muestra la variación del número de símbolos según la numerología y el CP. Este ajuste representa un equilibrio entre el SCS y la duración del símbolo. La elección adecuada dependerá del servicio que se desea proporcionar.

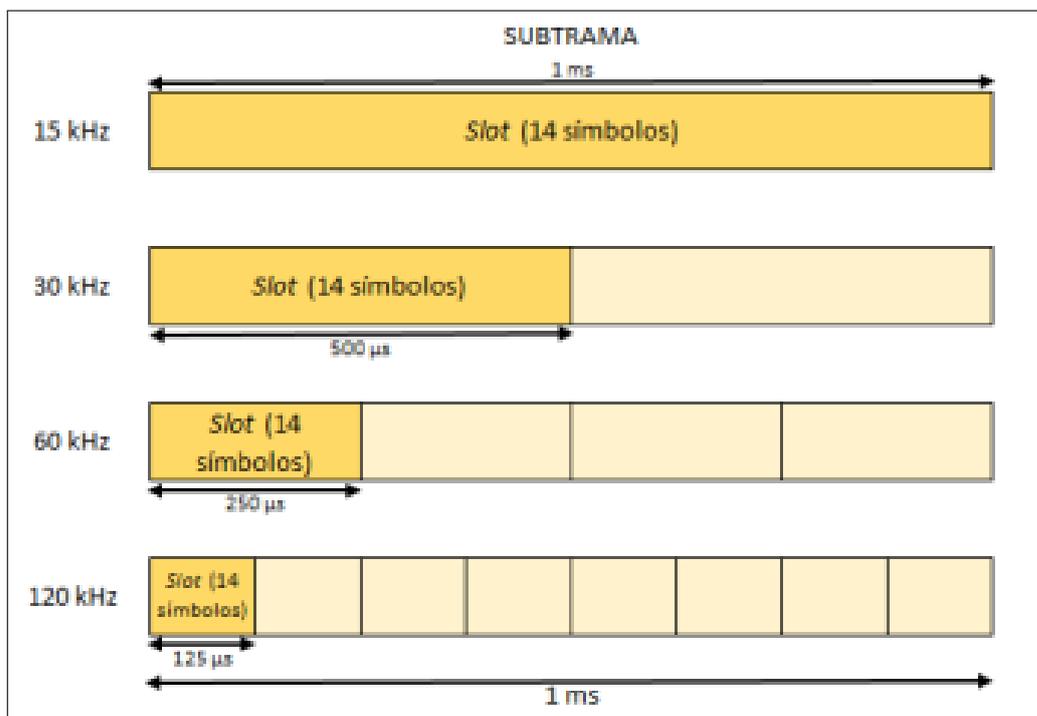
Si bien se indicó que los tiempos de trama y subtrama no dependen del SCS, en realidad, sí existe una dependencia indirecta, debido al número de slots, por ende, el intervalo de tiempo de duración varía de acuerdo con el espaciamiento en función de doblar el número de slots para cada aumento en la numerología y reducir a la mitad la duración de tiempo con respecto a la anterior.

**Tabla 2-1:** Canales físicos de control

$\mu$	SCS	Símbolos/slot	Slots/subframe	Slots/frame	Símbolos/frame	CP
0	15	14	1	10	14	Normal
1	30	14	2	20	28	Normal
2	60	14	4	40	56	Normal
2	60	12	4	40	48	Extendido
3	120	14	8	80	112	Normal
4	240	14	16	160	224	Normal

Fuente: (VERGARA BARRIOS, 2020)

Por tanto, aunque los tiempos de trama y subtrama no cambian directamente con el SCS, en la Ilustración 2-2 se observa que la variación en el número de slots y la duración del tiempo en función de la numerología afectará indirectamente la configuración temporal total.



**Ilustración 2-2:** Variación de tiempo de símbolo respecto al SCS.

Fuente: (VERGARA BARRIOS, 2020)

### 2.1.1.2 Modulación

NR (5G New Radio) permite la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK), Modulación de Amplitud en Cuadratura 16 (QAM), así como los formatos de modulación 64QAM y 256QAM tanto para el enlace ascendente como descendente (GUERREO PINEDA et al., 2022, pág. 13),

similar a LTE. Además, admite Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK) en el enlace ascendente para permitir una relación de potencia pico a promedio más reducida y una eficiencia mejorada en el aumento de potencia a velocidades de datos más bajas, lo cual es crucial para servicios de comunicación masiva tipo máquina. Se espera que en un futuro NR amplíe su conjunto de esquemas de modulación.

### ***2.1.2 Visión general de la red 5G***

Se había previsto que para 2020 las redes móviles 5G producirían un extenso lanzamiento comercial con el objetivo de asegurar la continuidad de los servicios, confiabilidad elevada y latencia reducida y elementos fundamentales para la incorporación de nuevas tecnologías de información y comunicación. No obstante, esta proyección se vio postergada debido a la emergencia sanitaria global provocada por el COVID-19, lo que retardó la implementación de esta tecnología en el mundo (BARRAGÁN, 2021).

5G no solo se enfoca en el desarrollo de redes de acceso móvil y el futuro de Internet, sino también, representa la sucesión de la tecnología LTE Advanced, la cual actualmente brinda altas velocidades y mayor capacidad de transmisión de datos. El propósito de 5G es lograr un entorno completamente inalámbrico que reduzca la falta de cobertura, mejore el rendimiento y evite interrupciones en las llamadas. Pero todas estas metas conllevan desafíos técnicos significativos destinados a satisfacer la creciente demanda de datos generada por el alto grado de conectividad en la sociedad actual (GARCÍA, 2019, pág. 13).

La versión actual que describe las especificaciones IMT-2020 revela tres tecnologías de interfaz radioeléctrica: “3GPP 5G-SRIT”, “3GPP 5G-RIT”, y “5Gi” (M.2150-1, 2020, pág. 7). Estas tecnologías sirven como base de implementación de redes 5G a nivel mundial y constituyen el medio introductorio de nuevas tendencias, aplicaciones y servicios, 5G está abriendo brechas hacia una nueva era en el uso de tecnologías abiertas en el ámbito de las telecomunicaciones.

### ***2.1.3 Características de la red 5G***

Los teléfonos inteligentes 5G desempeñan un papel fundamental en las comunicaciones móviles, aunque no son el único enfoque, ya que también pueden involucrarse dispositivos con limitaciones de recursos en la red. Uno de los aspectos fundamentales son las conexiones de alta velocidad con un mínimo retardo en la comunicación. Esto implica la transferencia de datos, videos, realidad aumentada y juegos en línea entre dispositivos móviles, garantizando un flujo de datos continuo hacia los usuarios finales. Al igual que otros métodos de comunicación inalámbrica, la tecnología 5G transmite y recibe datos en un espectro de frecuencias de radio más amplio, incluso utilizando

ondas milimétricas, lo que permite alcanzar velocidades extremadamente altas. Sin embargo, como se menciona en (GONZALEZ, 2019, págs. 38-39), la red 5G no solo se destaca por su velocidad, sino que también se caracteriza por ocho aspectos fundamentales a considerar:

- Data rate de hasta 10Gbps, 10 a 100 veces mejor que las redes 4G y 4.5G
- Latencia de 1 milisegundo
- Banda ancha 1000 veces más rápida por unidad de área
- Conecta hasta 100 dispositivos más, por unidad de área (en comparación con LTE)
- Disponibilidad del 99.999 %
- Cobertura del 100 %
- Reducción del 90 % en el consumo de energía de red
- Duración de hasta 10 diez años de batería en dispositivos

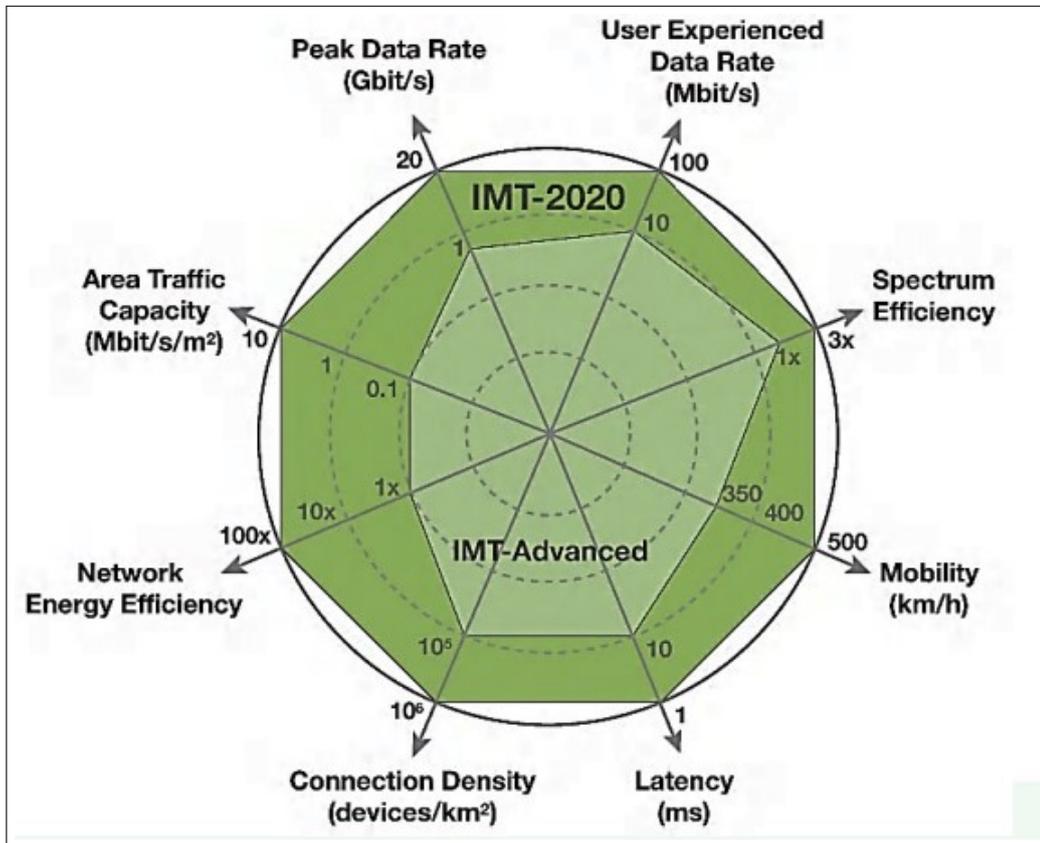
La tecnología 5G representa un avance exponencial con respecto a su predecesora, LTE, no solo en términos de conectividad, sino también en su ambición por superar barreras sociales que limitan el acceso a aquellos que aún no están conectados a la red. Además, destaca por su aplicabilidad y resultados obtenidos, demostrando una eficiencia notable en el uso de recursos energéticos e implementación sencilla (GUEVARA, 2018, págs. 61-62).

#### ***2.1.4 Aspectos que considerar de la UIT sobre 5G***

La UIT ha desempeñado un papel activo en las discusiones y regulaciones relacionadas con la tecnología 5G. Algunas de las consideraciones fundamentales de la UIT incluyen la necesidad de coordinar globalmente el espectro de frecuencias para 5G, evitando así conflictos y obstáculos entre países. También se destaca la promoción de interoperabilidad y compatibilidad entre sistemas 5G de distintos fabricantes, así como la importancia de garantizar la seguridad y protección del consumidor. Estos esfuerzos buscan asegurar una implementación exitosa y beneficiosa para todos los usuarios.(UIT, 2018).

La IMT-2020 (International Mobile Telecommunications-2020) establece especificaciones para redes de comunicaciones móviles de quinta generación (5G), definidas por la UIT. Estas normativas delimitan requisitos técnicos y de rendimiento, permitiendo a los proveedores de servicios implementar tecnologías que cumplan con estas especificaciones. En la Ilustración 2-4 se aprecia el sistema 5G, diseñado según la especificación M.2083 de la ITU-R, esta supera a la

tecnología 4G-LTE (IMT-Advanced) al ofrecer capacidades mejoradas, como tasas de datos 20 veces superiores, latencia 10 veces menor y eficiencia espectral 3 veces mayor. El objetivo principal de 5G es proporcionar avances significativos en velocidad, tiempo de respuesta y eficiencia en comparación con su predecesor (SAN MARTIN, 2020, pág. 55).



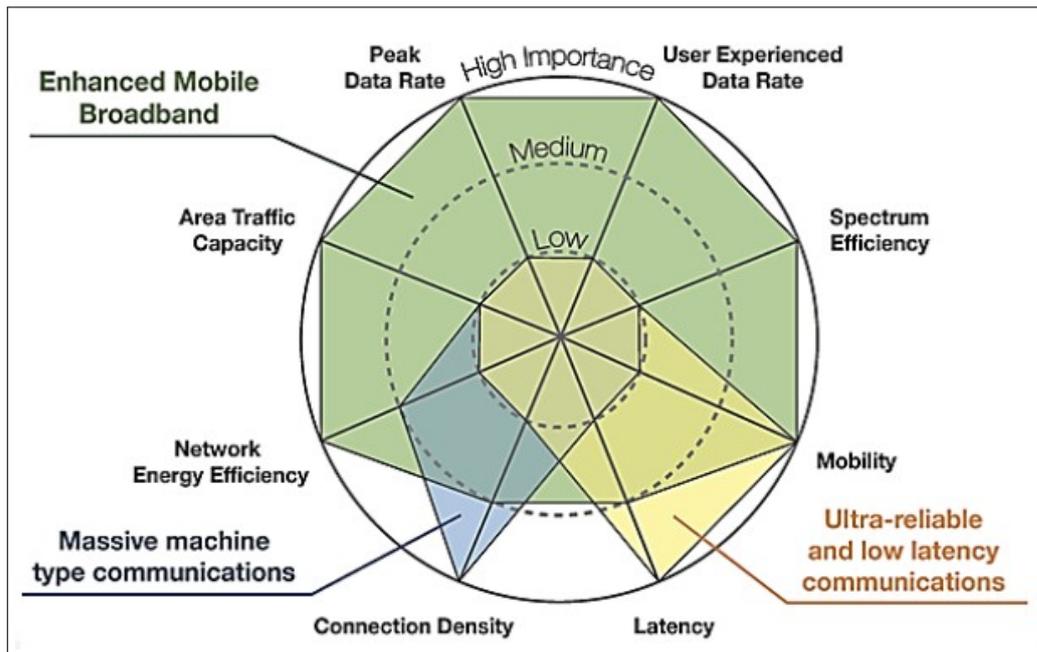
**Ilustración 2-3:** Evolución del IMT-2020 e IMT-Avanzada.

Fuente: (RESTREPO, 2019)

En la Ilustración 2-3 se puede observar parámetros clave proporcionados por la IMT-2020:

- Velocidad de Datos Máxima: 10 Gbit/s para la banda ancha móvil mejorada (eMBB). Bajo ciertas condiciones y escenarios, las IMT-2020 pueden soportar hasta 20 Gbit/s.
- Tasa de Datos Experimentada por un usuario: Se esperan 100 Mbit/s para casos de cobertura de área amplia, como en zonas urbanas y suburbanas.
- Eficiencia Espectral: 30 bits/s/Hz para un enlace descendente, tres veces mayor comparada con LTE.
- Movilidad: Velocidad máxima de hasta 500 km/h para dispositivos que mantienen una calidad aceptable de servicio, sin pérdida de paquetes y conexión estable, especialmente en escenarios como trenes de alta velocidad.

- Latencia: Hasta 1 ms.
- Densidad de Conexión: Hasta 106 dispositivos/km<sup>2</sup>, especialmente en escenarios como mMTC (comunicación de tipo máquina a máquina), donde una o más entidades no necesitan la interacción humana.
- Eficiencia Energética: Hasta 100 veces mayor eficiencia energética que IMT-Advance.
- Capacidad de Tráfico en la Zona 2: 10 Mbit/s/m<sup>2</sup>.



**Ilustración 2-4:** IMT-2020 parámetros de la especificación M.2083 de la ITU-R.

Fuente: (RESTREPO, 2019)

Hasta el año 2025, como se menciona en (SAN MARTIN, 2020, pág. 51), se proyecta conexiones 5G que alcancen los 1.1 billones, lo que constituirá aproximadamente el 12 % del total de conexiones móviles en todo el mundo. La baja latencia esperada de la tecnología 5G potenciará especialmente los negocios de misión crítica, sectores altamente sensibles al factor tiempo.

### 2.1.5 Estandarización de redes 5G

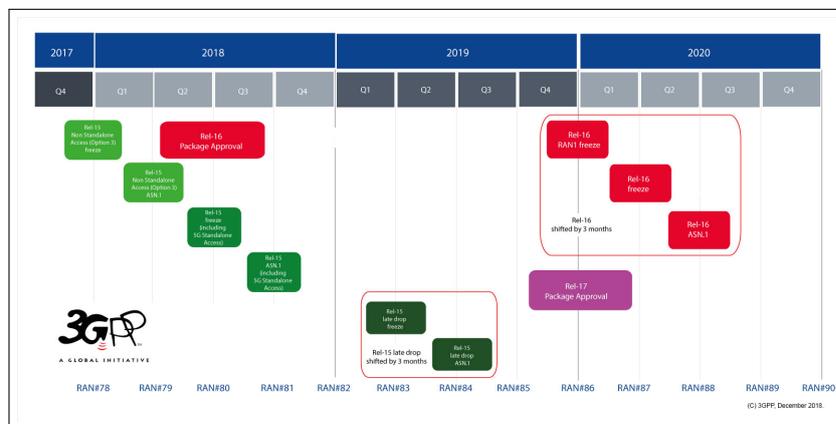
La estandarización de 5G se inició en marzo de 2017 con la publicación de la Release 15 de 3GPP. La primera etapa tuvo lugar en diciembre de 2017, definiendo el sistema Non Stand Alone (NSA), mientras que la segunda etapa se desarrolló en junio de 2018, presentando la arquitectura Stand Alone (SA) (GÓMEZ, 2021, pág. 24).

### 2.1.5.1 Release 16

Con la versión 16 se concluyó la presentación a las IMT-2020 para un sistema 3GPP 5G inicial completo. Se han realizado alrededor de 25 estudios sobre diversos temas, como servicios multimedia prioritarios, aplicaciones V2X, acceso por satélite 5G y convergencia inalámbrica y alámbrica para 5G. Otros temas incluyen seguridad, códecs, servicios de streaming, interfuncionamiento de redes de área local y fragmentación de redes. Se han elaborado informes técnicos sobre la ampliación de la tecnología 3GPP al acceso radioeléctrico no terrestre y aspectos marítimos. Además, se amplían servicios de comunicación crítica para abarcar un sector empresarial más amplio, brindando mayor fiabilidad y reduciendo costos mediante economías de escala (3GPP, 2020).

### 2.1.5.2 Release 17

El lanzamiento de Release 17 de 3GPP se centra en el desarrollo de estándares para 5G y más allá, con un enfoque en la mejora de la eficiencia espectral, capacidad de conexión de dispositivos masivos, baja latencia y sostenibilidad (3GPP, 2020). Algunos temas clave incluyen la expansión de capacidades 5G, el soporte mejorado para aplicaciones de misión crítica, evolución de la arquitectura de red e impulso hacia la conectividad global. En la Ilustración 2-5 se observa la cronología de estos lanzamientos.



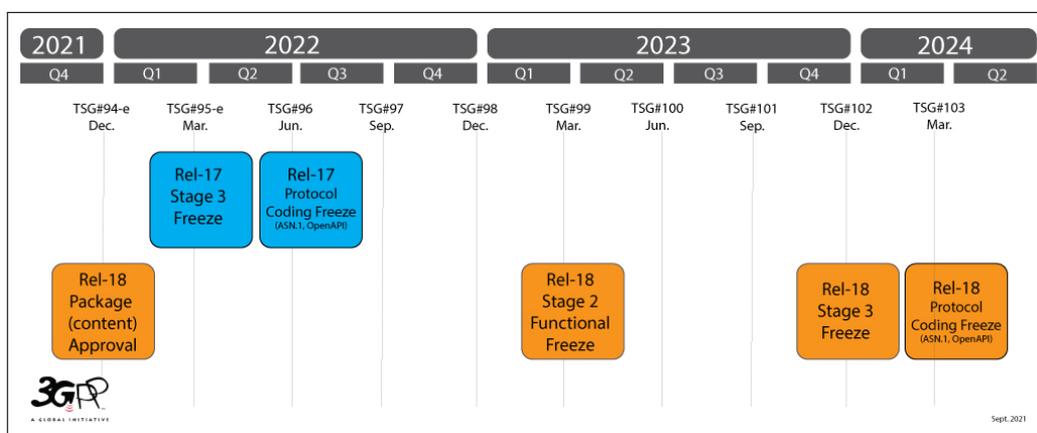
**Ilustración 2-5:** Release 16 y 17.

Fuente: (3GPP, 2020)

También se enfoca en seguridad cibernética y protección de datos de los usuarios, con implementación de medidas avanzadas para garantizar la integridad de la red y la confidencialidad de la información. Asimismo, se están desarrollando estándares para interoperabilidad de redes heterogéneas, lo que permitirá una mayor flexibilidad y eficiencia en la implementación de infraestructuras de comunicaciones (3GPP, 2022).

### 2.1.5.3 Release 18 y 19

El lanzamiento 18 de 3GPP marca un hito en las comunicaciones móviles con mejoras significativas en 5G, incluyendo eficiencia espectral mejorada y mayor integración con tecnologías existentes. En la Ilustración 2-6 se indica el año de este lanzamiento que cuenta con desafíos emergentes como sostenibilidad, seguridad y resiliencia de red. Por otro lado, el Release 19 se enfoca en la evolución de las redes 5G, destacando una eficiencia espectral mejorada, capacidad de red, latencia y confiabilidad, realidad aumentada/virtual, automatización industrial y conectividad vehicular. En conjunto, estos lanzamientos prometen impulsar aún más la evolución de las tecnologías de comunicación móvil (3GPP, 2023).



**Ilustración 2-6:** Release 18 y 19.

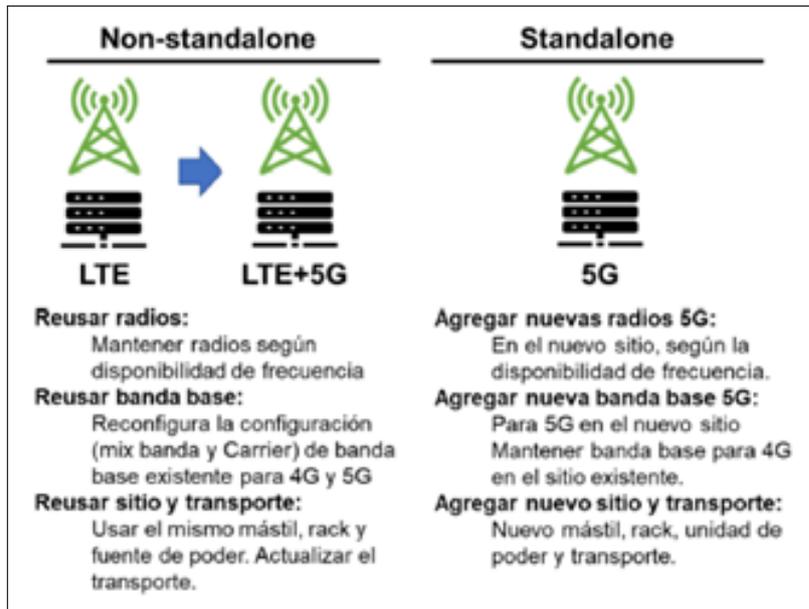
Fuente: (3GPP, 2023)

## 2.2 Opciones de implementación

### 2.2.1 Non-standalone vs Standalone

La primera implementación móvil 5G fue diseñada inicialmente para operar en modo No Autónomo (NSA), que combina celdas de radio NR y de radio LTE mediante conectividad dual para proporcionar acceso de radio. La red central puede ser EPC (Evolved Packet Core) o 5GC (5G Core). En este modo, la conexión está anclada a LTE, mientras que las portadoras 5G NR se utilizan para mejorar la velocidad de datos y reducir la latencia.

En contraste, el modo Autónomo (SA) implica redes independientes que utilizan una tecnología de acceso de radio (5G NR o evolved LTE). Las redes de core funcionan de manera autónoma y están especialmente orientadas a industrias inteligentes tal como se menciona en (DELGADO, 2020, pág. 16). La Ilustración 2-7 muestra las diferentes arquitecturas y sus características principales para cada modo de operación de redes móviles 5G.

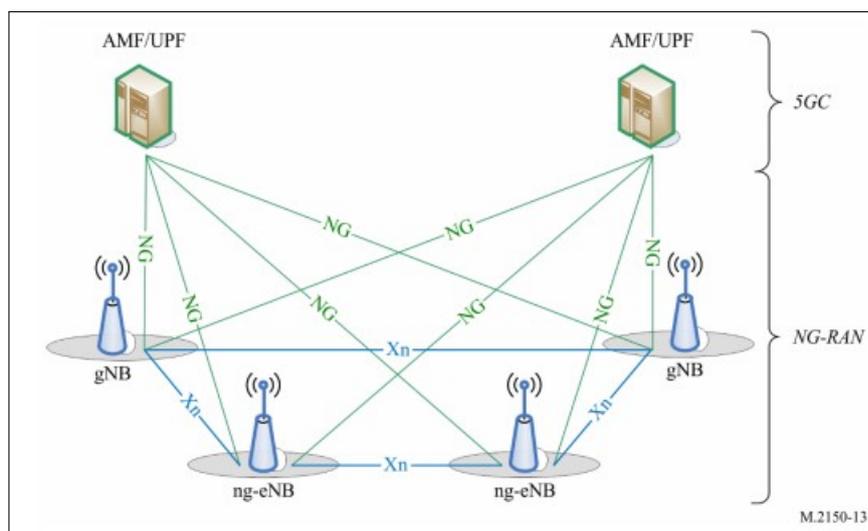


**Ilustración 2-7:** Non-standalone vs Standalone.

Fuente: (DELGADO, 2020)

### 2.3 Arquitectura 5G

La arquitectura 5G, mostrada en la Ilustración 2-8, está diseñada para velocidades de datos más rápidas, menor latencia y escalabilidad. Los componentes clave de la arquitectura 5G son la red central (CN), la red de acceso radioeléctrico (RAN) y los equipos de usuario (UE). La CN gestiona la conmutación, el encaminamiento y el control de voz y datos, mientras que la RAN conecta los dispositivos de usuario a la red central. El UE engloba los dispositivos utilizados por consumidores y empresas para acceder a servicios 5G (DELGADO, 2020, pág. 15).



**Ilustración 2-8:** Arquitectura general 5G.

Fuente: (UIT-R, 2020, pág. 27)

### 2.3.1 Núcleo de la red

Es el corazón de la infraestructura de red, se basa por completo en lo que se denomina arquitectura basada en servicios (SBA), que aplica principios de redes informáticas con enfoque de diseño nativo en la nube (GOORAM, 2023). Sus funciones principales incluyen el enrutamiento de datos, gestión de la movilidad de dispositivos, autenticación y autorización de usuarios, así como el soporte para servicios de red virtualizados y aplicaciones de baja latencia. Además, el núcleo de red en 5G también proporciona capacidades de seguridad mejoradas para proteger la integridad y la confidencialidad de las comunicaciones.

En cuanto a la arquitectura 5G Core Network (5GC), según, (DELGADO, 2020, pág. 20). esta se construye sobre el Evolved Packet Core (EPC) con tres mejoras clave: arquitectura basada en servicios, soporte para el network slicing y separación entre el plano de control (Control Plane, CP) y el plano de datos (Data Plane, DP). La arquitectura basada en servicios se centra en funciones y servicios de la red central, en lugar de nodos individuales. Esto se alinea con la virtualización existente de la red central, ejecutándose en hardware genérico.

La arquitectura 5G busca cumplir de manera flexible y eficiente los requisitos de servicios móviles variados, aprovechando tecnologías como Software Defined Networking (SDN) y Network Function Virtualization (NFV). SDN separa el control de datos, permitiendo un control externo a través de un controlador lógico, mientras que NFV busca mejorar la flexibilidad y simplicidad de la red al minimizar la dependencia de restricciones de hardware mediante la virtualización de funciones de red (DELGADO, 2020, pág. 43).

#### 2.3.1.1 UPF

La Función del Plano de Usuario (User Plane Function, UPF) en el 5G Core ejecuta la comunicación del plano de usuario. Actúa como una puerta de enlace entre Radio Access Network (RAN) y la red de datos externa (MROZOWSKI, 2020, pág. 13). Algunas de las funciones clave son:

- **Enrutamiento (Routing) y Reenvío de Paquetes (Forwarding):** La UPF es responsable de enrutar y reenviar paquetes de datos entre el equipo de usuario (UE) y las redes de datos externas.
- **Almacenamiento en Búfer y Activación de Notificación de Datos:** Gestiona el almacenamiento en búfer de los paquetes de enlace descendente y activa la notificación de datos de enlace descendente cuando sea necesario.
- **Manejo de QoS (Calidad de Servicio):** La UPF desempeña un rol importante en el manejo

de Calidad de Servicio, asegurando que los requisitos de rendimiento específicos para diferentes servicios y aplicaciones se cumplan de manera efectiva.

- **Mediciones de Tráfico:** Realiza mediciones de tráfico para evaluar y optimizar el rendimiento de la red. Esto puede incluir monitorización de carga de la red y calidad de la conexión.

#### 2.3.1.2 AMF

La Función de Gestión de Acceso y Movilidad es una parte crucial del plano de control 5G Core (5GC). Su función principal es manejar la señalización de control entre el Equipo de Usuario (UE) y el 5GC (MROZOWSKI, 2020, págs. 12-13). Sus principales funcionalidades son:

- **Gestión de Registro:** Gestiona el proceso de registro de un UE en la red, asegurando que el UE esté autorizado y pueda acceder a servicios de red 5G.
- **Gestión de Conexión:** Facilita el establecimiento de la señalización del plano de control entre el UE y el 5GC. Implica la configuración y gestión de conexiones necesarias para la comunicación eficiente.
- **Gestión de Movilidad:** Supervisa la movilidad del UE, asegurando el acceso y mantenimiento de una conexión incluso cuando el UE se encuentra en modo inactivo.
- **Control y Ejecución de Paginación:** Controla y ejecuta el proceso de paginación, que es un mecanismo mediante el cual la red busca y notifica al UE que se le necesita, especialmente cuando está en modo inactivo.
- **Soporte de Movilidad Intra e Intersistema:** Facilita la movilidad dentro del sistema 5G (intrasistema) y entre sistemas (intersistema), permitiendo una transición fluida y eficiente entre diferentes tecnologías de acceso y áreas de cobertura.

#### 2.3.1.3 NRF

La Función de repositorio de red (NRF) está interconectado con casi todas las funciones de red (NF) del núcleo 5G, como AMF, UPF y muchas otras, permitiendo registrar sus servicios y descubrir otros servicios necesarios (KUMAR, 2023). Sus principales funcionalidades son:

- **Descubrimiento de servicios:** Ayuda a las funciones de red con la identificación de servicios disponibles en la red. Cuando una función de red requiere interactuar con otra, consulta a la NRF para localizar la instancia más adecuada de la función de red necesaria.

- **Registro de Servicios:** Cada vez que una función de red se inicia o experimenta algún cambio en sus servicios, registra dichos servicios y capacidades con la NRF. Este proceso asegura que el NRF mantenga siempre una visión actualizada de los servicios disponibles en la red.
- **Equilibrio de la carga** Monitorea la carga que enfrentan las diversas instancias de funciones de red. Cuando una NF solicita un servicio a la NRF, esta puede dirigirla hacia una instancia menos cargada, asegurando una distribución eficiente de la carga.
- **Control de políticas** Tiene la capacidad de determinar qué funciones de red pueden ofrecer ciertos servicios, esto asegura que se asignen las funciones de red apropiadas.

### 2.3.2 Estación base para 5G

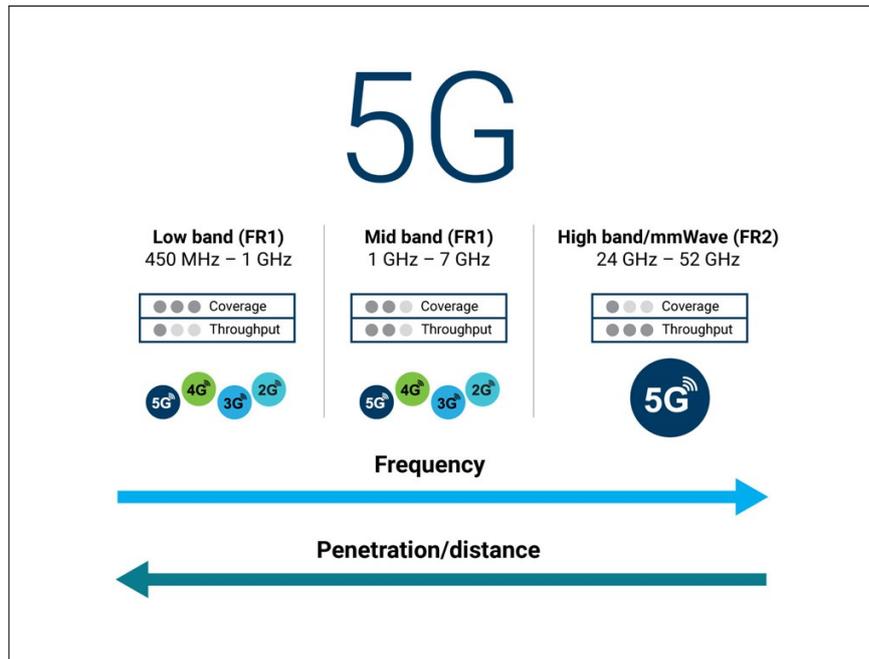
La tecnología reciente de acceso por radio para 5G recibe el nombre de "NR"(New Radio) y sustituye a "LTE". La estación base correspondiente a esta nueva tecnología se denomina Nodo B de Siguiete Generación, abreviada como gNB (o gNodeB), en reemplazo del eNB (o eNodeB). Estas estaciones bases inalámbricas facilitan la transmisión y recepción de comunicaciones a través de la red móvil y el equipo de usuario (UE) (UIT-R, 2020, pág. 26).

Las radios gNodeB están equipadas con radio definida por software (SDR), que ofrece varias opciones MIMO, incluyendo mMIMO para capacidades superiores. La avanzada utilización de SDR posibilita una transición fluida desde la red 4G LTE hacia una implementación de 5G NSA (combinando 4G eNodeB y 5G-NSA gNodeB en cada sitio) y posteriormente hacia una red 5G autónoma (SA) pura, empleando exclusivamente radios 5G NR. Esta capacidad de hoja de ruta es excepcional en la industria celular, preservando la inversión del operador en hardware, equipo y tiempo de instalación (GUERREO PINEDA et al., 2022, pág. 18).

La configuración de Standalone NR (SA NR) en la implementación 5G implica que el gNB no requiera la asistencia de la red 4G para conectarse a la red central. (GUERREO PINEDA et al., 2022, págs. 18-19).

## 2.4 Espectro para 5G

La tecnología 5G requiere una cantidad significativa de nuevo espectro móvil según (TAIPE, 2022, pág. 19), por lo que es crucial dar prioridad a la desfragmentación y liberación de las bandas principales. En (GSMA, 2019, pág. 2) se recomienda que los reguladores trabajen entre 80 y 100 MHz de espectro contiguo por operador en las bandas medias 5G clave, como la de 3.5 GHz, y 1 GHz por operador en las bandas milimétricas, como las de 26/28 GHz, estas frecuencias de pueden apreciar en la Ilustración 2-9.



**Ilustración 2-9:** Rango de Frecuencia 5G.

Fuente: (SLEIMAN, 2021)

Este enfoque facilitará el despliegue efectivo y eficiente de redes 5G, asegurando un rendimiento óptimo y una experiencia de usuario mejorada (GSMA, 2019, pág. 2). Existe un interés significativo a nivel mundial para poner a disposición el espectro de implementaciones 5G. Este impulso proviene tanto de operadores como de organizaciones de la industria, y cuenta con el respaldo de organismos reguladores en diversas partes del mundo.

En el proceso de estandarización, 3GPP ha concentrado sus esfuerzos en bandas donde se observa un marcado interés. La tecnología 5G requiere acceso a espectro en tres rangos de frecuencia, por debajo de 1 GHz, entre 1-6 GHz y por encima de 6 GHz (GSMA, 2019, pág. 2) para proporcionar una cobertura amplia y respaldar diversos casos de uso.

#### **2.4.1 Espectro por debajo de 1 GHz**

Proporciona una cobertura amplia en áreas urbanas, suburbanas y rurales. En este contexto, las bandas de 600 y 700 MHz son particularmente relevantes, correspondiendo a las bandas de 3GPP NR n71 y n28. Debido a que estas bandas no son muy amplias, se anticipa un ancho de banda máximo de 20 MHz en las frecuencias más bajas (DELGADO, 2020, pág. 36).

### ***2.4.2 Espectro entre 1 y 6 GHz***

En cuanto a cobertura y capacidad presenta una combinación de beneficios, fundamental para numerosos servicios 5G. Este rango tiene la capacidad de proporcionar cobertura extensa, capacidad mejorada y velocidades de datos elevadas a través de un ancho de banda de canal más amplio. A nivel global, existe un interés particular en la franja de frecuencia de 3300 a 4200 MHz, donde 3GPP ha asignado las bandas NR n77 y n78. Debido a las bandas más amplias disponibles, es posible alcanzar anchos de banda de canal de hasta 100 MHz. A largo plazo, se contempla la asignación de hasta 200 MHz por operador en este rango de frecuencia, y la agregación de portadora podría emplearse para desplegar todo el ancho de banda disponible (DELGADO, 2020, pág. 37).

### ***2.4.3 Espectro por encima de 6 GHz***

Es importante alcanzar velocidades de banda ancha ultrarrápidas, destacándose bandas de 26 GHz o 28 GHz con respaldo internacional. En la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2019 (CMR-19) de la UIT, se discutió establecer un acuerdo internacional sobre bandas específicas para 5G por encima de los 24 GHz según (GSMA, 2019, pág. 2), debido a que las frecuencias más altas suelen implicar rangos más cortos y un aumento en el ancho de banda disponible, estas bandas de frecuencia resultarán más adecuadas para la cobertura de puntos de acceso con una capacidad local muy alta, pudiendo proporcionar velocidades de datos muy elevadas. El mayor interés se centra en el rango [24.25- 29.5] GHz, con bandas 3GPP NR n257 y n258 asignadas. Se han definido anchos de banda de canal de hasta 400 MHz y la posibilidad de alcanzar anchos de banda aún mayores mediante la agregación de portadoras (DELGADO, 2020, pág. 37).

Uno de los aspectos fundamentales de la UIT-R es contar con un Registro Internacional de Frecuencias (MIFR). Se trata de una base de datos global que recopila todas las características necesarias para la asignación de frecuencias. Este registro describe el funcionamiento de las radiocomunicaciones a nivel mundial, brindando reconocimiento internacional y protección contra interferencias (UIT, 2018).

### ***2.4.4 Clasificación de las bandas***

3GPP establece nuevas bandas para especificaciones NR (New Radio). Estas bandas pueden clasificarse en bandas emparejadas, asignando rangos de frecuencia separados para el enlace ascendente y descendente, y bandas no emparejadas, utilizando un solo rango de frecuencia compartido para ambos enlaces. Las bandas emparejadas se utilizan para la operación Frequency Division Duplex (FDD), mientras que las bandas no emparejadas se emplean en la operación Time Division Duplex (TDD). Es importante señalar que algunas bandas no emparejadas se definen

como bandas Supplementary Downlink (SDL) o Supplementary Uplink (SUL) y estas bandas se emparejan con el enlace ascendente o descendente de otras bandas por agregación de portadora (DELGADO, 2020, pág. 36). 5G tiene dos gamas de frecuencias portadoras: FR1 (<6GHz con TDD y FDD) y FR2 (23-53 GHz con TDD); en la Tabla 2-2 se indica el rango de las bandas.

**Tabla 2-2:** Rangos de frecuencias para 5G 3GPP.

Canales	Designación de rango de frecuencias
FR1	450 - 7200 MHz
FR2	24250 - 52600 MHz

Fuente: (3GPP, 2020)

#### 2.4.4.1 Banda FR1

El estándar 5G NR define la forma de onda como OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con un prefijo cíclico. La banda de guarda de la forma de onda se reduce, y el espaciado entre subportadoras es variable y múltiplo de 15 kHz hasta 240 kHz. La duración del símbolo OFDM es inversamente proporcional a la separación de subportadoras y se reduce en factores de 2, 4, 8 o 16 para mayores separaciones. El ancho de banda máximo admitido es de 50 MHz con una separación de subportadoras de 15 kHz, duplicándose a 100, 200 y 400 MHz con una separación de 120 kHz. Con una subportadora de 240 kHz, el número de subportadoras se reduce a la mitad, pero el ancho de banda sigue siendo de 400 MHz (DILLI, 2020, pág. 768).

Al duplicarse el espaciado, la longitud de la ranura se reduce a la mitad, lo que lleva a un duplicado en el número de ranuras por subtrama. La separación de subportadora de 15, 30 y 60 kHz está disponible en FR1 (frecuencias hasta 7.125 GHz) (DILLI, 2020, pág. 768).

5G FR1 (Frequency Range 1) consiste en bandas de frecuencia sub-6 GHz asignadas a la tecnología 5G. Desde la introducción del GSM, se ha mostrado una creciente demanda de bandas de frecuencia adicionales. GSM/UMTS utilizaba principalmente bandas de frecuencia de 900 y 1800 MHz, mientras que 4G LTE empleaba frecuencias de hasta 6 GHz. Con 5G, se han asignado bandas de frecuencia aún más altas para su funcionamiento, no obstante, como se mencionó anteriormente no todas las frecuencias intermedias se utilizan para el despliegue de 5G. Las frecuencias por debajo de 6 GHz (banda baja/media) se han clasificado como Frequency Range 1 (FR1). Aunque estas frecuencias pueden no ofrecer el rendimiento 5G absoluto más alto, proporcionan un equilibrio decente entre alcance y rendimiento. En la Tabla 2-3 se puede observar indica su banda de operación (simbolizada con la letra n) tanto Downlink y Uplink, además de los modos de Duplexación por División de Tiempo (TDD), Duplexación por División de Frecuencia (FDD), Enlace Descendente

Complementario (SDL), Enlace Ascendente Complementario (SUL) mencionados anteriormente (GUERREO PINEDA et al., 2022, págs. 10-12).

**Tabla 2-3:** Bandas de frecuencia para 5G.

<b>Banda</b>	<b>Frecuencias (MHz)</b>	<b>Frecuencias (MHz)</b>	<b>Tipo de Duplexación</b>
n1	1920 – 1980	2110 – 2170	FDD
n2	1850 – 1910	1930 – 1990	FDD
n3	1710 – 1785	1805 – 1880	FDD
n5	824 – 849	869 – 894	FDD
n7	2500 – 2570	2620 – 2690	FDD
n8	880 – 915	925 – 960	FDD
n12	699 – 716	729 – 746	FDD
n20	832 – 862	791 – 821	FDD
n25	1850 – 1915	1930 – 1995	FDD
n28	703 – 748	758 – 803	FDD
n34	2010 – 2025	2010 – 2025	TDD
n38	2570 – 2620	2570 – 2620	TDD
n39	1880 – 1920	1880 – 1920	TDD
n40	2300 – 2400	2300 – 2400	TDD
n41	2496 – 2690	2496 – 2690	TDD
n51	1427 – 1432	1427 – 1432	TDD
n66	1710 – 1780	2110 – 2200	FDD
n70	1695 – 1710	1995 – 2020	FDD
n71	663 – 698	617 – 652	FDD
n75	N/A	1432 – 1517	SDL
n76	N/A	1427 – 1432	SDL
n77	3300 – 4200	3300 – 4200	TDD
n78	3300 – 3800	3300 – 3800	TDD
n79	4400 – 5000	4400 – 5000	TDD
n80	1710 – 1785	N/A	SUL
n81	880 – 915	N/A	SUL
n82	832 – 862	N/A	SUL
n83	703 – 748	N/A	SUL
n84	1920 – 1980	N/A	SUL
n86	1710 – 1780	N/A	SUL

**Fuente:** (GUERREO PINEDA et al., 2022)

## 2.5 Panorama internacional

El despliegue 5G a nivel mundial es un tema de gran interés y actualidad debido a que varios países ya han comenzado a implementar redes 5G en algunas ciudades y regiones. Por ejemplo, Estados Unidos, China, Corea del Sur y Japón son líderes en el despliegue de redes 5G. En cuanto a Europa, existe el Plan de Acción 5G lanzado tempranamente por la Comisión, en septiembre de 2016, para fortalecer los esfuerzos de la Unión Europea para el despliegue de redes 5G a lo largo del Mercado Único Digital que incluye, por ejemplo, corredores transnacionales 5G para habilitar aplicaciones críticas tales como vehículos autónomos. Estos países han invertido considerablemente en la infraestructura necesaria, como antenas y estaciones base, para asegurar una cobertura óptima (DE LEÓN, 2023, pág. 18).

Sin embargo, también existen desafíos asociados con la implementación de la red 5G a nivel mundial. Uno de los desafíos es la necesidad de una infraestructura sólida y amplia cobertura para garantizar una experiencia de usuario óptima. Además, la seguridad y privacidad de los datos también son preocupaciones importantes que deben abordarse. En el caso de Latinoamérica siguen favoreciendo la culminación del despliegue de las redes 4G y las versiones avanzadas que han surgido como LTE-Advanced o LTE A Pro (DE LEÓN, 2023, pág. 19). Para entender de mejor manera el despliegue de la red 5G, en la Tabla 2-4 se muestra las redes comerciales activadas de LTE y 5G a nivel mundial.

**Tabla 2-4:** Redes comerciales activadas en el mundo.

Regiones	LTE	5G	Porcentaje 5G/LTE
África	157	8	5 %
Asia	139	44	32 %
Europa	172	100	58 %
Latinoamérica	127	22	17 %
Medio Oriente	46	22	48 %
Oceanía	38	8	21 %
EE.UU. y Canadá	19	12	63 %
Total global	698	126	31 %

Fuente: (DE LEÓN, 2023)

### 2.5.1 Asia y Europa

Corea del Sur, Taiwán, Japón y China son los países más desarrollados en 5G, según los expertos, en el caso de, Tailandia se ha progresado a buen ritmo, India, Indonesia, Vietnam, Filipinas,

Malasia, Sri Lanka y Pakistán van detrás de sus rivales regionales y aún no han establecido una política 5G. Según (SPENCER, 2021) en su artículo habla sobre una clasificación que se puede apreciar en la Ilustración 2-10 donde se detalla una serie de variables, incluido el entorno comercial, disponibilidad del espectro, cobertura y velocidad de la red, evaluación del progreso en las pruebas de 5G y la solidez de la política 5G en los países asiáticos. Por el momento los operadores en varios de estos países aún siguen enfocados en mejorar la conexión 4G, por lo que es poco probable que se existan un progreso significativo en el año 2023.

Sin duda el país más avanzado en cuanto al desarrollo de la tecnología 5G es Corea del Sur que fue el primer país en lanzar redes comerciales 5G en abril de 2019 y actualmente tiene cobertura 5G en sus 85 ciudades. En junio de 2018, el ministerio de TIC completó una subasta de frecuencias 5G en la que las operadoras locales SK Telecom y KT se aseguraron espectro para lanzar servicios 5G en la nación asiática gracias a que ganaron 100 MHz en la banda de 3,5 GHz. Según (TOMAS, 2023) el Ministerio de Ciencia y TIC dijo que asignaría la banda de frecuencia de 3,4 a 3,42 GHz a la operadora LG Uplus, además del espectro de 3,42 a 3,5 GHz que la empresa de telecomunicaciones compró en 2018.

Country	Business environment	Spectrum availability	Network coverage & speed	Progress on 5G trials	Robustness of 5G policy
South Korea	Medium	High	High	High	High
China	Medium	High	High	High	High
Taiwan	High	High	High	Medium	High
Japan	Medium	High	Medium	High	High
Singapore	High	High	Medium	Medium	High
Hong Kong	High	High	Medium	Low	Medium
New Zealand	High	High	Low	Medium	Medium
Australia	High	Medium	Low	Medium	Medium
Thailand	Medium	High	Medium	Low	Medium
Malaysia	Medium	Low	N/A	Medium	Medium
Indonesia	Low	Low	N/A	Medium	Low
Philippines	Low	Low	N/A	Medium	Low
India	Low	Low	N/A	Low	Low
Vietnam	Low	Low	N/A	Low	Low
Sri Lanka	Low	Low	N/A	Low	Low
Pakistan	Low	Low	N/A	N/A	Low

**Ilustración 2-10:** Carrera por el 5G en Asia.

Fuente: (SPENCER, 2021)

## **2.5.2 Estados Unidos, México y Canadá**

### **2.5.2.1 EE. UU:**

El despliegue de la red 5G en Estados Unidos ha sido un tema de gran interés debido a que varios operadores de telecomunicaciones en ese país han estado trabajando en el despliegue de la red 5G, por ejemplo: AT&T, Verizon y recientemente T-Mobile son algunos de los principales operadores que lideran el despliegue de la red 5G en Estados Unidos (COURTNEY, 2021). Este último utiliza el espectro de (2.5 y 1.9) GHz y está disponible para 260 millones de personas.

Los operadores han invertido en infraestructura y tecnología para ampliar la cobertura 5G en ciudades a nivel nacional. No obstante, el despliegue en zonas rurales ha sido más lento debido a desafíos logísticos e infraestructurales. Además, el proceso ha enfrentado obstáculos regulatorios y de seguridad, llevando al gobierno de Estados Unidos a tomar medidas para salvaguardar la red 5G contra posibles amenazas cibernéticas (SHAREAMERICA, 2020).

### **2.5.2.2 Canadá**

El despliegue de la red 5G en Canadá ha estado en marcha desde 2020. Varias compañías de telecomunicaciones, como Bell, Rogers y Telus, están trabajando en la implementación de la red 5G en todo el país (Bertolini 2020). En octubre de 2023 el gobierno de Canadá realizó su tercera subasta de espectro 5G en la banda de 3.8 GHz (la primera fue de 600 MHz en 2019 y la segunda de 3,500 MHz en 2021.) y le asignará más espectro en el futuro, a través de subastas locales no competitivas y en mmWave (PARRA, 2023a).

El gobierno de Canadá ha puesto a disposición más espectro para mejorar la calidad, cobertura y el precio de los servicios de telecomunicaciones, con especial énfasis en la tecnología móvil de quinta generación, incluso a través de licencias locales no competitivas y subasta de ondas milimétricas (mmWave).

### **2.5.2.3 México**

El despliegue de la red 5G en México está en marcha y se anticipa que tendrá un impacto significativo en la conectividad y la tecnología del país. Las principales empresas de telecomunicaciones en México, como Telcel (disponible en 104 ciudades), AT&T y Movistar, están trabajando en la implementación de la red 5G a nivel nacional (ECONOMISTA, 2020).

El enfoque inicial del despliegue se centra en las principales ciudades y áreas metropolitanas, con planes de expansión hacia zonas rurales y remotas en etapas posteriores. No obstante, el

despliegue completo de la red 5G enfrenta desafíos significativos. Uno de los principales obstáculos es la infraestructura necesaria para respaldar la red 5G, lo que implica la instalación de nuevas antenas y estaciones base, así como la actualización de la infraestructura existente para soportar las velocidades y la capacidad elevadas de la red 5G (RAMIRES, 2023).

### **2.5.3 Latinoamérica**

#### **2.5.3.1 Argentina**

La publicación de los “Lineamientos de Gestión 2020/2023” elaborados por el ente regulador ENACOM (Ente Nacional de Comunicaciones) se entiende como el documento inicial para el proceso de despliegue de la 5G. En el mismo se encuentran lineamientos con relación a la 5G: “Elaborar un Plan Nacional de Espectro, orientado en satisfacer la demanda creciente de datos móviles, y promover el desarrollo de nuevas redes móviles de última generación. Declarar las bandas de frecuencias aptas para la implementación y despliegue 5G en nuestro país. Durante 2022 y 2023 se avanzó con el diseño de políticas públicas en materia de tecnologías de Quinta Generación” (ENACOM, 2020).

El 15 de marzo de 2021 ENACOM comenzó a una semana de pruebas y demostraciones de 5G para conexiones de banda ancha móvil a cargo de las principales compañías del sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC) en las instalaciones de ENACOM. Desde febrero de 2021 ya hay desplegadas radiobases 5G usando compartición de espectro DSS27, ya existen 10 radiobases en Buenos Aires y Rosario y en febrero de 2022 alcanzaron las 20 al incluir otras ciudades (DE LEÓN, 2023, pág. 24).

En diciembre de 2021 el ENACOM declaró las siguientes bandas de frecuencias aptas para la implementación y despliegue de 5G (AMBROSI, 2021):

- Banda de 1500 MHz: 1427-1518 MHz
- Banda AWS-3: 1770-1780 MHz/2170-2200 MHz
- Banda de 2300 MHz: 2300-2400 MHz
- Banda de 3500 MHz: 3300-3600 MHz
- Banda de 26 GHz: 24,25-25,75 GHz
- Banda de 38 GHz: 37-43,5 GHz

### 2.5.3.2 *Brasil*

El desarrollo de 5G en Brasil se lleva a cabo gracias a una planificación detallada y de corto y largo plazo del sector de las telecomunicaciones. Dentro de esta planificación Brasil es el país que cuenta con más redes 5G operando comercialmente siendo cuatro redes a abril de 2022 (DE LEÓN, 2023, pág. 25).

El 14 de junio de 2019 el Consejo Administrativo de la Agencia Nacional de Telecomunicaciones de Brasil (ANATEL) aprobó el Plan Estructural de Redes de Telecomunicaciones (PERT), que es fundamental para el proceso de desarrollo de las telecomunicaciones que incluye la 5G. ANATEL utiliza el PERT como una herramienta de planificación y control del sector, es actualizado anualmente y revisado cada 5 años (*Plano Estrutural de Redes de Telecomunicações - PERT*, 2019).

El 17 de junio de 2021 el Consejo de Administración de la ANATEL aprobó el Plan de Uso del Espectro Radioeléctrico en Brasil para el período 2021-2028, el que fue la base sólida para la elaboración de las condiciones para la subasta de espectro llamada “de 5G” (pues abarca más aspectos que la 5G, como ser 4G, fibra óptica, redes gubernamentales, otros). Este Plan fue desarrollado armónica e integradamente con la planificación operativa, táctica y estratégica de la ANATEL. El Consejo Directivo de la ANATEL aprobó en septiembre de 2021 el anuncio de subasta de 5G (*Plano Estrutural de Redes de Telecomunicações - PERT*, 2019). Fue la mayor oferta de espectro en la historia de la ANATEL, y quizás del mundo, con la puesta a disposición de 3,7 GHz en las bandas de:

- 700 MHz
- 2,3 GHz
- 3,5 GHz
- 6 GHz

Con esta asignación se expande en forma importante los recursos asignados de espectro para que los proveedores puedan ampliar sus redes.

### 2.5.3.3 *Chile*

Chile dispone actualmente de tres redes operando comercialmente y en pleno desarrollo en todo el país. El 19 de noviembre de 2020 se efectuó la apertura del Concurso Público 5G que tiene por objeto otorgar concesiones de servicio público de telecomunicaciones que se instalen, operen y

exploten sobre una red inalámbrica de alta velocidad para las siguientes porciones de espectro, incluyendo con estas asignaciones, al igual que Brasil, obligaciones de cobertura 5G en zonas extremas, rurales y urbanas no rentables (INFORME RESULTADO DE LOS CONCURSOS PÚBLICOS 5G, 2021):

- 20 MHz comprendida en las bandas de frecuencia de 703-713 MHz y 758-768 MHz. (LTE Advanced Pro + 5G o superior).
- 30 MHz comprendida en las bandas de frecuencia de 1.755-1.770 y 2.155-2.170 MHz (AWS). (LTE Advanced Pro + 5G o superior).
- 150 MHz comprendido en las bandas de frecuencias de 3,30-3,40 GHz y 3,60-3,65 GHz. (Exclusivamente 5G o superior).
- 400 MHz, comprendida en la banda de frecuencias de 25,90-27,50 GHz. (Exclusivamente 5G o superior).

El documento de las bases de este concurso establecía: “Las concesiones que se otorguen podrán corresponder, según soliciten los postulantes, a un servicio público de telecomunicaciones o bien a un servicio intermedio de telecomunicaciones de transmisión y conmutación”. Las concesiones tendrán una duración de 30 años. La zona de servicio corresponderá al área de cobertura total de las estaciones base comprometidas por el postulante en su proyecto técnico, dentro de la cual se incluye una cobertura por comunas del país y una cobertura complementaria en polígonos georreferenciados” (INFORME RESULTADO DE LOS CONCURSOS PÚBLICOS 5G, 2021):

Los resultados finales de este concurso son los siguientes:

- WOM obtuvo los segmentos únicos de 20 MHz en 700 MHz y 30 MHz en AWS.
- Movistar, Entel y WOM obtuvieron cada una de ellas un segmento de 50 MHz en la banda de 3,5 GHz.
- Claro, Entel y WOM obtuvieron cada una de ellas 400 MHz en la banda de 26 GHz en 34, 20 y 15 comunas respectivamente.

#### 2.5.3.4 Colombia

En diciembre de 2019 el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), rector de la industria, hizo público el “Plan 5G Colombia – El Futuro Digital es de Todos”, que plantea los lineamientos para la implementación y despliegue de 5G en el país, y

establece los objetivos y estrategias de política a desarrollar en el cuatrienio. El objetivo general es “Establecer lineamientos de política pública y las estrategias para el despliegue de la tecnología 5G en el país” (MINTIC, 2022).

De acuerdo con el lineamiento 1.2 del MinTIC ya existen 50 despliegues piloto de seis operadores en ocho ciudades, mientras el rector continúa trabajando en el marco técnico y jurídico para el objetivo del despliegue de la 5G. Como se menciona en su artículo (VARGAS, 2021) se citan como ejemplos que Claro desplegó una red privada de 5G en Plaza Claro, Movistar ha desplegado una red privada en el Hospital Militar para telemedicina y Tigo, junto a Nokia, han realizado pruebas en un entorno subterráneo en una mina de Jericó (Antioquia). Estos operadores han hecho esas pruebas en la banda de 3500 MHz. que es la más requerida. DirecTV se encuentra prestando servicio fijo inalámbrico usando una red 5G con núcleo en la nube y MIMO masiva. Colombia ha identificado un conjunto de bandas para servicio móvil que aún no han sido asignadas, y que por tanto podrían ser empleadas para 5G. Las mismas se detallan en un documento de la Agencia Nacional del Espectro (ANE) emitido para Consulta Pública en 2020 según la Tabla 2-5 (DE LEÓN, 2023, pág. 29).

En noviembre de 2021 la ministra de TIC anunció que Colombia podría licenciar unos 400 MHz en la banda de 3.500, de acuerdo con lo indicado en la Consulta Pública. En diciembre de 2021 el MINTIC publicó para comentarios un proyecto de decreto que actualiza los topes de espectro con el objetivo de habilitar anchos de banda adecuados para la 5G (MINTIC, 2022).

**Tabla 2-5:** Bandas de frecuencias IMT sin asignar en Colombia.

Banda (MHz)	Frecuencias (MHz)	Espectro (MHz)
600 (sujeta a apagón de TV analógico)	617-652/663-698	84
900	894-905/939-950	22
1400	1 427-1 518	91
AWS Extendida	1 755-1 780/2 155-2 180	50
2300	2 300-2 400	100
3500	3 300-3 700	400

Fuente: (MINTIC, 2022)

Los topes pasarían ser de:

- 50 MHz para las Bandas Bajas (entre 698 MHz y 960 MHz).
- 100 MHz para las Banda Medias (entre 1710 MHz y 2690 MHz).
- 80 MHz para las Bandas Medias Altas (entre 3300 MHz y 3700 MHz).

#### *2.5.3.5 Perú*

Perú ha asignado 680 MHz de espectro a las empresas de telecomunicaciones móviles, pero actualmente, y considerando las nuevas tecnologías móviles como la 5G y la eficiencia en su uso, requiere de un reordenamiento que ya está siendo considerado por sus autoridades.

Tal como se menciona en (PERUANO, 2018), el 31 de octubre de 2018 se publicó el Decreto Supremo N° 016-2018-MTC/53 que aprueba el Reglamento Específico para el Reordenamiento de una Banda de Frecuencias sobre la cual ya existan derechos asignados. En junio de 2019 el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) aprobó por Resolución Viceministerial el reordenamiento de la banda de frecuencias de 2.500 a 2.690 MHz. Posteriormente, considerando la importancia de la banda de 3.500 y que su uso requiere del orden de 80 a 100 MHz contiguos, y el hecho de que en parte está asignada, pero en forma desordenada, se comenzó el proceso de reordenamiento.

El 25 de octubre de 2019 se inicia el reordenamiento de la banda de frecuencias 3.400-3.600 MHz adecuándola a la canalización de la banda de frecuencias de 3.300-3.800 MHz, mediante la Resolución Directoral 358-2019-MTC/27, pero el 5 de marzo de 2020, por R.D. N° 095-2020-MTC/27 se dejan sin efecto las R.D. N° 358-2019-MTC/27 y R.D. N° 464-2019-MTC/27, que reordenaban el espectro de 3.400-3.600 GHz. Por lo expuesto, el espectro central de la 5G, el de 3.500 MHz, queda pendiente de asignación y reordenamiento por un procedimiento a determinar (DE LEÓN, 2023, pág. 39).

A principios de 2021 Claro, Telefónica y ENTEL solicitaron al MTC autorización para empezar a usar las frecuencias que tienen asignadas en las bandas AWS, 2,5 GHz y 3,5 GHz, para el despliegue de servicios LTE y 5G NR NSA. El MTC aprobó esta petición y se autorizó a Claro y ENTEL la prestación de servicio de acceso fijo en la banda ya asignada de 3,5 GHz, y un mes después se autorizó a esas tres empresas la prestación de servicios móviles con 5G NSA en los bloques ya disponibles de AWS, 2,5 y 3,5 GHz. De esta forma, y considerando la cobertura territorial del espectro asignado, América Móvil tiene una extensa cobertura del Perú, ENTEL tiene principalmente en la Costa y Telefónica del Perú en Lima (MTC, 2021).

#### *2.5.4 Ecuador*

Una vez revisado como está el panorama concerniente a las frecuencias que se pueden utilizar en 5G en otros países es momento de realizar una comparativa referente a Ecuador y determinar la viabilidad de la asignación de esas mismas frecuencias.

La política "Ecuador Digital", implementada por el Ministerio de Telecomunicaciones y de la

Sociedad de la Información (MINTIC) desde el 17 de mayo de 2019, tiene como objetivo consolidar la Sociedad de la Información y del Conocimiento en Ecuador (AVEDAÑO, 2018, pág. 3). La iniciativa busca lograr la transformación digital progresiva de las instituciones públicas y diversos sectores de la economía, con el propósito de aumentar la productividad y competitividad de las empresas.

Antes de la pandemia, el MINTEL tenía planes concretos, como la extensión significativa de la cobertura 4G para el año 2021 y la disponibilidad de servicios 5G entre 2021 y 2022 en la banda de 3,5 GHz. En el segundo semestre de 2019, la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL) otorgó permisos precarios en la banda de 3,5 GHz a Claro, Movistar y la Corporación Nacional de Telecomunicaciones (CNT) para realizar pruebas de acceso inalámbrico fijo 5G (DE LEÓN, 2023, pág. 37).

En noviembre de 2019, el ministro de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información anunció que la asignación de espectro en las bandas de 700 MHz, 1700 MHz, 2,5 GHz y 3,5 GHz tendría lugar en 2020 (MINTEL, 2021). Esta asignación tenía el propósito de aumentar la implementación de 4G y lanzar comercialmente 5G en 2022. En abril de 2021, se habilitaron tres áreas de experimentación con tecnología 5G, y a finales de ese mes, la CNT EP lanzó su primera zona de prueba 5G en el centro de Guayaquil.

## **2.6 Equipos necesarios**

### **2.6.1 SDR**

En los últimos años, el crecimiento significativo de la tecnología de Radio Definido por Software (SDR) ha generado la imperativa exploración de este campo por parte de expertos en comunicaciones, tanto en entornos académicos como profesionales. Con la intención de innovar en sistemas inalámbricos, Joseph Mitola III se dedicó a la investigación y desarrollo de un enfoque revolucionario para equipos de radiocomunicación en la década de los 90, dando origen a los dispositivos de radio definidos por software. Según (VEGA, 2020). Los SDR son dispositivos de comunicaciones cuya funcionalidad se encuentra definida en el software, lo cual minimiza la necesidad de realizar modificaciones de hardware durante actualizaciones tecnológicas.

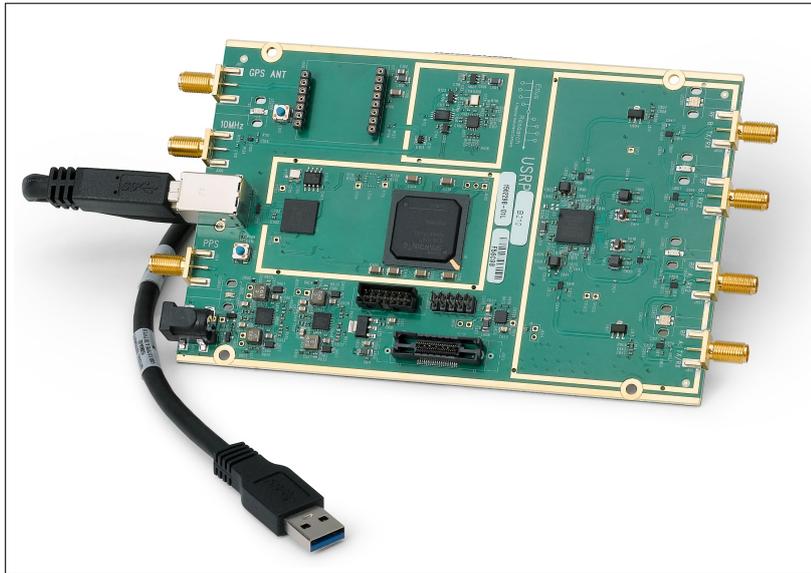
#### **2.6.1.1 USRP B210**

USRP B210 mostrada en la Ilustración 2-11, es una solución integral de radio definida por software (SDR) que abarca una amplia gama de frecuencias, desde 70 MHz hasta 6 GHz. Según el fabricante (ETTUS, 2013), esta placa única ofrece un transceptor RFIC AD9361 de conversión directa con un ancho de banda en tiempo real de hasta 56 MHz, una FPGA Spartan6 reprogramable

y una interfaz USB 3.0 de alta velocidad para una fácil conexión y alimentación. Con una total compatibilidad con el software USRP Hardware Driver (UHD), es una opción asequible opción para la experimentación en una variedad de aplicaciones como sistemas celulares, GPS, WiFi, ISM, entre otros, a continuación, se muestran sus características principales:

Características principales:

- Cobertura de RF de 70 MHz a 6 GHz.
- Interfaz USB 3.0 SuperSpeed
- ADC/DAC de 12 bits de tasa flexible
- 2 TX y 2 RX, semidúplex o dúplex completo
- Capacidad MIMO 2x2 totalmente coherente
- Hasta 56 MHz de ancho de banda instantáneo en 1x1
- Hasta 30,72 MHz de ancho de banda instantáneo en 2x2



**Ilustración 2-11:** USRP B210

Fuente: (ETTUS, 2013)

### 2.6.2 Antena ANT-120-008.

La antena ANT-120-008 mostrada en la Ilustración 2-12, es una solución eficiente para la conectividad 4G o 5G, con una ganancia de hasta 6 dBi. Como dice el fabricante (PROXICAST, 2023), es compatible con una amplia gama de bandas de frecuencia utilizadas por operadores de telefonía

móvil en todo el mundo. Cuenta con una bisagra de policarbonato permite un ajuste flexible para optimizar la recepción de señal, mientras que su conector SMA y toma de tierra integrada facilitan la instalación. Es una excelente opción para aplicaciones que requieren una mayor ganancia y es compatible con una variedad de equipos basados en SMA, a continuación, sus características principales:

- Compatible con la mayoría de Módems/Routers Celulares.
- Compatible con todas las redes 4G/5G Sub-6 (FR1).
- Ganancia máxima de 3 - 6 dBi
- Omnidireccional
- Conector macho SMA integrado y plano a tierra
- Gira 90° y 360°



**Ilustración 2-12:** ANT-120-008  
Fuente: (PROXICAST, 2023)

### 2.6.3 Equipo de usuario Redmi Note 12 Pro 5G

El Xiaomi Redmi Note 12 Pro, como se dice en (SMARTGSM, 2023) , es un smartphone Android con pantalla OLED de 6.67 pulgadas (FHD+ y 120Hz). Equipado con un procesador Dimensity 1080 de MediaTek, ofrece hasta 12 GB de RAM y 256 GB de almacenamiento fijo. Para este trabajo lo más importante es que cuenta con conectividad 5G para las bandas mostradas en la Tabla 2-6.

**Tabla 2-6:** Redes Celulares Redmi Note 12 Pro 5G.

Red	Bandas
2G	GSM 850 / 900 / 1800 / 1900
3G	HSDPA 800 / 850 / 900 / 2100
4G	LTE B1 / B2 / B3 / B4 / B5 / B7 / B8 / B12 / B13 / B17 / B18 / B19 / B20 / B26 / B28 / B32 / B38 / B40 / B41 / B66
5G	SA/NSA B1 / B3 / B5 / B7 / B8 / B20 / B28 / B38 / B40 / B41 / B66 / B77 / B78

Fuente: (SMARTGSM, 2023)

## 2.7 Parámetros 5G NR

En 5G NR, según menciona (TECHPLAYON, 2023a), 3GPP ha establecido nuevas definiciones para mediciones en el UE que utiliza SS (señal de sincronización) y CSI (información de estado del canal).

### 2.7.1 SS-RSRP

SS-RSRP (Señal de sincronización de referencia de potencia recibida), en (TECHPLAYON, 2021) se define como la media lineal de contribuciones de potencia (en vatios) de los elementos de recurso que transportan señales de sincronización (SS). Los recursos de tiempo de medición para SS-RSRP se limitan a la duración de la ventana de configuración del tiempo de medición del bloque SS/PBCH (SMTC).

Para calcular la SS-RSRP, como se menciona en (TECHPLAYON, 2021), es posible emplear señales de referencia de demodulación para PBCH y en caso de ser requerido por las capas superiores, CSI RS, junto con la SSS. La medición de la SS-RSRP que involucre la señal de referencia de demodulación para PBCH o la señal de referencia CSI se llevará a cabo mediante un promedio lineal de las contribuciones de potencia de los elementos de recurso que transporten las señales de referencia respectivas, considerando el ajuste de potencia de dichas señales de referencia.

CSI-RSRP, Potencia Recibida de la Señal de Referencia CSI, según (TECHPLAYON, 2021) representa la media lineal de las contribuciones de potencia (en vatios) de los elementos de recurso que transportan señales de referencia CSI, configuradas para mediciones RSRP dentro de la banda de frecuencia de medición considerada en las ocasiones CSI-RS configuradas. Para calcular el CSI-RSRP, se utilizan señales de referencia CSI transmitidas en el puerto de antena 3000. En caso de utilizar CSI-RSRP para L1-RSRP, se pueden emplear señales de referencia CSI transmitidas en los puertos de antena 3000 y 3001.

El dispositivo móvil (UE) lleva a cabo mediciones de SS-RSRP en la Capa 1 y 3 (RRC) para varios propósitos, incluida la selección y reelección de células, control de potencia, procedimientos de movilidad y gestión del haz. Las mediciones de RSRP se comunican a través de CSI o PBCH-DMRS, con posibilidad de utilizar mediciones de CSI-RS como entrada adicional en la capa 1. Es importante considerar que las potencias de transmisión de CSI-RS pueden diferir de las señales SS y PBCH-DMRS, por lo que el gNB proporciona información de desplazamiento al UE para tener en cuenta durante las mediciones.

#### *2.7.1.1 Características*

- La media se obtiene mediante unidades lineales en miliwattios [mW] en lugar de dBm
- La potencia se mide sobre la energía recibida durante la parte útil del símbolo solamente y no incluye la parte del prefijo cíclico.
- Para FR1, la medición se realiza en el conector de antena del equipo de usuario.
- Estas mediciones se filtran en las Capas 1 y 3

#### *2.7.1.2 SS-RSRPP filtrado de capa 1*

- El RSRP de capa 1 tiene un rango de notificación menor que el RSRP de capa 3.
- Un equipo de usuario está configurado para notificar SS-RSRP de capa 1.
- Las mediciones de nivel 1 son de "nivel de haz" no de "nivel de célula", lo que significa que cada resultado de SS-RSRP está vinculado a un bloque SS/PBCH específico.
- El SS-RSRP o CSI-RSRP de nivel 1 puede representarse de 16 (-140 dBm) a 113 (-44 dBm).

#### *2.7.1.3 SS-RSRPP filtrado de capa 3*

- El filtrado de capa 3 elimina el desvanecimiento rápido y reduce las variaciones a corto plazo en los resultados de las mediciones.

- Las mediciones SS-RSRPP de Capa 3 son útiles para procedimientos de traspaso.
- El RSRP de capa máximo se define como -31 dBm y el mínimo como -156 dBm.
- El rango RSRP completo tiene 128 entradas (de -31 dBm a -156 dBm) y puede representarse con 7 bits.
- Las mediciones de la capa 3 pueden ser de "nivel de haz.º de "nivel de célula pueden notificarse al gNB en un mensaje de informe de medición.
- En las mediciones de nivel 3, el gNB proporciona al equipo de usuario una configuración de temporización para la medición de bloques SS/PBCH.

### **2.7.2 NR-RSSI**

El NR-RSSI, Indicador de Intensidad de Señal Recibida de Portadora, como se menciona en (TECHPLAYON, 2023a), representa la media lineal de la potencia total recibida (en vatios). Esta medición se realiza específicamente en ciertos símbolos OFDM dentro del recurso de tiempo de medición y en el ancho de banda definido para la medición. Este cálculo abarca un conjunto de N bloques de recursos provenientes de diversas fuentes, tales como células con y sin co-canal, interferencia de canales adyacentes, ruido térmico, entre otros factores. Es importante destacar que los recursos de tiempo de medición para el NR-RSSI se limitan a la duración de la ventana de configuración de tiempo de medición de bloques SS/PBCH.

CSI-RSSI, Indicador de Intensidad de Señal Recibida CSI (CSI Received Signal Strength Indicator, en inglés), según (TECHPLAYON, 2023a), se refiere a la media lineal de la potencia total recibida (en vatios). Esta medida se realiza exclusivamente en símbolos OFDM dentro del recurso de tiempo de medición y dentro del ancho de banda designado para la medición. Incluye un conjunto de N bloques de recursos provenientes de diversas fuentes, como células co-canal servidas y no servidas, interferencia de canales adyacentes, ruido térmico, entre otros factores. Los recursos de tiempo de medición para CSI-RSSI corresponden a símbolos OFDM que contienen ocasiones CSI-RS configuradas.

### **2.7.3 SS-RSRQ**

El RSRQ, Calidad de la señal de referencia recibida, como se menciona en (TECHPLAYON, 2023b) es una medida realizada por el UE para conocer la calidad de las señales de referencia recibidas. En la 5G NR, RSRQ puede medirse para señales de referencia SS y señales de referencia CSI. Las mediciones SS-RSRQ pueden utilizarse para procedimientos de selección y reelección de células y

de movilidad, mientras que las mediciones CSI-RSRQ sólo pueden utilizarse para procedimientos de movilidad.

### 2.7.3.1 Características

- RSRQ se mide en [dB], mientras que RSSI y RSRP se miden en dBm.
- RSRQ se utiliza en procedimientos de selección de célula, reelección y movilidad.
- El rango de RSRQ para 5G está definido entre -43 dB y 20 dB, pudiendo ser positivo o negativo.
- La gama completa de RSRQ se asigna a 128 valores de índice (7 bits), donde el índice 0 corresponde a -43 dB y el índice 127 a 20 dB.
- El UE informa de un valor de índice asignado a un valor de RSRQ en lugar de informar directamente en dB.
- El UE informa de la medición RSRQ al gNB en el mensaje RRC: Measurement Report (MR), cuando el gNB RRC configura Report Quantity para RSRQ.
- Las mediciones RSRQ en 5G se filtran en la capa 3 para eliminar el impacto del desvanecimiento rápido y reducir las variaciones a corto plazo.

### 2.7.3.2 Cálculo teórico

En (TECHPLAYON, 2023b) se dice que el SS-RSRQ puede definirse como la relación entre SS-RSRP y RSSI multiplicada por el número de bloques de recursos (RB) N como se muestra en la Ecuación 2-2.

$$SS - RSRQ(dB) = \frac{SS - RSRP}{RSSI} * N$$

**Ecuación 2-2:** Ecuación SS-RSRQ

CSI-RSRQ puede definirse como la relación entre CSI-RSRP y RSSI multiplicada por el número de bloques de recursos (RB) N, como se muestra en la Ecuación 2-3.

$$CSI - RSRQ(dB) = \frac{CSI - RSRP}{RSSI} * N$$

**Ecuación 2-3:** Ecuación CSI-RSRQ

Se puede calcular el valor teórico de RSRQ utilizando fórmulas anteriores dado que:

- Rango de RSRP para 5G NR = -156 dBm a -31 dBm
- Rango RSSI para 5G NR = - 120 dBm a -13 dBm
- Bloque de recursos para 5G (N) = 24 a 275 RBs

Las fórmulas anteriores para el cálculo de RSRQ deben convertirse en logarítmicas, ya que RSRP (dBm) y RSSI (dBm) son de escala logarítmica.

#### **2.7.4 SINR**

SS-SINR, relación señal/ruido e interferencias, en (TECHPLAYON, 2023a), se define como la media lineal de la contribución de potencia (en vatios) de los elementos de recurso que transportan SSS dividida por la media lineal de la contribución de potencia de ruido e interferencia (en vatios) de los elementos de recurso que transportan SSS dentro del mismo ancho de banda de frecuencia.

CSI-SINR: relación señal/ruido e interferencia CSI y según (TECHPLAYON, 2023a), se define como la media lineal de la contribución de potencia (en vatios) de los elementos de recurso que transportan señales de referencia CSI dividida por la media lineal de la contribución de potencia de ruido e interferencia (en vatios) de los elementos de recurso que transportan señales de referencia CSI dentro del mismo ancho de banda de frecuencias.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Introducción

Este capítulo describe la metodología empleada para la selección de bandas de frecuencia. Estas bandas fueron elegidas considerando sus características propias y aplicabilidad con respecto a los requisitos utilizados por otros países a nivel mundial para implementar redes 5G, ya sea de manera comercial o en fase de prueba. Del mismo modo se incluyó parámetros para evaluar el rendimiento de una red 5G, donde posteriormente se hizo una selección de estos en base a la factibilidad de equipos y dispositivos del laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas del Modular de la FIE, y finalmente se detalla los dispositivos utilizados y los pasos a seguir para implementar en condiciones de laboratorio una red 5G SA utilizando el software de código abierto srsRAN, la USRP B210, la antena ANT-120-008 y el celular Redmi Note 12 Pro 5G con la finalidad de evaluar los parámetros mencionados anteriormente.

#### 3.2 Bandas de frecuencia

Existen diversos criterios que se deberían tener en cuenta a la hora de elegir una frecuencia adecuada dentro del rango de FR1 para el despliegue 5G, algunos de los más importantes por sus características específicas son los siguientes:

##### 3.2.1 Criterios de selección de las bandas

- Cobertura: La frecuencia asignada debe garantizar una buena cobertura y conexión confiable tanto en áreas urbanas como rurales. Las frecuencias más bajas, en las bandas de 600 MHz y 700 MHz (HUAWEI, 2021), tienen mejor recepción de señal y mayor cobertura en comparación con las frecuencias más altas dentro del rango de FR1.
- Capacidad: La frecuencia debe tener suficiente capacidad para manejar la demanda de datos de usuarios. Frecuencias intermedias, como la banda de 3,5 GHz, cuenta con mayor capacidad, lo que la hace ideal para áreas densamente pobladas donde se espera un alto volumen de tráfico de datos (ORANGE, 2020).
- Velocidad: A frecuencias altas se tiene velocidades de datos más rápidas en comparación con frecuencias más bajas (ATOMIC32, 2023), en el caso de ondas milimétricas (>a 20 GHz) con velocidades muy altas, pero este estudio corresponde a FR1 cuya frecuencia más alta sería 7,12 GHz.

- **Interferencia:** Es importante considerar la interferencia de otras redes y servicios en la frecuencia de ocupación. La ocupación del espectro es importante porque algunas frecuencias pueden estar más congestionadas que otras (GSMA, 2019, pág. 4), lo que afecta la calidad y la velocidad de la conexión.
- **Disponibilidad de espectro:** Verificar previamente la disponibilidad de espectro en la banda correspondiente a la frecuencia que se vaya a ocupar. Algunas frecuencias pueden ser licenciadas y estar reservadas para otros servicios o pueden tener regulaciones específicas que limiten su uso (CASTAÑEDA, 2022, pág. 70).

### ***3.2.2 Asignación a nivel mundial***

Las entidades reguladoras a nivel mundial desarrollan de manera activa planes de espectro 5G e incluso en algunos casos ya se concretaron las primeras asignaciones. Según (GSMA, 2019, pág. 2) el foco central está en nuevas bandas móviles, que incluyen el espectro en el rango de [3.3-3.8] GHz asignado a varios países. Pero aún se consideran otras bandas, por ejemplo:

- 4.5-5 GHz para 5G, para China y Japón
- Una cantidad cada vez más grande de países está considerando el rango de [3.8- 4.2] GHz
- También hay interés en la asignación de las bandas de 2.3 GHz y [2.5/2.6] GHz para 5G

Las recientes frecuencias 5G dispuestas por entidades regulatorias correspondientes han mostrado una notable expansión de infraestructuras de comunicación. Las bandas intermedias, como la de 3.5 GHz, y las bandas de ondas milimétricas son idóneas para implementar redes 5G densas con células pequeñas en áreas urbanas, proporcionando una capacidad adicional esencial.

Los avances tecnológicos actuales posibilitan que la banda de 3.5 GHz alcance la misma cobertura y utilice los mismos sitios de emplazamiento empleados actualmente en algunos países del mundo para bandas móviles, de 2.6 GHz y 1800 MHz. Paralelamente, las bandas de 600 MHz y 700 MHz son adecuadas para servicios 5G de amplia cobertura, de acuerdo con (MICHACA, 2023). En conjunto, estas nuevas frecuencias 5G proporcionan flexibilidad en la implementación de redes para satisfacer diversas necesidades de cobertura y capacidad.

#### ***3.2.2.1 Asia y Europa***

Corea del Sur actualmente es líder en redes quinta generación debido a que es el único país que ofrece cobertura 5G a casi el 100 % de su territorio, todo esto gracias a una correcta planificación

estratégica realizada desde el año 2013 que establecen lineamientos tanto para el sector público como privado, logrando así, en el año 2018 ser el primer país en asignar de manera simultánea, la banda media (3,5 GHz) y la banda ultra alta (28 GHz). Posteriormente en 2019, logró comercializar la primera red 5G del mundo, superando a EE. UU., Japón y China en la carrera por la quinta generación de comunicaciones móviles (VALENTIN ROJAS, 2021, pág. 11).

El objetivo de la red comercial solo fue un inicio para todos los planes que tiene el país sobre todo en el ámbito industrial donde de adquirieron equipos específicos con la finalidad de ofrecer servicios como ciudades inteligentes; sanidad digital; y vehículos autónomos entre otros. Según (WOYKE et al., 2019), China, el gigante asiático por excelencia, no se pudo quedar atrás en la carrera por establecer la red 5G y desde octubre del 2019 se empezó a implementar redes comerciales en varias ciudades convirtiéndose así en uno de los primeros países en llevar a cabo despliegues a gran escala de esta tecnología de comunicaciones móviles.

Al igual que Corea, el gobierno chino aplicó políticas de espectro idóneas para bandas medias, destacando las frecuencias de 2,6 GHz y 3,5 GHz, con las que se desplegaron la mayoría de las redes 5G del mundo. Desde entonces, China ha continuado expandiendo y fortaleciendo su infraestructura 5G, liderando en términos de adopción y desarrollo de esta tecnología a tal punto que según (PARRA, 2023b), en el segundo trimestre de 2023, China agregó más de 600 mil estaciones base 5G, una cifra que es seis veces las 100 mil que Estados Unidos.

En la Unión Europea existe el Grupo de Política del Espectro Radioeléctrico (RSPG) el cuál en 2016 aprobó una opinión jurídica para identificar las bandas de frecuencia que posteriormente serían asignadas a 5G para países miembros (CNMC, 2021, pág. 3). La banda de [3,3-3,8] GHz es considerada como la banda principal para el despliegue de redes 5G en Europa debido a que ofrece mayor armonía entre capacidad y cobertura. Por otro lado, es necesario realizar despliegues en bandas que ya se encuentran armonizadas por debajo de 1 GHz, concretamente en la banda de 700 MHz que ofrece mayor extensión de cobertura y uso en el interior de edificios.

Existen también otras opciones disponibles para la implementación 5G, como las bandas de 1,5 GHz y 2,3 GHz. La primera, también denominada banda L (VALERO, 2023), puede emplearse para aumentar la capacidad en el enlace descendente. En cuanto a la segunda, la Conferencia Europea de Administraciones Postales y de Telecomunicaciones (CEPT) ha establecido condiciones armonizadas para el uso de la banda de [2,3 a 2,4] GHz, permitiendo utilizar hasta 20 bloques TDD de 5 MHz cada uno.

En el caso de España las bandas que prestan servicios 5G fueron designadas en base a un concurso público para la banda de [3,4-3,8] GHz (CASTRO SANCHEZ, 2021, pág. 43), mencionada anteriormente

por sus características, e incluso en un estudio realizado para el puerto de Valencia se tuvo en cuenta el ancho de banda mínimo necesario para la prestación de un servicio con calidad adecuada donde los operadores proponen los valores mostrados en la tabla 3-1:

**Tabla 3-1:** Características de las bandas más utilizadas en 5G.

Frecuencias	Bandas	Pros	Contras	Ancho de banda
Medias	3.5 GHz	Equilibrio entre cobertura y capacidad	Requiere la presencia de otras bandas	360 MHz
Bajas	700 MHz	Alta penetración en espacios interiores	Baja velocidad de transmisión	2x30 MHz + 3x5MHz

Fuente: CASTRO SANCHEZ, 2021

Continuando en el viejo continente, los principales organismos europeos al igual que España, acordaron bandas pioneras de 700 MHz y de [3.4-3.8] GHz, los siguientes países ya cuentan con dichas frecuencias asignadas:

Alemania:

- 700 MHz asignado
- 3,4-3,6 GHz asignado
- 3,7-3,8 GHz asignado

Según lo mencionado en (LAROCCA, 2023), O2 Telefónica Alemana ya suministra 5G al 82 por ciento de la población. El operador aumentó mil estaciones en el primer trimestre de 2023 de las cuales 600 estaciones pertenecen la banda de 700 MHz (zonas rurales), 200 en 3.5 GHz (áreas urbanas) y el resto corresponde a ubicaciones non-standalone.

Francia:

- 700 MHz asignado
- 3,4-3,6 GHz asignado
- 2,1 GHz asignado

- 1,8 GHz asignado

De acuerdo con el artículo de (CONTRERAS, 2023), los sitios autorizados en Francia utilizan frecuencias de cuatro bandas disponibles para servicios de quinta generación. Empresas como Bouygues Telecom, Free Mobile, Orange, SFR y SRR cuentan con más de 16 instalaciones en la banda de 700 MHz y en la de 3.5 GHz, mientras que la banda de 2.1 GHz, Bouygues Telecom, Orange, SFR y Outremer Telecom han obtenido permiso para desplegar y operar en más de 10 mil lugares y Outremer Telecom tiene otros cinco sitios en la banda de 1,8 GHz ubicados en la Guyana francesa.

### 3.2.2.2 *Norte América*

En otros países como las bandas de frecuencias 5G son ligeramente distintas, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) cuenta con una estrategia integral denominada “Plan 5G FAST” y toma medidas para crear un espectro adicional disponible para servicios 5G en bandas bajas de 600 MHz, 800 MHz, y 900 MHz y bandas medias de 2,5 GHz, 3,5 GHz, y 3,7 – 4,2 GHz, que se encuentran en el rango de FR1 (CONSTAIN, 2019, págs. 34-35).

Para el caso de Estados Unidos, el objetivo de los operadores es brindar cobertura a más de 300 millones de personas para finales de 2023, por lo cual la asignación de bandas de frecuencia para el desarrollo de la tecnología 5G va directamente relacionada con la disponibilidad del espectro. Según (MAYORGA BOHORQUEZ, 2021, págs. 4-5) existe mayor distribución entre las bandas asignadas en el territorio estadounidense (600 MHz, 850 MHz, 2.5 GHz, 28 GHz, 39 GHz) que en el estado canadiense (600 MHz, 2.5 GHz).

Para el caso de México, según se cuenta en (ECONOMISTA, 2023) , se espera adjudicar espectro 5G en bandas bajas de 600 MHz, 800MHz o 850 MHz y para el caso de bandas medias a 1.5 GHz o “Banda L”, y a 3.5 GHz debido a que estas bandas se consideran como idóneas para crear capacidad y cobertura de servicios 5G para todo México.

### 3.2.2.3 *América del Sur*

La asignación de frecuencias en el rango FR1 para 5G en Latinoamérica está en proceso y varía de un país a otro dependiendo de los entes regulatorios correspondientes (DE LEÓN, 2023, pág. 23). Algunos países de la región han realizado subastas de espectro para asignar las frecuencias necesarias para implementar la red 5G, mientras que otros están en etapas previas de planificación y consulta.

En general, los reguladores y operadores de telecomunicaciones están colaborando para liberar y

asignar el espectro necesario para el despliegue de la red 5G. El objetivo es asegurar una distribución equitativa y eficiente de las frecuencias, fomentando así la competencia y la innovación en el sector de las telecomunicaciones.

Sin embargo, es importante tomar en cuenta que el proceso de asignación de frecuencias puede ser prolongado y enfrentar desafíos técnicos y regulatorios. Además, cada país cuenta con sus propias regulaciones y políticas en relación con el espectro, lo que puede resultar en diferencias el ritmo y metodología de asignación de frecuencias.

Por tal motivo se elaboró un resumen por cada país donde se explica su situación más reciente y la o las frecuencias asignadas que ya han sido concursadas o están en proceso.

**Argentina**

Ha establecido directrices que contemplan medidas de implementación 5G. Según (DE LEÓN, 2023, pág. 24)., desde principios de 2021, se ha llevado a cabo pruebas y ha implementado una cobertura limitada mediante el uso de DSS. Hacia finales de 2021, identificó ciertas bandas de espectro como aptas para la tecnología 5G, que se pueden apreciar en las Tablas 3-2 y 3-3, posteriormente, se realizó una subasta en el segundo semestre de 2022.

**Tabla 3-2:** Bandas FDD en Argentina.

FDD	Uplink	Downlink
Banda 1500 MHz	n74	n74
Banda AWS-3	n3, n66	n65, n66
Banda 2300 MHz	n30	n30

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

**Tabla 3-3:** Bandas TDD en Argentina.

TDD	Uplink	Downlink
Banda 3500 MHz	n77, n78	n77, n78

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

**Brasil**

En 2019 se dio a conocer el Plan Estructural de Redes de Telecomunicaciones (PERT) en Brasil, que es una herramienta de planificación y control en el ámbito de las telecomunicaciones. Este plan se actualiza anualmente y se revisa cada cinco años. Tal como se dice en (DE LEÓN, 2023, pág. 25), en junio de 2021, la Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) presentó el Plan de Uso del Espectro Radioeléctrico en Brasil para el período 2021-2028 y anunció una subasta de

capacidad en varias bandas mostradas en las Tablas 3-4 y 3-5. Los contratos resultantes de esta subasta se firmaron en diciembre de 2021. Este suceso fue muy significativo debido a que el 90 % del valor del espectro se convirtió en compromisos para proporcionar servicios y cobertura en diversas áreas, además se establecieron requisitos y compromisos para la implementación del 5G en todo el país. Actualmente, Brasil cuenta con cuatro redes comerciales de tecnología 5G.

**Tabla 3-4:** Bandas FDD en Brasil.

FDD	Uplink	Downlink
Banda 700 MHz	n12, n14, n28	n12, n14
Banda 2,3 GHz	n30	n30

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

**Tabla 3-5:** Bandas TDD en Brasil.

TDD	Uplink	Downlink
Banda 3,5 GHz	n77, n78	n77, n78

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

## Colombia

Ha seguido una planificación detallada para la implementación de la tecnología 5G. Según (CONSTAIN, 2019, pág. 41), El Plan 5G Colombia - El Futuro Digital es de Todos estableció las directrices para el despliegue de 5G en el país. La Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) publicó un estudio sobre las condiciones regulatorias para favorecer la adopción de la tecnología 5G en Colombia, abordando áreas como sandbox (bancos de pruebas) regulatorios, compartición de infraestructura y adaptaciones regulatorias según sea necesario. A pesar de los retrasos en la subasta del espectro, se llevaron a cabo varias pruebas piloto en un conjunto de bandas ISM libres mostradas en las Tablas 3-6 y 3-7, que podrían utilizarse para servicios móviles. Sin embargo, estas bandas aún no han sido asignadas formalmente para el servicio 5G.

**Tabla 3-6:** Bandas FDD en Colombia.

FDD	Uplink	Downlink
Banda 698-970 MHz	n5, n8, n12, n14, n18, n20, n28, n71	n5, n8, n12, n14, n18, n20, n28, n71
Banda 1710-2690 MHz	n1, n2, n3, n7, n25, n30, n65, n66, n70, n74	n1, n2, n3, n7, n25, n30, n65, n66, n70, n74

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

**Tabla 3-7:** Bandas TDD en Colombia.

TDD	Uplink	Downlink
Banda 3300-3700 MHz	n77, n78	n77, n78

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

**Chile** Chile ha logrado un avance significativo en la implementación de la tecnología 5G. Actualmente, ocupa el segundo lugar en la región con tres redes que operan comercialmente. Según (DE LEÓN, 2023, pág. 34), en noviembre de 2020, se llevó a cabo un concurso público para otorgar concesiones de servicio público de telecomunicaciones para la instalación, operación y explotación de una red inalámbrica de alta velocidad. Las concesiones abarcan diversas bandas que se muestran en las Tablas 3-8 y 3-9. La Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL) anunció en septiembre de 2021 que la Contraloría General de la República tomó conocimiento de los decretos de concesión adjudicados, lo que permitió el inicio del despliegue de la red 5G. Para abril de 2022, las tres empresas ganadoras (WOM, Movistar y ENTEL) ya ofrecen servicios comerciales de 5G. Además, SUBTEL emitió una consulta pública en 2021 para el reordenamiento del espectro radioeléctrico en la banda 3.400-3.600 MHz, aunque el decreto de este reordenamiento aún no ha sido oficialmente aprobado.

**Tabla 3-8:** Bandas FDD en Chile.

FDD	Uplink	Downlink
703-713 MHz y 758-768 MHz	n28	n28
1.755-1.770 y 2.155-2.170 MHz	n3, n66	n1, n65, n66

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

**Tabla 3-9:** Bandas TDD en Chile.

TDD	Uplink	Downlink
3,30-3,40 GHz y 3,60-3,65 GHz	n48, n77, n78	n48, n77, n78

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

## Perú

En Perú, se ha llevado a cabo un proceso de reordenamiento del espectro en respuesta a la evolución de las tecnologías móviles y la llegada de la tecnología 5G. Según (PERUANO, 2018), se aprobó el Reglamento Específico para el Reordenamiento de una Banda de Frecuencias,

que establece los procedimientos y condiciones generales para este proceso. En junio de 2019, se completó el reordenamiento de la banda de frecuencias de 2.500 a 2.690 MHz. Más tarde ese mismo año, se inició el proceso de reordenamiento de la banda de 3.500 MHz para su uso más eficiente. Sin embargo, en marzo de 2020, las resoluciones que reordenaban el espectro de 3.400 a 3.600 GHz fueron revocadas debido a problemas de competencia. A principios de 2021, las empresas Claro, Telefónica y ENTEL solicitaron autorización al Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) para utilizar las frecuencias asignadas en las bandas AWS, 2,5 GHz y 3,5 GHz con el fin de implementar servicios LTE y 5G NR NSA. Esta solicitud fue aprobada por el MTC basándose en el principio de neutralidad tecnológica, y en la actualidad estas empresas están desplegando sus redes.

#### *3.2.2.4 Ecuador*

Se ha recibido la valoración de las bandas de frecuencia de 2.5 GHz y 700 MHz por parte de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) (MINTEL, 2021). Esta evaluación marca el inicio del proceso de renegociación de contratos con las operadoras de Servicio Móvil Avanzado y abre la posibilidad de incorporar nuevos actores al mercado de las telecomunicaciones. Los contratos de concesión con las operadoras de redes móviles, que concluyen en 2023, serán objeto de renegociación, lo que, a su vez, allana el camino para el futuro despliegue de la quinta generación de tecnologías (5G) en el país. Además, se ha solicitado la valoración de otras bandas del espectro radioeléctrico, como la de 3.5 GHz, a la UIT, evidenciando el interés del país en optimizar el uso del espectro para las telecomunicaciones.

### **3.2.3 Frecuencias factibles**

En base a la información recopilada de todos los antecedentes, las bandas más adecuadas en principio son 700 MHz, 1,8 GHz, 2,4 GHz y 3,5 GHz.

#### *3.2.3.1 Banda n28 (700 MHz)*

La banda de 700 MHz, según lo señalado por (LUCAS-BARTOLO, 2021) en su artículo, es considerada una de las bandas más adecuadas para el despliegue de la tecnología 5G debido a su capacidad de alcance y penetración en estructuras, así como a la significativa reducción de inversiones necesarias para su configuración. Esta banda ofrece varias ventajas, entre las que se incluyen:

- Mayor cobertura: La banda 700 MHz tiene una mayor capacidad de penetración en edificios y áreas rurales, lo que permite una cobertura más amplia y mejorada en comparación con frecuencias más altas.

- Mejor propagación de señal: La baja frecuencia de la banda 700 MHz permite una mejor propagación de la señal, lo que significa que las señales pueden llegar más lejos y atravesar obstáculos con mayor facilidad.
- Mayor capacidad de carga: La banda 700 MHz tiene una mayor capacidad para soportar un mayor número de dispositivos conectados simultáneamente, lo que es beneficioso en áreas densamente pobladas o en eventos con alta concentración de personas.

También existen inconvenientes como:

- Menor velocidad de datos: Aunque la banda 700 MHz ofrece una mayor cobertura, también tiene una menor capacidad de ancho de banda en comparación con frecuencias más altas. Esto puede resultar en velocidades de datos más lentas en comparación con otras bandas utilizadas para 5G.
- Interferencia potencial: Debido a que la banda 700 MHz se utiliza para otros servicios de comunicación, como la televisión digital, puede haber una mayor posibilidad de interferencia en comparación con frecuencias dedicadas exclusivamente a 5G.

### 3.2.3.2 Banda n3 (1,8 GHz)

La banda de 1.800 MHz comenzó a ser utilizada para 5G en 2022, y actualmente se han desplegado redes en más de 300 países (CATALANO, 2022). Esta banda opera en el rango de frecuencia de 1710 MHz a 1785 MHz para el enlace ascendente y de 1805 MHz a 1880 MHz para el enlace descendente. Es parte del espectro de frecuencia de banda media que se utiliza en la tecnología 5G. Ventajas:

- Ofrece un equilibrio sólido entre cobertura y velocidad.
- Excelente alcance y penetración en edificios debido a las características de propagación.
- Diseñada para cubrir grandes áreas en entornos suburbanos y urbanos.

Desventajas:

- Aunque tiene una cobertura más amplia que las bandas de alta frecuencia, su alcance sigue siendo limitado en comparación con las bandas de baja frecuencia.

### 3.2.3.3 Banda n40 (2,4 GHz)

Según se menciona en (CASTILLA GARCÍA, 2018, pág. 5), en España se realizó la reserva del espectro de 20 MHz en la banda n40 de 2370 2380 MHz, con la finalidad de hacer uso de estas bandas para la implementación de redes 5G en diversos usos, debido a la ventajas que ofrece esta banda:

- Mayor capacidad de datos, lo que la hace ideal para entornos con alta densidad de usuarios o en áreas urbanas congestionadas.
- Mejora de la eficiencia espectral, lo que significa que puede manejar más tráfico de datos con menos espectro, lo que es beneficioso para los operadores de red.
- Compatibilidad global: La banda n40 es ampliamente aceptada a nivel mundial, lo que la hace compatible con una variedad de dispositivos y equipos de red en diferentes regiones.

Por otro lado, también existen inconvenientes como:

- Alcance limitado en comparación con frecuencias más bajas, lo que significa que es más adecuada para despliegues en áreas densamente pobladas en lugar de áreas rurales o suburbanas.
- Las frecuencias más altas, como la banda n40, tienden a tener una menor capacidad de penetración de señal a través de paredes y otros obstáculos.
- Debido a su menor alcance, puede requerir una infraestructura de red más densa, lo que puede aumentar los costos de implementación y mantenimiento para los operadores.

### 3.2.3.4 Banda n78 (3,5 GHz)

Varios autores como (DE LEÓN, 2023) o (DELGADO, 2020), coinciden que la frecuencia de 3,5 GHz se considera una de las principales frecuencias para la tecnología 5G cuenta con las siguientes ventajas:

- Mayor capacidad: La frecuencia de 3,5 GHz tiene una mayor capacidad para transportar datos en comparación con frecuencias más bajas. Esto permite una mayor velocidad y capacidad de carga para los usuarios de 5G.
- Rango medio: La frecuencia de 3,5 GHz ofrece un equilibrio entre el alcance y la capacidad de penetración de señal. Puede cubrir distancias más largas que las frecuencias más altas, pero aun así proporciona velocidades de datos significativas.

- Disponibilidad de espectro: En muchos países, la frecuencia de 3,5 GHz está disponible para su uso en redes 5G. Esto facilita la implementación de esta tecnología en diferentes regiones.

Aunque también existen inconvenientes como:

- Alcance limitado: Aunque la frecuencia de 3,5 GHz tiene un alcance mejorado en comparación con frecuencias más altas, aún tiene un alcance más limitado en comparación con frecuencias más bajas. Esto significa que se requiere una mayor densidad de estaciones base para brindar una cobertura adecuada en áreas rurales o de baja densidad de población.
- Interferencia: La frecuencia de 3,5 GHz puede verse afectada por obstáculos físicos, como edificios y árboles. Esto puede provocar pérdida de señal y degradación de la calidad de la conexión en entornos urbanos o densamente poblados.
- Costos de implementación: Debido a las características de alcance limitado, la implementación de redes 5G en la frecuencia de 3,5 GHz puede requerir una inversión significativa en infraestructura, como antenas adicionales y estaciones base.

### **3.3 Parámetros de calidad y disponibilidad de radiofrecuencia**

Teniendo en cuenta las normas IMT-2020 (M.2150-1, 2020), en los países mencionados anteriormente que ya cuentan con redes 5G de manera comercial, han utilizado ciertos criterios para determinar los parámetros de evaluación de calidad y disponibilidad de radiofrecuencia en una red 5G SA:

#### **3.3.1 Cobertura**

La red 5G SA debe garantizar una cobertura amplia y confiable en todas las áreas geográficas. Esto implica evaluar la intensidad de la señal y la capacidad de penetración en edificios y áreas rurales como fue el caso de las redes implementadas en Alemania (LAROCCA, 2023).

#### **3.3.2 Latencia**

: La latencia es el tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde el origen hasta el destino. En una red 5G SA, se espera una baja latencia, de 1 ms o inferior, para admitir aplicaciones en tiempo real, como juegos en línea e incluso telecirugía y telemedicina como se quiere hacer en Argentina (ENACOM, 2020).

### 3.3.3 Velocidad de conexión:

La velocidad de conexión es uno de los parámetros más importantes en una red 5G SA. Se evalúa la velocidad de carga descarga de datos para garantizar una experiencia de usuario rápida y fluida como se quiere realizar en Chile (INFORME RESULTADO DE LOS CONCURSOS PÚBLICOS 5G, 2021).

## 3.4 Parámetros evaluables en ambiente de laboratorio

Implementar una red 5G SA en ambiente de laboratorio sirve para evaluar los parámetros mencionados anteriormente, sin embargo, existen una serie de limitantes debido a la configuración de la red y a la baja cantidad de dispositivos que conectan, a continuación, se describe la metodología utilizada.

### 3.4.1 Toma de mediciones

Para realizar mediciones, la antena ANT-120-008 al ser omnidireccional debería proporcionar cobertura en todas las direcciones, sin embargo, se presupone que cobertura en el laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas del Modular de Electrónica de la FIE está limitada debido a su distribución. Por lo tanto, se ha planificado un recorrido específico comenzando desde un punto de referencia de 0 grados, como se muestra en la Ilustración 3-1. Este recorrido consideró distancia y movilidad del celular respecto a la USRP B210, comenzando a 1 metro se realizaron mediciones cada 45 grados hasta volver al punto de partida, la distancia se aumentó en un metro y se repitió el procedimiento hasta alcanzar los 5 metros de distancia abarcando así la totalidad del área del laboratorio y parte de las instancias contiguas.

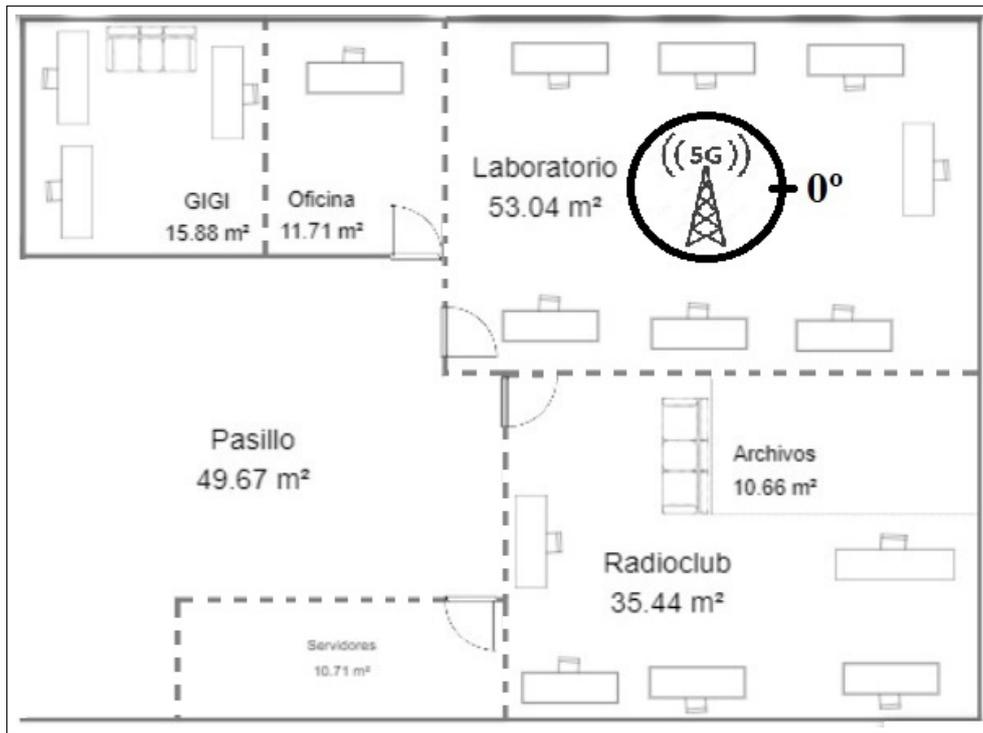
#### 3.4.1.1 Cobertura

- Para llevar a cabo las mediciones, se utilizó una aplicación que proporciona datos cruciales como SS-RSRP, SS-RSRQ y SINR, permitiendo así evaluar la red en función de los umbrales establecido para 5G vistos en la Tabla 3-10

**Tabla 3-10:** Umbrales para RSRP, RSRQ y SINR.

Nivel de señal	SS-RSRP	SS-RSRQ	SINR
Excelente	$\geq -80$	$\geq -10$	$\geq 20$
Bueno	-80 a -90	-10 a -15	13 a 20
Aceptable	-90 a -100	-15 a -20	0 a 13
Malo	$\leq -100$	$\leq -20$	$\leq 0$

**Fuente:** (GUERREO PINEDA et al., 2022)



**Ilustración 3-1:** Plano del laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

- Como aplicaciones se emplearon: Network Cell Info Lite y Cellular-Pro Play, que pueden proporcionar los datos mencionados anteriormente con la intención de contrastar información y ser más eficientes en la evaluación de resultados.

#### 3.4.1.2 Velocidad de transmisión

- Metodología: Para medir la tasa de transmisión se utilizó el mismo recorrido que sirvió para medir la cobertura, sin embargo, también se puede calcular de manera
- La aplicación para medir la velocidad de transmisión es Speedtest, utilizada ampliamente a nivel mundial porque se puede encontrar de manera gratuita y ofrece resultados fiables de las mediciones.

#### 3.4.1.3 Latencia

- Para evaluar este parámetro basta con ejecutar una prueba de ping hacia el gateway de la red.
- Existe una aplicación para Android llamada Ping, con la que se pudo medir latencia en cada uno de los puntos requeridos, esta aplicación es muy útil debido a que obtiene de manera automática un promedio en milisegundos de todos los valores medidos.

### 3.5 Implementación de la red 5G SA

Para el despliegue de la red 5G SA se necesitaron configurar tres elementos importantes, el núcleo de la red (Core open5gs), la Estación base (gNB) y el Equipo de usuario (User equipment). El entorno donde se desplegó la red fue el laboratorio de Comunicaciones Inalámbricas de la FIE utilizando el software de código abierto srsRAN donde se puede encontrar diversas configuraciones dependiendo del tipo de proyecto que se quiera realizar, en la Ilustración 3-2, se puede visualizar el esquema de la red.

Requerimientos de hardware:

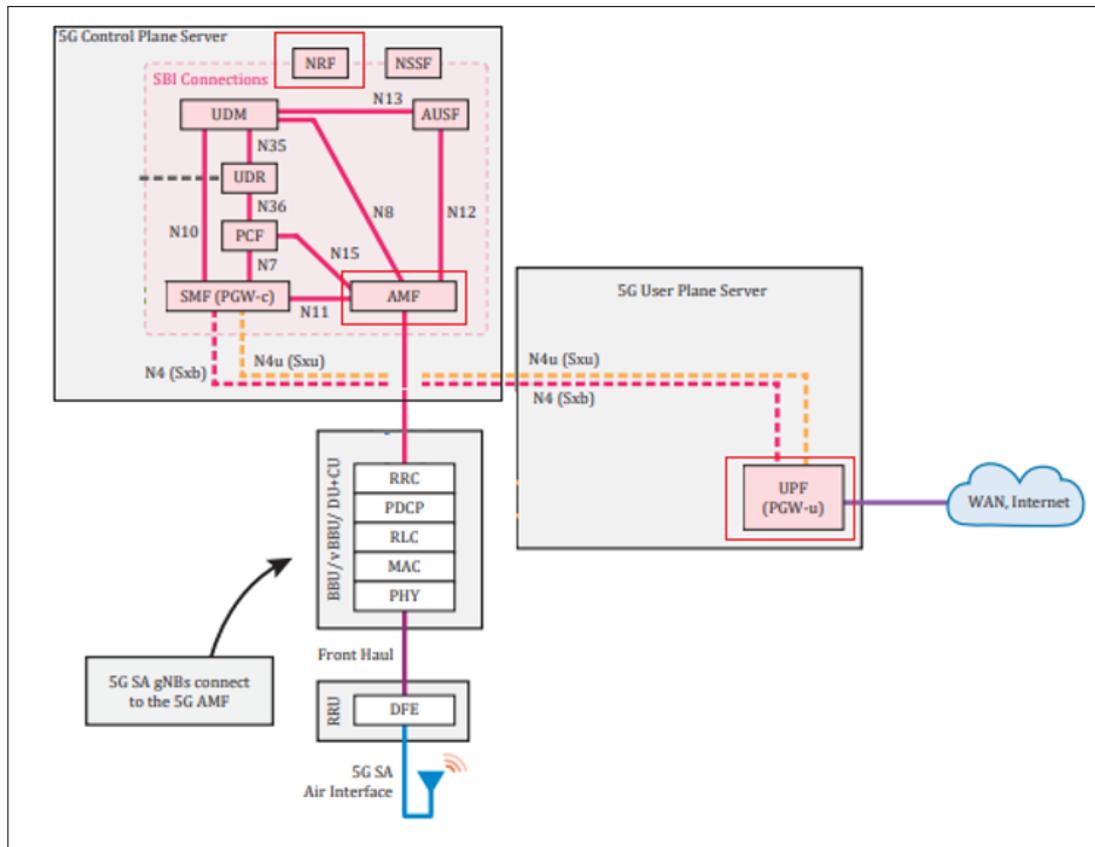
- PC Toshiba Satellite Intel(R) Core(TM) i5-6200U a 2.30GHz, RAM 8GB y Disco Sólido 256 GB
- SDR compatible (B200-mini USRP corriendo sobre USB3)
- Antena proxicast ANT-120-008
- UE con capacidad 5G SA (Redmi Note 12 Pro 5G)
- Smart Card Reader y USIM/tarjeta SIM (USIM Sysmocom)
- Analizador de espectros DEVICER E8000A

Requerimientos de software:

- Ubuntu Jammy 22.04
- Núcleo 5G (Open5GS)
- Estación base (srsRAN Project)
- Network Cell Info Lite para Android
- Speedtest para Android
- Ping para Android

En un principio, es esencial realizar la instalación y construcción del núcleo y luego verificar el correcto funcionamiento de cada una de las funciones de red. Posteriormente, se procedió a la configuración del nodo de banda general (gNB); es fundamental asegurarse de que las funciones

del núcleo estén operativas antes de activar el gNB, para que la red funcione correctamente, permitiendo posteriormente la conexión del equipo de usuario (UE).



**Ilustración 3-2:** Diagrama general de la red 5G SA

Fuente: SRSRAN, 2019

### 3.5.1 Instalación núcleo de la red

Para el funcionamiento de la red fue necesario instalar el núcleo (Open5Gs). Se trata de una implementación de código abierto en lenguaje C, existen dos maneras para instalar el núcleo, por medio de la construcción desde las fuentes o utilizando la guía rápida, en este caso se optó por utilizar la primera opción al ser más completa.

#### 3.5.1.1 Prerrequisitos para la instalación del núcleo

Existen algunos pasos previos antes que se deben realizar antes de la instalación del núcleo. Uno de ellos es la instalación de gnupg, que es una herramienta para el cifrado de datos y autenticación de llaves digitales que sirvió para verificar la autenticidad de los paquetes de descarga de la base de datos MongoDB obtenidos mediante el comando curl desde la página del servidor <https://pgp.mongodb.com>. MongoDB se trata de una base de datos NoSQL para el manejo de

datos no estructurales donde se almacenan datos de funciones muy importantes del núcleo como NRF/PCF/UDR.

Otro de los elementos es el dispositivo TUN que proporciona recepción y transmisión de paquetes para programas de espacio de usuario. Puede ser interpretado como un dispositivo básico de Punto-a-Punto o Ethernet que, en vez de recibir paquetes a través de medios físicos, los recibe desde la aplicación en el espacio de usuario, y en lugar de enviar paquetes a través de medios físicos, los transmite al programa en el espacio de usuario, en este caso se creó la interfaz y se añadieron las direcciones ipv4 e ipv6 correspondientes con los comandos vistos en la Ilustración 3-3. Para conocer el procedimiento completo de los pasos previos consultar el Anexo B.

```
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~$  
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~$ sudo ip tuntap add name ogstun mode tun  
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~$ sudo ip addr add 10.45.0.1/16 dev ogstun  
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~$ sudo ip addr add 2001:db8:cafe::1/48 dev ogstun  
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~$ sudo ip link set ogstun up  
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~$
```

**Ilustración 3-3:** Comandos ogs tun.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

### 3.5.1.2 Construcción del núcleo

Una vez realizados los pasos previos correspondientes, se procedió a instalar las dependencias para construir el código desde la fuente con el comando visualizado en la Ilustración 3-4.

Después se procedió a clonar el núcleo como tal desde la URL del repositorio hacia el directorio principal, si se ejecutó bien aparece un proceso de descarga tal como se ve en la Ilustración 3-5 el cual se debe esperar a que se complete al 100 %.

Seguido se realizó la compilación de los archivos y los test de comprobación, tal como se muestra en la Ilustración 3-6, que indican si el proceso de instalación fue correcto, también se recomienda contar con memoria RAM de al menos 4 GB. El procedimiento completo se indica en el Anexo B.

```
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~$ sudo apt install python3-pip python3-setuptools p  
ython3-wheel ninja-build build-essential flex bison git cmake libsctp-dev libgnu  
tls28-dev libgcrypt-dev libssl-dev libidn11-dev libmongoc-dev libbson-dev libyam  
l-dev libnghttp2-dev libmicrohttpd-dev libcurl4-gnutls-dev libnghttp2-dev libtin  
s-dev libtalloc-dev meson
```

**Ilustración 3-4:** Comando para la instalación de las dependencias.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

```
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~$ git clone http://github.com/open5gs/open5gs
Clonando en 'open5gs'...
warning: redirigiendo a https://github.com/open5gs/open5gs/
remote: Enumerating objects: 83238, done.
remote: Counting objects: 100% (1182/1182), done.
remote: Compressing objects: 100% (502/502), done.
Recibiendo objetos: 11% (9177/83238), 8.92 MiB | 1.61 MiB/s
```

**Ilustración 3-5:** Comando para clonar el núcleo.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

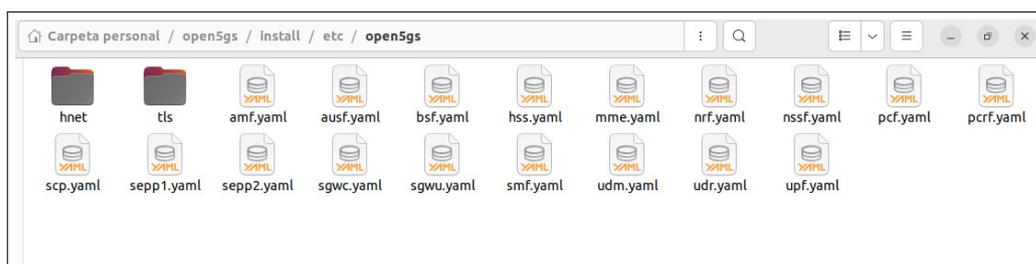
```
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~/open5gs$ cd build
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~/open5gs/build$ meson test -v
ninja: Entering directory `/home/byron/open5gs/build'
ninja: no work to do.
1/13 open5gs:unit / core RUNNING
>>> MALLOC_PERTURB_=232 /home/byron/open5gs/build/tests/core/core
list-test : SUCCESS
pool-test : SUCCESS
strings-test : SUCCESS
time-test : SUCCESS
conv-test : SUCCESS
log-test : SUCCESS
pkbuf-test : SUCCESS
memory-test : SUCCESS
rbtree-test : SUCCESS
timer-test : SUCCESS
thread-test : SUCCESS
socket-test : SUCCESS
queue-test : SUCCESS
poll-test : SUCCESS
tlv-test : SUCCESS
fsm-test : SUCCESS
hash-test : SUCCESS
```

**Ilustración 3-6:** Comprobación de la instalación del núcleo.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

### 3.5.1.3 Modificación de las funciones del núcleo

Una vez instalado el núcleo correctamente se crearon 17 archivos que corresponden a las 17 funciones de red del núcleo localizados en el directorio correspondiente, en la Ilustración 3-7 se puede apreciar la ubicación de dichos archivos.



**Ilustración 3-7:** Archivos del núcleo.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

Los principales archivos que se deben ser modificados son el NRF (Función de repositorio de red), AMF (Función de gestión de acceso y la movilidad) y UPF (Función del plano de usuario), dentro de cada uno de estos existen ciertos parámetros que deben ser modificados.

IP NGAP (Protocolo de aplicación de nueva generación) se trata de un protocolo de la capa de aplicación encargado de la comunicación entre el gNB y el AMF. PLMN ID (Identificador de red móvil terrestre pública) es una combinación de MCC (Código del país móvil) y MNC (Código de red móvil), tiene valor único y es utilizado globalmente para identificar la red móvil a la que un usuario está suscrito y TAC que simplemente informa al usuario la cantidad de tiempo necesaria para adelantar las transmisiones de uplink. A continuación, se muestran los cambios de manera más específica:

- NRF

En este archivo se deben cambiar solamente el PLMN en este caso será 00101 que es el que se suele utilizar para el testeo de redes, en la Ilustración 3-8 se puede apreciar de mejor manera.

- AMF

En este archivo es donde se deben realizar la mayor parte de los cambios, para la IP NGAP se utilizó la dirección 127.0.1.100, para el PLMN se utilizó el mismo código que para el NRF en las tres secciones donde se requiere y un TAC de 7, en la Ilustración 3-9 se aprecia de mejor manera dichos cambios.

```
1 logger:
2   file: /home/byron/open5gs/install/var/log/open5gs/nrf.log
3 # level: info # fatal|error|warn|info(default)|debug|trace
4
5 global:
6   max:
7     ue: 1024 # The number of UE can be increased depending on memory size.
8     peer: 64
9
10 nrf:
11   serving: # 5G roaming requires PLMN in NRF
12     - plmn_id:
13       mcc: 001
14       mnc: 01
15
16 sbi:
17   server:
18     - address: 127.0.0.10
19     port: 7777
```

**Ilustración 3-8:** Configuración del archivo NRF.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

```
1 logger:
2   file: /home/byron/open5gs/install/var/log/open5gs/amf.log
3   # level: info # fatal|error|warn|info(default)|debug|trace
4
5 global:
6   max:
7     ue: 1024 # The number of UE can be increased depending on memory size.
8     peer: 64
9
10 amf:
11   sbt:
12     server:
13       - address: 127.0.0.5
14       port: 7777
15     client:
16 #     nrf:
17 #       - uri: http://127.0.0.10:7777
18     scp:
19       - uri: http://127.0.0.200:7777
20   ngap:
21     server:
22       - address: 127.0.1.100 ←
23   metrics:
24     server:
25       - address: 127.0.0.5
26       port: 9090
27   guami:
28     - plmn_id:
29       mcc: 001 ←
30       mnc: 01
31       amf_id:
32         region: 2
33         set: 1
34   tai:
35     - plmn_id:
36       mcc: 001 ←
37       mnc: 01
38       tac: 7 ←
39   plmn_support:
40     - plmn_id:
41       mcc: 001 ←
42       mnc: 01
43     s_nssai:
44       - sst: 1
```

**Ilustración 3-9:** Configuración del archivo AMF.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

- UPF

En este archivo solamente se debe cambiar la IP NGAP, en este caso también es 127.0.1.100 para que coincida con tanto con la dirección del NRF como la del AMF, en la Ilustración 3-10 se aprecian estos cambios.

```
17 gtpu:
18   server:
19     - address: 127.0.1.100 ←
20   session:
21     - subnet: 10.45.0.1/16
22     - subnet: 2001:db8:cafe::1/48
23   metrics:
24     server:
25       - address: 127.0.0.7
26       port: 9090
27
```

**Ilustración 3-10:** Configuración del archivo UPF.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

### 3.5.1.4 Ejecución de las funciones del núcleo

Para la ejecución de las funciones del núcleo se recomienda seguir el orden que aparece en el Anexo B, para esto es necesario entrar al directorio donde se encuentran ubicados los archivos y ejecutarlos mediante consola, para trabajar de mejor manera, dentro de una misma ventana se pueden abrir varias pestañas de ir ejecutando una por una las funciones, los comandos son los siguientes que se muestran a continuación:

- `./install/bin/open5gs-nrfd`
- `./install/bin/open5gs-scpd`
- `./install/bin/open5gs-seppd -c ./install/etc/open5gs/sepp1.yaml`
- `./install/bin/open5gs-amfd`
- `./install/bin/open5gs-smfd`
- `./install/bin/open5gs-upfd`
- `./install/bin/open5gs-ausfd`
- `./install/bin/open5gs-udmd`
- `./install/bin/open5gs-pcfd`
- `./install/bin/open5gs-nssfd`
- `./install/bin/open5gs-bsfd`
- `./install/bin/open5gs-udrd`
- `./install/bin/open5gs-mmed`
- `./install/bin/open5gs-sgwcd`
- `./install/bin/open5gs-sgwud`
- `./install/bin/open5gs-hssd`
- `./install/bin/open5gs-prcfd`

Si se realizó de manera correcta aparece un mensaje donde se indica que se inició correctamente, en este caso, en la Ilustración 3-11 se puede apreciar la inicialización del AMF.

```

byron@byron-SATELLITE-L50-C: ~$ cd openSgs/
byron@byron-SATELLITE-L50-C: ~/openSgs$ ./install/bin/openSgs-amfd
OpenSgs daemon v2.6.4-68-g782e2ac

08/08 17:48:14.810: [app] INFO: Configuration: '/home/byron/openSgs/install/etc/openSgs/amf.yaml' (../lib/app/ogs-intl.c:126)
08/08 17:48:14.810: [app] INFO: File Logging: '/home/byron/openSgs/install/var/log/openSgs/amf.log' (../lib/app/ogs-intl.c:129)
08/08 17:48:14.810: [net] INFO: metrics_server() [http://127.0.0.1:9090] (../lib/metrics/prometheus/context.c:299)
08/08 17:48:14.810: [net] INFO: NF Service [namf-comm] (../lib/sbi/context.c:1438)
08/08 17:48:14.810: [net] INFO: nhttp2_server() [http://127.0.0.1:7777] (../lib/sbi/nhttp2-server.c:395)
08/08 17:48:14.810: [net] INFO: nnao_server() [127.0.0.1:38412] (../src/amf/nao-sctp.c:61)
08/08 17:48:14.820: [sctp] INFO: AMF initialize...done (../src/amf/app.c:33)

```

### Ilustración 3-11: Inicialización del AMF

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

El mensaje será parecido para el resto de los procesos, pero para corroborar que todos los procesos se están ejecutando al mismo tiempo existe un comando para verificarlo el cual se muestra en la Ilustración 3-12.

```

byron@byron-SATELLITE-L50-C: ~$ ps aux | grep openSgs
byron 4689 0.0 0.1 132180 11904 pts/0 S1+ 17:13 0:00 ./install/bin/openSgs-nrfd
byron 4699 0.0 0.1 132676 12544 pts/1 S1+ 17:14 0:00 ./install/bin/openSgs-scpd
byron 4726 0.0 0.1 133344 12160 pts/2 S1+ 17:14 0:00 ./install/bin/openSgs-seppd -c ./install/etc/openSgs/sepp1.yaml
byron 4735 0.0 1.7 1730188 148416 pts/3 S1+ 17:14 0:00 ./install/bin/openSgs-amfd
byron 4751 0.0 0.5 2663448 46880 pts/4 S1+ 17:14 0:00 ./install/bin/openSgs-smfd
byron 4798 0.0 0.1 282360 12780 pts/5 S1+ 17:14 0:00 ./install/bin/openSgs-upfd
byron 4808 0.0 0.1 133556 13184 pts/6 S1+ 17:14 0:00 ./install/bin/openSgs-ausfd
byron 4817 0.0 0.1 140108 14720 pts/7 S1+ 17:14 0:00 ./install/bin/openSgs-udmd
byron 4829 0.0 0.2 186224 18048 pts/8 S1+ 17:14 0:00 ./install/bin/openSgs-pcfd
byron 4840 0.0 0.1 131804 12160 pts/9 S1+ 17:14 0:00 ./install/bin/openSgs-nssf
byron 4849 0.0 0.1 139180 18112 pts/10 S1+ 17:14 0:00 ./install/bin/openSgs-bsfd
byron 4861 0.0 0.2 170196 18432 pts/11 S1+ 17:15 0:00 ./install/bin/openSgs-udrd
byron 4871 0.0 0.1 2387232 14464 pts/12 S1+ 17:15 0:00 ./install/bin/openSgs-mmed
byron 4916 0.0 0.1 263608 13952 pts/13 S1+ 17:15 0:00 ./install/bin/openSgs-gwcd
byron 4926 0.0 0.2 252328 17024 pts/14 S1+ 17:15 0:00 ./install/bin/openSgs-gwud
byron 4937 0.0 0.1 2414908 14848 pts/15 S1+ 17:15 0:00 ./install/bin/openSgs-hssd
byron 4990 0.0 0.1 2413388 14592 pts/16 S1+ 17:15 0:00 ./install/bin/openSgs-pcrfd
byron 13936 0.0 0.0 11848 2560 pts/20 S+ 17:31 0:00 grep --color=auto openSgs
byron@byron-SATELLITE-L50-C: ~$

```

### Ilustración 3-12: Procesos del core.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

#### 3.5.1.5 Construcción del webUI

WebUI sirve para registrar a los usuarios que van a navegar en la red 5G, para ello es necesario el registro de algunos códigos únicos que se encuentran en las tarjetas SIM, que se explican más adelante. Para la creación del WebUI es necesario instalar Node.js, un entorno para crear sitios web dinámicos para su instalación basta con ejecutar unos comandos para descargar e importar la llave de cifrado GPG de NoderSource, configurar el repositorio de paquetes e instalar Node.js en Ubuntu. En la Ilustración 3-13 se puede ver el proceso de instalación.

Después se debe instalar las dependencias para ejecutar el WebUI como un script npm, si se realizó correctamente se debió crear la interfaz en la dirección local 127.0.0.1:3000, tal como se muestra en la Ilustración 3-14. Para ingresar es necesario un usuario y contraseña que vienen por defecto.

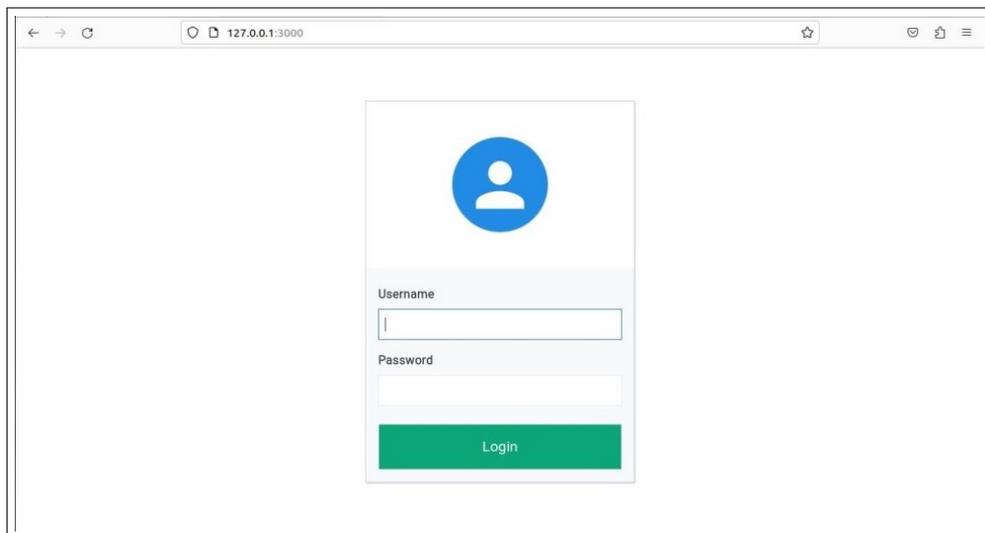
Finalmente para registrar un nuevo usuario se debe dar clic en añadir y rellenar los campos solicitados, los más importantes como se puede ver en la Ilustración 3-15 son el IMSI (Identidad internacional de abonado móvil), el K (Clave de abonado) y el OPC (Código del operador), estos

mismos códigos deben ser introducidos al hora de realizar la programación de la tarjeta SIM, el resto de datos se pueden dejar por defecto.

```
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~/open5gs$ curl -fsSL https://deb.nodesource.com/setup_18.x | sudo -E bash -  
  
## Installing the NodeSource Node.js 18.x repo...  
  
## Populating apt-get cache...  
  
+ apt-get update  
Obj:1 http://security.ubuntu.com/ubuntu jammy-security InRelease  
Obj:2 http://ec.archive.ubuntu.com/ubuntu jammy InRelease  
Obj:3 http://ec.archive.ubuntu.com/ubuntu jammy-updates InRelease  
Obj:4 http://ec.archive.ubuntu.com/ubuntu jammy-backports InRelease  
Ign:5 https://repo.mongodb.org/apt/ubuntu jammy/mongodb-org/6.0 InRelease  
Obj:6 https://repo.mongodb.org/apt/ubuntu jammy/mongodb-org/6.0 Release  
Leyendo lista de paquetes... Hecho
```

**Ilustración 3-13:** Configuración del WebUI.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.



**Ilustración 3-14:** Interfaz WebUI.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

Subscriber Configuration

IMSI\*  
001010000000005

+

Subscriber Key (K)\*: fec86ba6eb707ed08905757b1bb44b8f  
Authentication Management Field (AMF)\*: 8000

USIM Type: OPc  
Operator Key (OPc/OP)\*: C42449363BBAD02B66D16BC975D77CC1

UE-AMBR Downlink\*: 1  
Unit: Gbps  
UE-AMBR Uplink\*: 1  
Unit: Gbps

**Ilustración 3-15:** Datos del usuario.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

### 3.5.2 Instalación de srsRAN Project

srsRAN Project es una plataforma muy completa para el ámbito de la investigación y desarrollo de comunicaciones inalámbricas, para su correcto funcionamiento previamente se deben instalar unas dependencias con un solo comando visto en la Ilustración 3-16.

```
byron@byron-SATELLITE-L50-C: $ sudo apt-get install cmake make gcc g++ pkg-config libfftw3-dev libmbedtls-dev libsctp-dev libyaml-cpp-dev libg
test-dev
[sudo] contraseña para byron:
Leyendo lista de paquetes... Hecho
Creando árbol de dependencias... Hecho
Leyendo la información de estado... Hecho
```

**Ilustración 3-16:** Dependencias de srsRAN Project.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

Después se debe clonar del repositorio, de manera similar a como se hizo previamente con el núcleo con el comando git clone y la URL del repositorio, una vez clonado se debe construir el código base y realizar unos tests que verifican su correcta instalación como se muestra en la Ilustración 3-17. Se puede consultar este procedimiento más detallada en el Anexo C.

```
security          = 0.84 sec*proc (46 tests)
serdes            = 0.39 sec*proc (46 tests)
support          = 0.70 sec*proc (32 tests)
transmitter      = 1.35 sec*proc (29 tests)
tsan             = 3.63 sec*proc (13 tests)
vectortest       = 0.04 sec*proc (4 tests)
Total Test time (real) = 153.78 sec
byron@byron-SATELLITE-L50-C: ~/srsRAN_Project/build$
```

**Ilustración 3-17:** Test de instalación srsRAN Project.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

#### 3.5.2.1 Configuración del gNB

El gNB se configuró en base a un ejemplo que se encuentra en el directorio /home/byron/srsRAN\_Project/configs, esta ubicación varía dependiendo de donde se instaló srsRAN Project, a dicho ejemplo se realizó algunas modificaciones:

- Establecer la dirección AMF dentro de rango adecuado, en este caso se utilizó 127.0.1.100 al igual que en los procesos del núcleo anteriores.
- Establecer el ARFCN (Número absoluto de canal de radiofrecuencia) de la célula según la banda correspondiente, en este caso para la banda n78 es el código 632628.
- El PLMN debe ser 00101 para que corresponda al MCC y MNC establecido en las funciones del núcleo configuradas anteriormente.

Las modificaciones anteriores se pueden visualizar de mejor manera en la Ilustración 3-18.

```

6
7 anf:
8   addr: 127.0.1.100
9   bind_addr: 127.0.0.1
10
11 ru_sdr:
12   device_driver: uhd
13   device_args: type=b200,num_recv_frames=64,num_send_frames=64
14   clock: internal
15   sync:
16   srate: 23.04
17   otw_format: sc12
18   tx_gain: 80
19   rx_gain: 40
20
21 cell_cfg:
22   dl_arfcn: 632628
23   band: 78
24   channel_bandwidth_MHz: 20
25   common_scs: 30
26   plmn: "00101"
27   tac: 7
28   pct: 1
29
30 -----

```

**Ilustración 3-18:** Configuración del gNB.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

Para activar la red se debe entrar mediante línea de comandos al directorio donde se encuentra en gNB y llamar al archivo configurado previamente, cabe recalcar que la antena ANT-120-008 debe estar conectada a la URSP B210 y esta a su vez a la laptop Toshiba mediante cable USB 3.0. Si se realizó de manera correcta se debe mostrar un mensaje de activación del gNB mostrado en la Ilustración 3-19.

```

byron@byron-SATELLITE-L50-C: ~/srsRAN_Project/build/apps/gnb
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~/srsRAN_Project/build/apps/gnb$ sudo gnb -c /home/byron/srsRAN_Project/configs/gnb_n78_Redmi_note_12_tdd.yml
The PRACH detector will not meet the performance requirements with the configuration {Format B4, ZCZ 0, SCS 30kHz, Rx ports 1}.
Lower PHY in dual executor mode.

=== srsRAN gNB (commit 55c984b55) ===

Connecting to AMF on 127.0.1.100:38412
Available radio types: uhd.
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 11.4.0; Boost 107400; UHD_4.6.0-0ubuntu1-jammy1
[INFO] [LOGGING] Fastpath logging disabled at runtime.
Making USRP object with args 'type=b200,num_recv_frames=64,num_send_frames=64'
[INFO] [B200] Detected device: B210
[INFO] [B200] Operating over USB 3.
[INFO] [B200] Initialize CODEC control...
[INFO] [B200] Initialize Radio control...
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Setting master clock rate selection to 'automatic'.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 16.000000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 16.000000 MHz.
[INFO] [MULTI_USRP] Setting master clock rate selection to 'manual'.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 23.040000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 23.040000 MHz.
Cell pct=1, bw=20 MHz, dl_arfcn=632628 (n78), dl_freq=3489.42 MHz, dl_ssb_arfcn=632256, ul_freq=3489.42 MHz

=== gNodeB started ===
Type <^> to view trace

```

**Ilustración 3-19:** Activación de la red.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

### 3.5.3 Programación de la tarjeta SIM

Para realizar la programación de la tarjeta SIM hicieron falta el equipo SMART CARD READER y una tarjeta SIM sysmocom con capacidad para 5G como se puede ver en la Ilustración 3-20.

En primer lugar, se procedió a desactivar el SUCI (Identificador oculto del abonado), un identificador que preserva la privacidad y que a su vez contiene el SUPI (Identificador permanente de suscripción)

para evitar que el usuario quede identificado de manera permanente y no ocultar la privacidad del usuario, todo esto con el fin de poder registrar un usuario más de una vez en la misma tarjeta. Para realizar este proceso primero se debe entrar al modo shell para interactuar directamente con el sistema, como se muestra en la Ilustración 3-21.



**Ilustración 3-20:** Equipos para la programación.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

```
Welcome to pySIM-shell!  
(C) 2021-2023 by Harald Welte, sysmocom - s.f.m.c. GmbH and contributors  
Online manual available at https://downloads.osmocom.org/docs/pysim/master/html/shell.html  
pySIM-shell (00:MF)> |
```

**Ilustración 3-21:** Modo shell.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

En este punto es fundamental conocer el código ADM (Administración de Dispositivos móviles) de la tarjeta SIM (estos códigos los proporciona el fabricante) y seguir los pasos correspondientes hasta desactivar los servicios 123 y 124 de la tarjeta SIM y salir del modo shell, para verificar que el servicio ha sido desactivado basta con leer nuevamente la tarjeta, en la Ilustración 3-22, se puede visualizar que han sido desactivados.

```
Service 90 - Operator CSG Lists and corresponding indications  
Service 93 - Communication Control for IMS by USIM  
Service 94 - Extended Terminal Applications  
Service 122 - 5GS Mobility Management Information  
Service 123 - 5G Security Parameters  
Service 126 - UAC Access Identities support
```

**Ilustración 3-22:** Servicios desactivados.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

Finalmente, se debe programar la tarjeta con los mismos códigos (IMSI, K y OPc) utilizados en la configuración del WebUI vista anteriormente en la configuración del núcleo, en la Ilustración 3-23 se visualiza el resultado de la programación. Para conocer con más detalle el procedimiento tanto de la desactivación del servicio SUCI como de la programación de la tarjeta SIM consultar el Anexo D.

```
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~/pysim$ ./pySim-prog.py -p 0 -t sysmoISIM-SJA2 -a 27022526 -n ESPOCH5GSA -x 001 -y 01 -l 00101000000005 -s 89882
11000000722382 --opc C42449363BBAD02B66D16BC975D77CC1 -k fec86ba6eb707ed08905757b1bb44b8f --acc 0004
Warning: Ignoring XDG_SESSION_TYPE=wayland on Gnome. Use QT_QPA_PLATFORM=wayland to run on Wayland anyway.
Using PC/SC reader number 0
Ready for Programming: Insert card now (or CTRL-C to cancel)
Generated card parameters :
> Name      : ESPOCH5GSA
> SHSP     : e1ffffffffffffffffffff0581005155f5ffffffffffff000000
> ICCID    : 8988211000000722382
> MCC/MNC  : 001/01
> IMSI     : 001010000000005
> Ki       : fec86ba6eb707ed08905757b1bb44b8f
> OPC      : C42449363BBAD02B66D16BC975D77CC1
> ACC      : 0004
> ADM1(hex): 3237303232353236
> OPMODE   : None
Programming ...
Warning: Programming of the ICCID is not implemented for this type of card.
Programming successful: Remove card from reader
```

**Ilustración 3-23:** Tarjeta programada correctamente.

**Realizado por:** Mayorga, B.,2024.

### 3.5.4 Configuración del equipo de usuario

Un vez programada la tarjeta SIM se debe insertar en la bandeja del teléfono y asegurarse que lo reconoce, tal como se muestra en la Ilustración 3-24.

Después se establecieron algunos ajustes, para el caso concreto del celular Redmi Note 12 Pro 5G se realizó la activación del modo SA, para ello se marcó el código ##726633##, seguidamente en los ajustes se activó el roaming de datos internacional y también se desactivo la opción de VoLTE, en la Ilustración 3-25 se pueden ver todos estos ajustes.

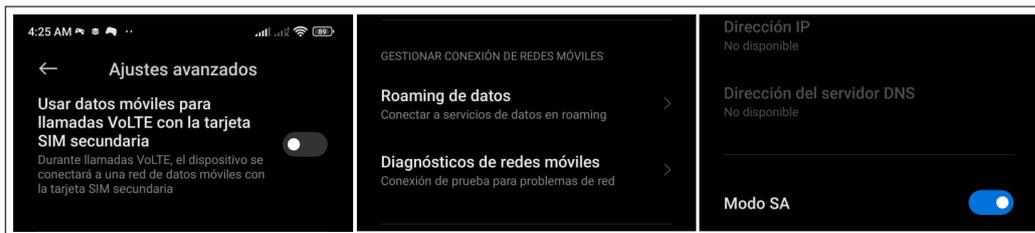
En el siguiente paso, se debe configurar el APN, en el nombre se puede establecer cualquiera, en este caso se puso 5G, pero el APN option debe coincidir con el APN establecido en el registro del WebUI y de preferencia se debe establecer tanto el protocolo APN como el protocolo APN en itinerancia para que trabaje con direcciones ipv4, los demás parámetros se pueden dejar por defecto, en la Ilustración 3-26 se pueden ver esos ajustes.

Finalmente se debe enganchar el celular a la red que ha sido activada previamente, para realizarlo se debe desactivar la búsqueda automática para buscar la red de manera manual, cuando aparezca la red se debe seleccionar, en la Ilustración 3-27 se muestra que el celular se ha enganchado a la red correctamente.



**Ilustración 3-24:** UE reconociendo la tarjeta SIM.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.



**Ilustración 3-25:** Ajustes previos a la conexión del UE.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.



**Ilustración 3-26:** Configuración del APN del UE.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.



**Ilustración 3-27:** Conexión del UE a la red 5G.  
 Realizado por: Mayorga, B.,2024.

Otra forma de saber que el celular se ha enganchado a la red es verificando en la consola donde está corriendo el proceso del AMF correspondiente al núcleo, en la Ilustración 3-28 se muestra el mensaje inicial de UE que indica el comienzo del proceso, en la siguiente línea indica que un UE de la gNB está activo, en este punto al estar desactivado el SUCI, ya no se cifran los datos de usuario y se puede visualizar que el SUCI sigue siendo el mismo IMSI programado en la tarjeta SIM previamente, después se muestra una solicitud de registro por parte de este mismo código para después indicar que el registro ha sido completado satisfactoriamente.

```

02/23 17:33:22.960: [amf] INFO: InitialUEMessage (./src/amf/ngap-handler.c:401)
02/23 17:33:22.960: [amf] INFO: [Added] Number of gNB-UEs is now 1 (./src/amf/context.c:2550)
02/23 17:33:22.960: [amf] INFO: Unknown UE by 5G-S TMSI[AMF_ID:0x20000,M_TMSI:0xc0000129] (./src/amf/ngap-handler.c:479)
02/23 17:33:22.960: [amf] INFO: RAN_UE_NGAP_ID[0] AMF_UE_NGAP_ID[4] TAC[7] CellID[0x19b0] (./src/amf/ngap-handler.c:562)
02/23 17:33:22.960: [amf] INFO: [sucti-0-001-01-0-0-0-0000000005] Known UE by 5G-S TMSI[AMF_ID:0x20040,M_TMSI:0xc0000129] (./src/amf/context.c:1849)
02/23 17:33:22.961: [gmm] INFO: Registration request (./src/amf/gmm-sm.c:1165)
02/23 17:33:22.961: [gmm] INFO: [sucti-0-001-01-0-0-0-0000000005] 5G-S GUTI[AMF_ID:0x20040,M_TMSI:0xc0000129] (./src/amf/gmm-handler.c:179)
02/23 17:33:23.181: [gmm] INFO: [lnst-0010100000000005] Registration complete (./src/amf/gmm-sm.c:2146)
02/23 17:33:23.181: [amf] INFO: [lnst-0010100000000005] Configuration update command (./src/amf/nas-path.c:612)
02/23 17:33:23.181: [gmm] INFO: UTC [2024-02-23T22:33:23] Timezone[0]/DST[0] (./src/amf/gmm-build.c:559)
02/23 17:33:23.181: [gmm] INFO: LOCAL [2024-02-23T17:33:23] Timezone[-18000]/DST[0] (./src/amf/gmm-build.c:564)
02/23 17:33:23.220: [gmm] INFO: Service request (./src/amf/gmm-sm.c:1283)
02/23 17:33:23.220: [gmm] INFO: [sucti-0-001-01-0-0-0-0000000005] 5G-S GUTI[AMF_ID:0x20040,M_TMSI:0xc0000353] (./src/amf/gmm-handler.c:642)
02/23 17:33:23.305: [amf] INFO: [lnst-0010100000000005:4:11][0:0:NULL] /nsmf-pdusession/v1/sm-contexts/{smContextRef}/modify (./src/amf/nsmf-handler.c:837)

```

**Ilustración 3-28:** Registro del UE en la red 5G.  
 Realizado por: Mayorga, B.,2024.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 4.1 Ejecución de la red a diferentes frecuencias

Para la ejecución de la red 5G a diferentes frecuencias existen ejemplos de configuración gNB dentro del directorio de srsRAN Project mencionado anteriormente el cual se diferencia según los equipos utilizados o el modo de duplexación (TDD o FDD). Dentro de estos archivos se cambiaron algunos parámetros según los requerimientos de la red.

- Dirección amf, debe ser la misma (127.0.1.100), para que coincida con las demás funciones del núcleo.
- ARFCN y el número de banda, para calcular este valor existen diversos sitios web. En este caso, se utilizó la página web [https://www.sqimway.com/nr\\_band.php](https://www.sqimway.com/nr_band.php) en la que, a más de tener una calculadora, presenta una tabla de bandas y ARFCNs correspondientes.
- Espaciado de subportadora, debe ser 15 KHz para FDD y 30 KHz para TDD según los archivos de configuración, se debe brindar importancia a este estos valores debido a que si se cambian no se ejecutará la red.
- PLMN, se mantendrá en 00101 al ser el más utilizado para llevar a cabo las pruebas.

##### 4.1.1 Frecuencia 780,5 MHz (n28).

Previo a la ejecución de la red se cambiaron los parámetros vistos en la Ilustración 4-1.

```
8 amf:
9   addr: 127.0.1.100
10  bind_addr: 127.0.0.1
11
12 ru_sdr:
13   device_driver: uhd
14   device_args: type=b200
15   sync: internal
16   # MHz ref.
17   srate: 23.04
18   bandwidth:
19   tx_gain: 80
20   rx_gain: 40
21
22 cell_cfg:
23   dl_arfcn: 156100
24   band: 28
25   channel_bandwidth_MHz: 20
26   common_scs: 15
27   plmn: "00101"
28   tac: 7
29
30 # The address or hostname of the AMF.
31 # A local IP that the gNB binds to for>
32
33 # The RF driver name.
34 # Optionally pass arguments to the selected RF driver.
35 # Set sync to external. This set-up uses a LEO BODNAR GPDSO providing a 10
36 # RF sample rate might need to be adjusted according to selected
37 # Transmit gain of the RF might need to adjusted to the given situation.
38 # Receive gain of the RF might need to adjusted to the given situation.
39
40 # ARFCN of the downlink carrier (center frequency).
41 # The NR band.
42 # Bandwith in MHz. Number of PRBs will be automatically derived.
43 # Subcarrier spacing in kHz used for data.
44 # PLMN broadcasted by the gNB.
45 # Tracking area code (needs to match the core configuration).
```

**Ilustración 4-1:** Configuración para la banda n28.

**Realizado por:** Mayorga, B.,2024.

Al ejecutar la red con este archivo de configuración se obtuvo resultados como se indica en la Ilustración 4-2 en la que se aprecia el ancho de banda establecido a 20 MHz, el ARFCN 156100 correspondiente al enlace de bajada en la banda n28 cuya frecuencia central es de 780,5 MHz y gNB activo exitosamente.

```

byron@byron-SATELLITE-L50-C:~/srsRAN_Project/build/apps/gnb$ sudo gnb -c /home/byron/srsRAN_Project/configs/gnb_n28_Redmi_note_12_fdd.yml
The PRACH detector will not meet the performance requirements with the configuration {Format 0, ZCZ 0, SCS 1.25kHz, Rx ports 1}.
Lower PHY in dual executor mode.

--= srsRAN gNB (commit 55c984b55) ==--

Connecting to AMF on 127.0.1.100:38412
Available radio types: uhd.
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 11.4.0; Boost_107400; UHD_4.6.0.0-0ubuntu1-jammy1
[INFO] [LOGGING] Fastpath logging disabled at runtime.
[INFO] [B200] Detected Device: B210
[INFO] [B200] Operating over USB 3.
[INFO] [B200] Initialize CODEC control...
[INFO] [B200] Initialize Radio control...
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Setting master clock rate selection to 'automatic'.
[INFO] [B200] Asking For clock rate 16.000000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 16.000000 MHz.
[INFO] [MULTI_USRP] Setting master clock rate selection to 'manual'.
[INFO] [B200] Asking For clock rate 23.040000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 23.040000 MHz.
Cell pci=1, bw=20 MHz, dl_arfcn=156100 (n28), dl_freq=780.5 MHz, dl_ssb_arfcn=156010, ul_freq=725.5 MHz

==== gNodeB started ====
Type <t> to view trace
Late: 0; Underflow: 1; Overflow: 0;
t
-----DL-----|-----UL-----
pci rnti  cqi  ri  mcs  brate  ok  nok  (%)  dl_bs  |  pusch  mcs  brate  ok  nok  (%)  bsr
1 4601  15  1  0  0  0  0%  0  |  n/a  0  0  0  0  0%  0
1 4601  15  1  0  0  0  0%  0  |  n/a  0  0  0  0  0%  0
1 4601  15  1  0  0  0  0%  0  |  n/a  0  0  0  0  0%  0
1 4601  15  1  0  0  0  0%  0  |  n/a  0  0  0  0  0%  0
1 4601  15  1  26  608  1  0  0%  0  |  15.4  23  4.5k  1  0  0%  0
1 4601  15  1  0  0  0  0%  0  |  n/a  0  0  0  0  0%  0
1 4601  15  1  26  608  1  0  0%  0  |  14.9  24  4.1k  1  0  0%  0
1 4601  15  1  26  6.1k  9  0  0%  0  |  14.7  22  26k  6  0  0%  0
1 4601  15  1  0  0  0  0%  0  |  n/a  0  0  0  0  0%  0
1 4601  15  1  26  2.4k  4  0  0%  0  |  14.6  21  17k  4  0  0%  0

```

**Ilustración 4-2:** Red operativa en la banda n28.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

### 4.1.2 Frecuencia 1842,5 MHz (n3)

Previo a la ejecución de la red se cambió algunos parámetros, como muestra la Ilustración 4-3

```

8 amf:
9   addr: 127.0.1.100
10  bind_addr: 127.0.0.1
11
12 ru_sdr:
13   device_driver: uhd
14   device_args: type=b200
15   sync: internal
16   # Hz ref.
17   srate: 23.04
18   bandwidth:
19   tx_gain: 80
20   rx_gain: 40
21
22 cell_cfg:
23   dl_arfcn: 368500
24   band: 3
25   channel_bandwidth_MHz: 20
26   common_scs: 15
27   plmn: "06101"
28   tac: 7

```

# The address or hostname of the AMF.  
# A local IP that the gNB binds to for>

# The RF driver name.  
# Optionally pass arguments to the selected RF driver.  
# Set sync to external. This set-up uses a LEO BODNAR GPDSO providing a 10

# RF sample rate might need to be adjusted according to selected

# Transmit gain of the RF might need to adjusted to the given situation.  
# Receive gain of the RF might need to adjusted to the given situation.

# ARFCN of the downlink carrier (center frequency).  
# The NR band.  
# Bandwith in MHz. Number of PRBs will be automatically derived.  
# Subcarrier spacing in kHz used for data.  
# PLMN broadcasted by the gNB.  
# Tracking area code (needs to match the core configuration).

**Ilustración 4-3:** Configuración para la banda n3

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

Al ejecutar la red con este archivo de configuración se obtuvo resultados como se indica en la Ilustración 4-4 donde se aprecia el ancho de banda establecido a 20 MHz, el ARFCN 368500 correspondiente al enlace de bajada en banda n3 cuya frecuencia central es de 1842,5 MHz y gNB activo exitosamente.

```

byron@byron-SATELLITE-L50-C: ~/srsRAN_Project/build/apps/gnb
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~/srsRAN_Project/build/apps/gnb$ sudo gnb -c /home/byron/srsRAN_Project/configs/gnb_n3_Redmi_note_12_fdd.yml
The PRACH detector will not meet the performance requirements with the configuration {Format 0, ZCZ 0, SCS 1.25kHz, Rx ports 1}.
Lower PHY in dual executor mode.

--- srsRAN gNB (commit 55c984b55) ---

Connecting to AMF on 127.0.1.100:38412
Available radio types: uhd.
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 11.4.0; Boost_107400; UHD_4.6.0-0ubuntu1-jammy1
Making USRP object with args 'type=b200'
[INFO] [LOGGING] Fastpath logging disabled at runtime.
[INFO] [B200] Detected Device: B210
[INFO] [B200] Operating over USB 3.
[INFO] [B200] Initialize CODEC control...
[INFO] [B200] Initialize Radio control...
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Setting master clock rate selection to 'automatic'.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 16.000000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 16.000000 MHz.
[INFO] [MULTI-USRP] Setting master clock rate selection to 'manual'.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 23.040000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 23.040000 MHz.
Cell pci=1, bw=20 MHz, dl_arfcn=368500 (n3), dl_freq=1842.5 MHz, dl_ssb_arfcn=368410, ul_freq=1747.5 MHz

=== gNodeB started ===
Type <t> to view trace

```

**Ilustración 4-4:** Red operativa en la banda n3.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

### 4.1.3 Frecuencia 2400 MHz (n40)

Previo a la ejecución se cambió algunos parámetros vistos en la Ilustración 4-5

```

7 amf:
8   addr: 127.0.1.100 # The address or hostname of the AMF.
9   bind_addr: 127.0.0.1 # A local IP that the gNB binds to for traffic from the AMF.
10
11 ru_sdr:
12   device_driver: uhd # The RF driver name.
13   device_args: type=b200,num_recv_frames=64,num_send_frames=64 # Optionally pass arguments to the selected RF driver.
14   clock: internal # Specify the clock source used by the RF.
15   sync: # Specify the sync source used by the RF.
16   srates: 23.04 # RF sample rate might need to be adjusted according to selected bandwidth.
17   otw_format: sc12
18   tx_gain: 80 # Transmit gain of the RF might need to adjusted to the given situation.
19   rx_gain: 40 # Receive gain of the RF might need to adjusted to the given situation.
20
21 cell_cfg:
22   dl_arfcn: 462000 # ARFCN of the downlink carrier (center frequency).
23   band: 40 # The NR band.
24   channel_bandwidth_MHz: 20 # Bandwidth in MHz. Number of PRBs will be automatically derived.
25   common_scs: 30 # Subcarrier spacing in kHz used for data.
26   plmn: "00101" # PLMN broadcasted by the gNB.
27   tac: 7 # Tracking area code (needs to match the core configuration).
28   pci: 1 # Physical cell ID.
29

```

**Ilustración 4-5:** Configuración para la banda n40.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

Al ejecutar la red con este archivo de configuración se obtuvo resultados como se indica en la Ilustración 4-6 donde se aprecia el ancho de banda establecido a 20 MHz, ARFCN 480000 correspondiente al enlace de bajada en banda n40 cuya frecuencia central es de 2400 MHz y gNB activo exitosamente.

```

byron@byron-SATELLITE-L50-C: ~/srsRAN_Project/build/apps/gnb
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~/srsRAN_Project/build/apps/gnb$ sudo gnb -c /home/byron/srsRAN_Project/configs/gnb_n40_Redmi_note_12_tdd.yml

The PRACH detector will not meet the performance requirements with the configuration [Format B4, ZCZ 0, SCS 30kHz, Rx ports 1].
Lower PHY in dual executor mode.

--= srsRAN gNB (commit 55c984b55) ==--

Connecting to AMF on 127.0.1.100:38412
Available radio types: uhd.
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 11.4.0; Boost_107400; UHD_4.6.0.0-0ubuntu1-jammy1
[INFO] [LOGGING] Fastpath logging disabled at runtime.
Making USRP object with args 'type=b200,num_recv_frames=64,num_send_frames=64'
[INFO] [B200] Detected Device: B210
[INFO] [B200] Operating over USB 3.
[INFO] [B200] Initialize CODEC control...
[INFO] [B200] Initialize Radio control...
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Setting master clock rate selection to 'automatic'.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 16.000000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 16.000000 MHz.
[INFO] [MULTI USRP] Setting master clock rate selection to 'manual'.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 23.040000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 23.040000 MHz.
Cell pci=1, bw=20 MHz, dl_arfcn=480000 (n40), dl_freq=2400.0 MHz, dl_ssb_arfcn=479070, ul_freq=2400.0 MHz

==== gNodeB started ====
Type <t> to view trace

```

**Ilustración 4-6:** Red operativa en la banda n40.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

#### 4.1.4 Frecuencia 3489,42 MHz (n78)

Previo a la ejecución de la red se cambiaron los parámetros vistos en la Ilustración 4-7

```

7 amf:
8   addr: 127.0.1.100
9   bind_addr: 127.0.0.1
10
11 ru_sdr:
12   device_driver: uhd
13   device_args: type=b200,num_recv_frames=64,num_send_frames=64
14   clock: internal
15   sync:
16   srates: 23.04
17   otw_format: sc12
18   tx_gain: 80
19   rx_gain: 40
20
21 cell_cfg:
22   dl_arfcn: 632628
23   band: 78
24   channel_bandwidth_MHz: 20
25   common_scs: 30
26   plmn: "00101"
27   tac: 7
28   pci: 1
29
# The address or hostname of the AMF.
# A local IP that the gNB binds to for traffic from the AMF.
# The RF driver name.
# Optionally pass arguments to the selected RF driver.
# Specify the clock source used by the RF.
# Specify the sync source used by the RF.
# RF sample rate might need to be adjusted according to selected bandwidth.
# Transmit gain of the RF might need to adjusted to the given situation.
# Receive gain of the RF might need to adjusted to the given situation.
# ARFCN of the downlink carrier (center frequency).
# The NR band.
# Bandwidth in MHz. Number of PRBs will be automatically derived.
# Subcarrier spacing in kHz used for data.
# PLMN broadcasted by the gNB.
# Tracking area code (needs to match the core configuration).
# Physical cell ID.

```

**Ilustración 4-7:** Configuración para la banda n78.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

Al ejecutar la red con este archivo de configuración se obtuvo resultados como se indica en la Ilustración 4-8 donde se aprecia el ancho de banda establecido a 20 MHz, ARFCN 632628 correspondiente al enlace de bajada en banda n78 cuya frecuencia central es de 3489,42 MHz y gNB activo exitosamente.

```

byron@byron-SATELLITE-L50-C: ~/srsRAN_Project/build/apps/gnb
byron@byron-SATELLITE-L50-C:~/srsRAN_Project/build/apps/gnb$ sudo gnb -c /home/byron/srsRAN_Project/configs/gnb_n78_Rednt_note_12_tdd.yml

The PRACH detector will not meet the performance requirements with the configuration [Format B4, ZCZ 0, SCS 30kHz, Rx ports 1].
Lower PHY in dual executor mode.

---- srsRAN gNB (commit 55c984b55) ----

Connecting to AMF on 127.0.1.100:38412
Available radio types: uhd.
[INFO] [UHD] linux; GNU C++ version 11.4.0; Boost 107400; UHD_4.6.0.0ubuntu1-jammy1
[INFO] [LOGGING] Fastpath logging disabled at runtime.
Making USRP object with args 'type=b200,num_recv_frames=64,num_send_frames=64'
[INFO] [B200] Detected Device: B210
[INFO] [B200] Operating over USB 3.
[INFO] [B200] Initialize CODEC control...
[INFO] [B200] Initialize Radio control...
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Performing register loopback test...
[INFO] [B200] Register loopback test passed
[INFO] [B200] Setting master clock rate selection to 'automatic'.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 16.000000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 16.000000 MHz.
[INFO] [MULTI USRP] Setting master clock rate selection to 'manual'.
[INFO] [B200] Asking for clock rate 23.040000 MHz...
[INFO] [B200] Actually got clock rate 23.040000 MHz.
Cell pci=1, bw=20 MHz, dl_arfcn=632628 (n78), dl_freq=3489.42 MHz, dl_ssb_arfcn=632256, ul_freq=3489.42 MHz

==== gNodeB started ====
Type <t> to view trace

```

**Ilustración 4-8:** Red operativa en la banda n78.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

## 4.2 Mediciones de los parámetros de la red 5G SA de manera espacial

### 4.2.1 Cobertura

En primera instancia se estima la cobertura 5G en cada frecuencia en condiciones óptimas, para su evaluación se consideró tres parámetros: SS-RSRP, SS-RSRQ y SNR, los mismos que se obtuvieron mediante la aplicación Network Cell Info Lite en base a mediciones realizadas. Desde la Tabla 4-1 hasta la Tabla 4-8 se pueden visualizar los datos obtenidos.

#### 4.2.1.1 Tablas de medidas de RSRP, RSRQ y SNR para la frecuencia 780,5 MHz

**Tabla 4-1:** Parámetros de 0 a 135 grados.

Metros	0°			45°			90°			135°		
	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	SNR(dB)									
1	-79	-3	28	-78	-3	27	-78	-3	27	-81	-3	26
2	-84	-3	27	-84	-3	25	-87	-3	24	-89	-3	24
3	-92	-4	26	-87	-4	23	-94	-4	23	-92	-4	22
4	-96	-4	25	-95	-6	21	-	-	-	-96	-4	19
5	-	-	-	-97	-6	19	-	-	-	-99	-6	17

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

**Tabla 4-2:** Parámetros de 180 a 315 grados.

Metros	180°			225°			270°			315°		
	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	SNR(dB)									
1	-81	-3	27	-82	-3	28	-83	-3	27	-80	-3	28
2	-93	-4	24	-88	-4	25	-86	-4	24	-85	-4	25
3	-96	-4	22	-93	-4	22	-94	-4	22	-91	-4	24
4	-97	-4	20	-97	-4	20	-	-	-	-94	-4	21
5	-	-	-	-99	-6	18	-	-	-	-97	-6	19

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

#### 4.2.1.2 Tablas de medidas de RSRP, RSRQ y SNR para la frecuencia 1842,5 MHz

**Tabla 4-3:** Parámetros de 0 a 135 grados.

Metros	0°			45°			90°			135°		
	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	SNR(dB)									
1	-84	-3	27	-86	-3	28	-85	-3	26	-86	-3	27
2	-91	-3	25	-86	-4	25	-89	-4	24	-89	-3	24
3	-94	-4	22	-91	-4	23	-94	-4	22	-92	-4	22
4	-98	-6	21	-95	-6	20	-	-	-	-95	-6	19
5	-	-	-	-99	-8	19	-	-	-	-97	-8	16

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

**Tabla 4-4:** Parámetros de 180 a 315 grados.

Metros	180°			225°			270°			315°		
	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	SNR(dB)									
1	-87	-3	27	-86	-3	27	-84	-3	28	-85	-3	27
2	-92	-4	25	-90	-4	24	-93	-4	24	-91	-4	25
3	-96	-5	21	-93	-4	22	-97	-6	21	-94	-4	23
4	-99	-8	18	-97	-6	20	-	-	-	-96	-6	20
5	-	-	-	-99	-8	18	-	-	-	-98	-8	18

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

4.2.1.3 Tablas de medidas de RSRP, RSRQ y SNR para la frecuencia 2400 MHz

**Tabla 4-5:** Parámetros de 0 a 135 grados.

Metros	0°			45°			90°			135°		
	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	SNR(dB)									
1	-85	-3	28	-84	-3	27	-86	-3	28	-84	-3	26
2	-91	-4	25	-88	-4	25	-92	-4	26	-91	-4	24
3	-94	-6	23	-93	-4	23	-98	-6	24	-96	-6	21
4	-100	-8	20	-96	-6	20	-	-	-	-98	-8	19
5	-	-	-	-101	-8	17	-	-	-	-100	-10	17

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

**Tabla 4-6:** Parámetros de 180 a 315 grados.

Metros	180°			225°			270°			315°		
	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	SNR(dB)									
1	-87	-3	27	-86	-3	26	-91	-3	26	-88	-3	26
2	-92	-4	24	-92	-4	24	-94	-4	22	-94	-4	24
3	-95	-6	21	-94	-6	22	-98	-6	20	-97	-6	20
4	-97	-8	17	-97	-8	20	-	-	-	-99	-8	19
5	-	-	-	-100	-10	16	-	-	-	-102	-10	16

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

#### 4.2.1.4 Tablas de medidas de RSRP, RSRQ y SNR para la frecuencia 3489,42 MHz

**Tabla 4-7:** Parámetros de 0 a 135 grados.

Metros	0°			45°			90°			135°		
	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	SNR(dB)									
1	-87	-3	25	-89	-3	28	-88	-3	26	-88	-3	27
2	-95	-4	23	-95	-4	25	-93	-4	23	-92	-5	25
3	-100	-4	18	-98	-6	23	-100	-4	16	-94	-6	19
4	-103	-6	14	-103	-8	18	-	-	-	-96	-9	16
5	-	-	-	-105	-10	14	-	-	-	-102	-10	13

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

**Tabla 4-8:** Parámetros de 180 a 315 grados.

Metros	180°			225°			270°			315°		
	RSRP(dBm)	RSRQ(dB)	SNR(dB)									
1	-87	-3	26	-87	-3	26	-87	-3	25	-89	-3	27
2	-93	-4	24	-93	-4	23	-90	-4	22	-91	-4	24
3	-97	-6	21	-98	-6	20	-95	-6	19	-95	-6	21
4	-101	-10	18	-101	-10	16	-	-	-	-101	-10	18
5	-	-	-	-103	-10	11	-	-	-	-105	-10	14

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

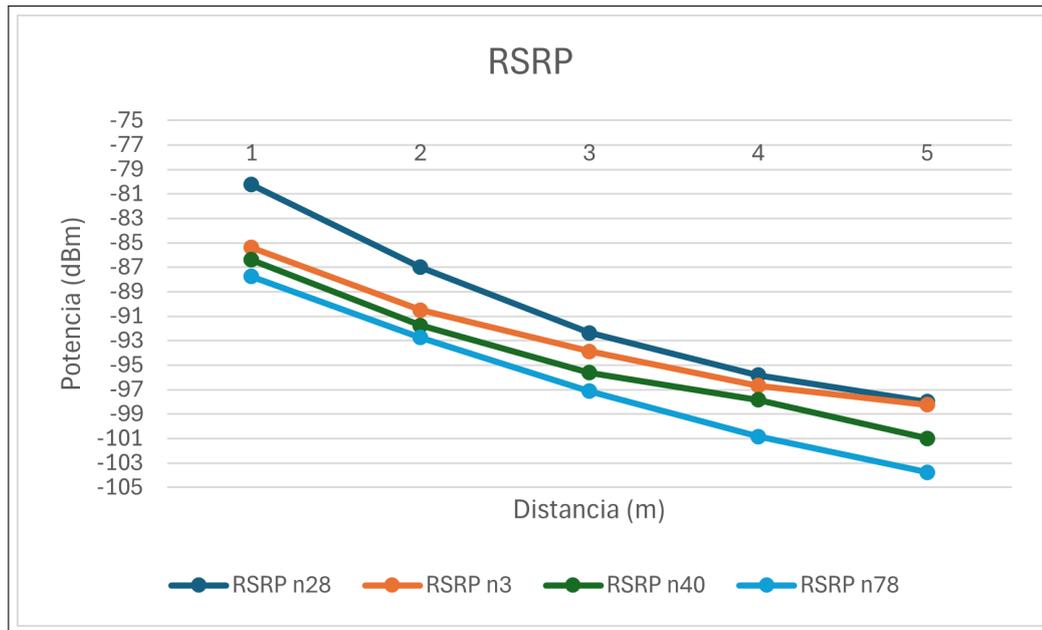
#### 4.2.1.5 Resultados RSRP

Al ser los valores medidos similares entre sí, debido que la antena es omnidireccional, se calculó la Media (debido a que la Normalidad es de 0.05 según el test de Shapiro-Wilk) de los valores obtenidos por cada metro de distancia tomando como referencia el punto 0° para los valores RSRP en todas las frecuencias, en la Tabla 4-9 se muestra los resultados estos valores y en la Ilustración 4-9 se muestra la gráfica comparativa de los valores en cada frecuencia.

**Tabla 4-9:** Media y Normalidad

Metros	RSRP n28		RSRP n3		RSRP n40		RSRP n78	
	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad
1	-80.3	0.05	-85.3	0.05	-86.3	0.05	-87.8	0.05
2	-87	0.05	-90.5	0.05	-91.8	0.05	-92.8	0.05
3	-92.4	0.05	-93.9	0.05	-95.6	0.05	-97.1	0.05
4	-95.8	0.05	-96.7	0.05	-97.8	0.05	-100.8	0.05
5	-98	0.05	-98.3	0.05	-101	0.05	-103.8	0.05

Realizado por: Mayorga, B.,2024.



**Ilustración 4-9:** Gráfica de valores RSRP en todas las frecuencias.  
**Realizado por:** Mayorga, B.,2024.

En la gráfica se puede apreciar que, al incrementar la distancia de cobertura, es decir, alejarse de la antena transmisora, la intensidad de la señal disminuye. En la frecuencia de 780,5 MHz debido a una longitud de onda mucho mayor, según la Tabla 3-10 esta reducción se mantiene en niveles aceptables, mientras que para la frecuencia de 3489,5 MHz a una distancia máxima se tiene valores que se podrían considerar bajos.

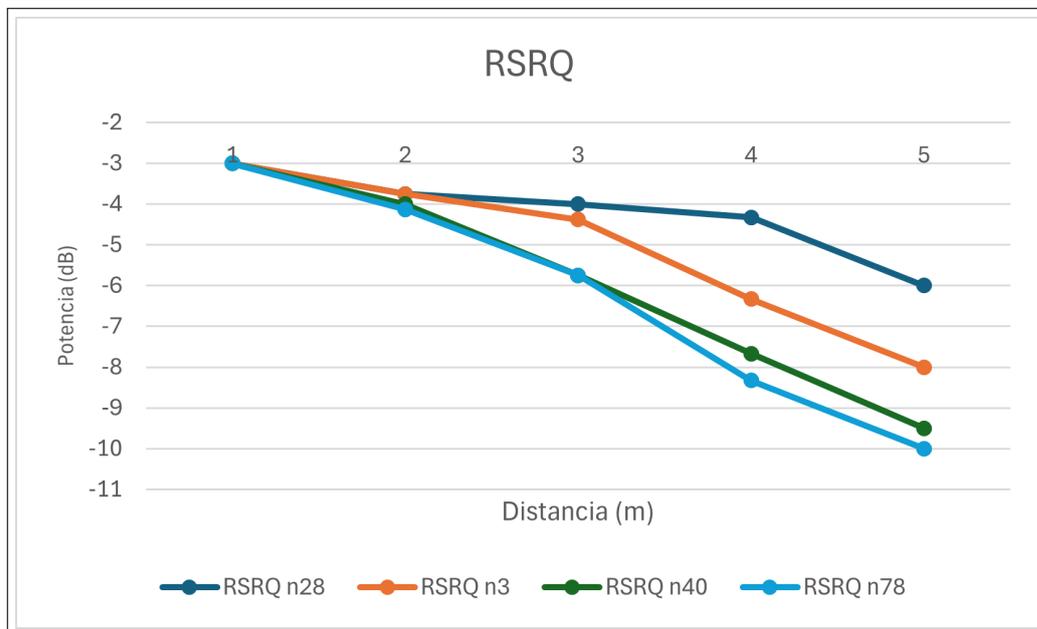
#### 4.2.1.6 Resultados para RSRQ.

Se calculó la Media (debido a que la Normalidad es de 0.05 según el test de Shapiro-Wilk) de los valores obtenidos por cada metro de distancia tomando como referencia 0º para los valores de RSRQ en todas las bandas, en la Tabla 4-10 se muestra los resultados de estos valores y en la Ilustración 4-10 se muestra la gráfica con la comparativa de los valores en cada banda.

**Tabla 4-10:** Media y Normalidad

Metros	RSRQ n28		RSRQ n3		RSRQ n40		RSRQ n78	
	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad
1	-3	0.05	-3	0.05	-3	0.05	3	0.05
2	-3.75	0.05	-3.75	0.05	-4	0.05	-4.13	0.05
3	-4	0.05	-4.38	0.05	-5.75	0.05	-5.75	0.05
4	-4.33	0.05	-6.33	0.05	-7.67	0.05	-8.83	0.05
5	-6	0.05	-8	0.05	-9.5	0.05	-10	0.05

Realizado por: Mayorga, B.,2024.



**Ilustración 4-10:** Gráfica de valores RSRQ en todas las frecuencias.

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

En la gráfica se puede apreciar que, al incrementar la distancia la calidad de la señal disminuye como en el caso anterior, pero en este caso no es un decremento significativo para ninguna de las frecuencias debido a que incluso para 3489,42 el nivel RSRQ es de -10 dB lo cual, según la Tabla 3-10 se considera excelente, cabe recalcar que esto es debido a que no existieron otras señales que puedan interferir dentro del laboratorio.

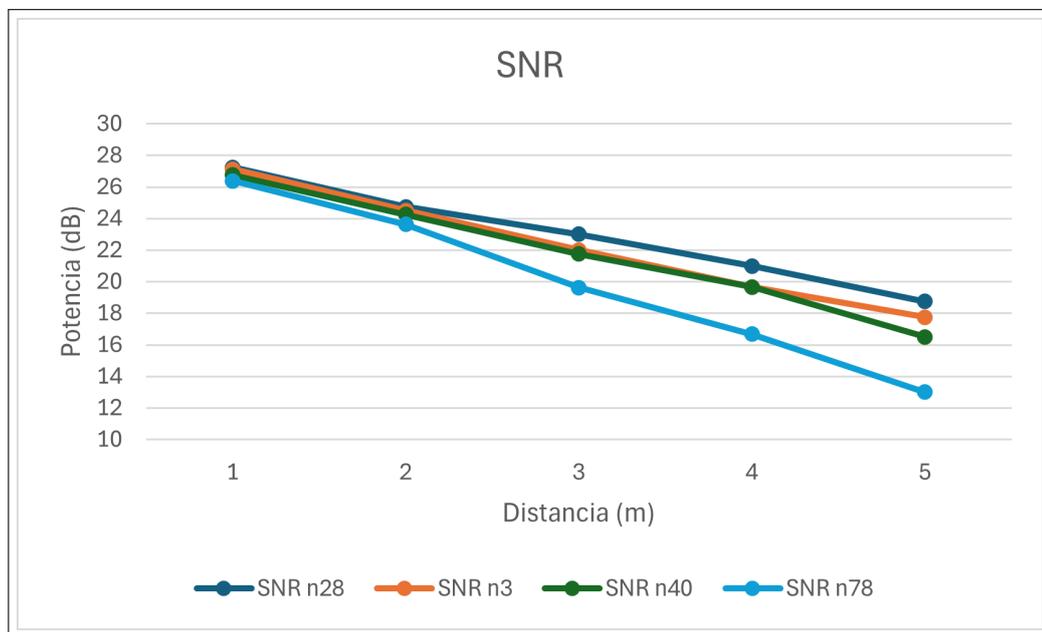
#### 4.2.1.7 Resultados para SNR.

Se calculó la Media (debido a que la Normalidad es de 0.05 según el test de Shapiro-Wilk) de los valores obtenidos por cada metro de distancia tomando como referencia el punto 0° para los valores SNR en todas las bandas, en la Tabla 4-11 se muestra los resultados de estos valores y en la Ilustración 4-11 se muestra la gráfica comparativa de los valores en cada banda.

**Tabla 4-11:** Media y Normalidad

Metros	SNR n28		SNR n3		SNR n40		SNR n78	
	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad
1	27.25	0.05	27.13	0.05	26.75	0.05	26.38	0.05
2	24.75	0.05	24.5	0.05	24.25	0.05	26.63	0.05
3	23	0.05	22	0.05	21.75	0.05	19.63	0.05
4	21	0.05	19.67	0.05	19.17	0.05	16.67	0.05
5	18.25	0.05	17.75	0.05	16.5	0.05	13	0.05

Realizado por: Mayorga, B., 2024.



**Ilustración 4-11:** Gráfica de valores SNR en todas las frecuencias.

Realizado por: Mayorga, B., 2024.

En la gráfica se aprecia que la potencia es similar en todas las frecuencias a la distancia mínima, pero a medida que se aumenta la distancia, según la Tabla 3-10, la relación señal ruido es inferior en frecuencias altas pero aún se consideran aceptables, cabe mencionar que si este parámetro estuviera por debajo del umbral mínimo (0 dB) no se podría visualizar ni los valores de RSRP ni RSRQ.

#### 4.2.2 Velocidad de transmisión

Lo primero que se debe considerar para medir la velocidad de transmisión 5G en cada frecuencia va a depender de la capacidad del dispositivo, en este caso la PC Toshiba Satellite y la velocidad que ofrece el proveedor de internet. En la aplicación Speedtest se realizaron mediciones cuyos resultados se puede ver desde la Tabla 4-12 hasta la Tabla 4-15 se pueden visualizar los datos obtenidos.

##### 4.2.2.1 Tablas de valores de velocidad de transmisión para la frecuencia 780,5 MHz

**Tabla 4-12:** Velocidad de transmisión n28 desde 0° a 315°.

Metros	Mbps a 0°	Mbps a 45°	Mbps a 90°	Mbps a 135°	Mbps a 180°	Mbps a 225°	Mbps a 270°	Mbps a 315°
1	13.4	12.9	14.5	13.9	13.4	12.6	11.9	12.3
2	12.6	11.1	12.8	11.3	11.6	11.3	9.4	11.3
3	11.8	10.8	11.3	9.8	9,3	9.4	8.3	9.5
4	7.6	8.5	-	9.2	7.5	7.8	-	8.4
5	-	7.4	-	8.6	-	6.9	-	7.1

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

##### 4.2.2.2 Tablas de medidas de velocidad de transmisión para la frecuencia 1842,5 MHz

**Tabla 4-13:** Velocidad de transmisión n3 desde 0° a 315°.

Metros	Mbps a 0°	Mbps a 45°	Mbps a 90°	Mbps a 135°	Mbps a 180°	Mbps a 225°	Mbps a 270°	Mbps a 315°
1	15.8	16.4	17.4	14.4	13.6	15.6	16.2	15.6
2	13.7	15.1	15.8	12.4	11.2	13.4	14.4	14.3
3	11.8	13.8	13.3	9.8	8.9	11.2	11.9	13.4
4	8.8	12.5	-	9.2	7.2	10.5	-	11.2
5	-	10.5	-	8.6	-	9.8	-	9.7

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

4.2.2.3 *Tablas de medidas de velocidad de transmisión para la frecuencia 2400 MHz*

**Tabla 4-14:** Velocidad de transmisión n40 desde 0° a 315°.

Metros	Mbps a 0°	Mbps a 45°	Mbps a 90°	Mbps a 135°	Mbps a 180°	Mbps a 225°	Mbps a 270°	Mbps a 315°
1	28.5	23.9	24.1	25.5	25.9	28.3	25.9	24.5
2	23.4	23.1	22.6	24.3	22.4	25.4	22.8	20.4
3	21.6	22.4	21.3	23.8	19.8	22.2	20.1	17.2
4	20.2	21.1	-	20.8	16.9	16.4	-	14.4
5	-	18.3	-	17.4	-	14.2	-	11.7

**Fuente:** Realizado por: Mayorga, B.,2024.

4.2.2.4 *Tablas de medidas de velocidad de transmisión para la frecuencia 3489,42 MHz*

**Tabla 4-15:** Velocidad de transmisión n78 desde 0° a 315°.

Metros	Mbps a 0°	Mbps a 45°	Mbps a 90°	Mbps a 135°	Mbps a 180°	Mbps a 225°	Mbps a 270°	Mbps a 315°
1	29.6	32.8	27.6	33.4	34.5	33.3	29.5	31.6
2	28.3	31.2	24.8	32.8	32.2	32.4	28.7	30.8
3	27.8	30.8	22.4	32.4	31.7	31.2	26.8	30.2
4	25.2	28.6	-	30.1	29.4	29.2	-	29.8
5	-	27.4	-	28.4	-	26.9	-	28.5

**Realizado por:** Mayorga, B.,2024.

4.2.2.5 *Resultados velocidad de transmisión.*

Se calculó la Media (debido a que la Normalidad es de 0.05 según el test de Shapiro-Wilk) de los valores obtenidos por cada metro de distancia tomando como referencia el punto 0° para valores de Velocidad de transmisión en todas las bandas, en la Tabla 4-16 se muestra los resultados de la media y en la Ilustración 4-12, se muestra la gráfica comparativa de los valores en cada banda.

**Tabla 4-16:** Media y Normalidad

Metros	Data Rate n28		Date Rate n3		Data Rate n40		Data Rate n78	
	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad
1	13.11	0.05	15.63	0.05	26.05	0.05	31.54	0.05
2	11.4	0.05	13.78	0.05	23.12	0.05	31.35	0.05
3	10.02	0.05	11.76	0.05	20.78	0.05	29.16	0.05
4	8.28	0.05	9.9	0.05	17.74	0.05	28.72	0.05
5	7.5	0.05	9.65	0.05	14.43	0.05	27.93	0.05

Realizado por: Mayorga, B., 2024.



**Ilustración 4-12:** Gráfica de Velocidad de transmisión en todas las frecuencias.

Realizado por: Mayorga, B., 2024.

En la gráfica se aprecia las velocidades de transmisión por frecuencia, tienen un comportamiento que se podría considerar lineal con algunas variaciones, como se esperaba la velocidad más alta se tiene en la frecuencia 3489,5 MHz mientras que, existe una disminución significativa en la velocidad de transmisión correspondiente a las frecuencias más bajas, se debe mencionar que los resultados están condicionados por la limitación de equipos y la velocidad de transmisión del proveedor, pero se puede tener idea clara de cómo operan estas frecuencias realmente.

### 4.2.3 Latencia

Para medir la latencia de transmisión 5G en cada frecuencia se debe considerar la capacidad de los equipos usados para implementar la red y las posibles interferencias que puedan existir, en este caso en ambiente de laboratorio, al ser un entorno controlado son prácticamente nulas. Con la aplicación Ping se realizaron mediciones cuyos resultados se pueden evidenciar desde la Tabla 4-17 hasta la Tabla 4-20.

#### 4.2.3.1 Tablas de valores de latencia para la frecuencia 780,5 MHz

**Tabla 4-17:** Latencia n28 desde 0° a 315°.

Metros	ms a 0°	ms a 45°	ms a 90°	ms a 135°	ms a 180°	ms a 225°	ms a 270°	ms a 315°
1	30	29.1	30.2	28.4	29.6	28.4	27.1	28.9
2	30.7	30.7	32.4	29.4	27.5	28.9	28.6	29.8
3	32.5	31.4	35.3	32.8	27.9	30.3	31.1	30.5
4	34.4	33.2	-	33.4	28.8	31.6	-	31.2
5	-	36.8	-	34.8	-	33.7	-	31.7

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

#### 4.2.3.2 Tablas de medidas de latencia para la frecuencia 1842,5 MHz

**Tabla 4-18:** Latencia n3 desde 0° a 315°.

Metros	ms a 0°	ms a 45°	ms a 90°	ms a 135°	ms a 180°	ms a 225°	ms a 270°	ms a 315°
1	27.4	28.6	28.4	28.8	28.3	27.6	26.8	27.6
2	29.3	29.5	29.7	29.5	29.6	28.4	27.7	28.2
3	31.7	31.4	30.5	30.9	30.7	29.2	29.5	29.3
4	33.2	32.9	-	33.4	31.1	30.5	-	30.1
5	-	35.9	-	35.2	-	31.8	-	31.7

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

#### 4.2.3.3 Tablas de medidas de latencia para la frecuencia 2400 MHz

**Tabla 4-19:** Latencia n40 desde 0° a 315°.

Metros	ms a 0°	ms a 45°	ms a 90°	ms a 135°	ms a 180°	ms a 225°	ms a 270°	ms a 315°
1	26.4	26.9	25.1	27.3	28.1	28.3	28.5	27.9
2	27.6	28.6	27.4	28.4	28.9	28.7	29.2	28.4
3	28.7	29.7	29.8	29.9	29.6	29.6	31.4	29.8
4	30.2	30.6	-	30.3	30.4	30.4	-	30.2
5	-	31.4	-	31.5	-	32.3	-	31.1

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

#### 4.2.3.4 Tablas de medidas de latencia para la frecuencia 3489,42 MHz

**Tabla 4-20:** Latencia n78 desde 0° a 315°.

Metros	ms a 0°	ms a 45°	ms a 90°	ms a 135°	ms a 180°	ms a 225°	ms a 270°	ms a 315°
1	24.2	24.9	25.1	25.4	24.7	23.9	24.2	23.7
2	26.6	25.6	27.4	26.2	25.4	25.7	26.4	25.5
3	28.7	26.3	29.8	27.4	26.4	28.3	28.8	26.4
4	30.2	27.6	-	29.4	27.2	30.1	-	27.5
5	-	28.9	-	30.1	-	31.2	-	28.4

Realizado por: Mayorga, B.,2024.

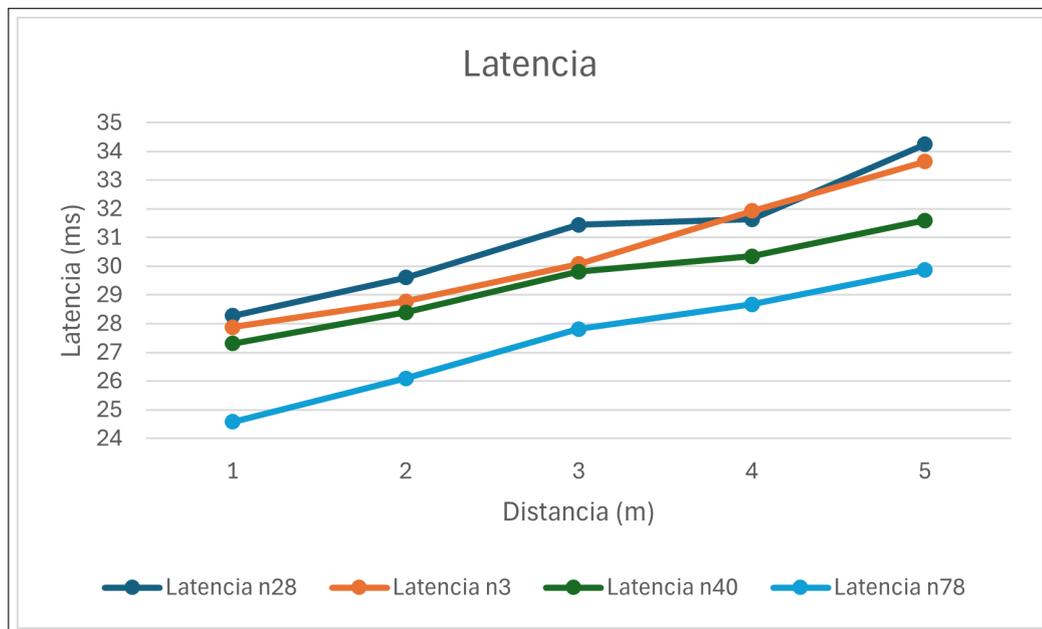
#### 4.2.3.5 Resultados de latencia

Se calculó la Media (debido a que la Normalidad es de 0.05 según el test de Shapiro-Wilk) de los valores obtenidos por cada metro de distancia tomando como referencia el punto 0° para valores de Latencia en todas las frecuencias, en la Tabla 4-21 se muestra los resultados de la media y en la Ilustración 4-13 se muestra la gráfica comparativa de los valores en cada banda.

**Tabla 4-21:** Media y Normalidad

Metros	Latencia n28		Latencia n3		Latencia n40		Latencia n78	
	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad
1	28.28	0.05	27.88	0.05	27.31	0.05	24.56	0.05
2	29.61	0.05	28.4	0.05	28.4	0.05	26.10	0.05
3	31.47	0.05	29.81	0.05	29.81	0.05	27.73	0.05
4	31.64	0.05	30.35	0.05	30.35	0.05	28.67	0.05
5	34.25	0.05	31.6	0.05	31.6	0.05	29.88	0.05

Realizado por: Mayorga, B., 2024.



**Ilustración 4-13:** Gráfica de Latencia en todas las frecuencias.

Realizado por: Mayorga, B., 2024.

En la gráfica se aprecia que los valores de latencia para cada frecuencia superan el nivel esperado, esto se debe a la capacidad de los equipos que utilizados para armar la red, pero se puede apreciar que existen ciertas frecuencias de menor latencia para las frecuencias altas inferiores incluso a 25 ms en la distancia más cercana, sin embargo para frecuencias más bajas alcanzan hasta los 35 ms, que en términos generales no son latencias altas pero si se podrían mejorar en futuras implementaciones.

### 4.3 Mediciones de los parámetros de la red 5G SA de manera temporal

En la sección anterior, se tomaron las mediciones en las mejores condiciones, tomando en consideración un instante concreto del tiempo, pero para evaluar el rendimiento, también se debe considerar la variabilidad que puede existir de los parámetros durante cierta cantidad de tiempo.

#### 4.3.1 Cobertura

En cuanto a cobertura, se evaluaron los mismos umbrales mencionados anteriormente (RSRP, RSRQ y SNR) desde las 15:00 horas hasta las 18:00 horas, pero no se observó un cambio significativo de los valores medidos anteriormente, esto es debido a que solo existe un 1 dispositivo que está utilizando los recursos en ese momento de los 1024 dispositivos que se permite conectar en la red, por consecuencia no fue necesario elaborar otra tabla de mediciones ya que los resultados son prácticamente los mismos.

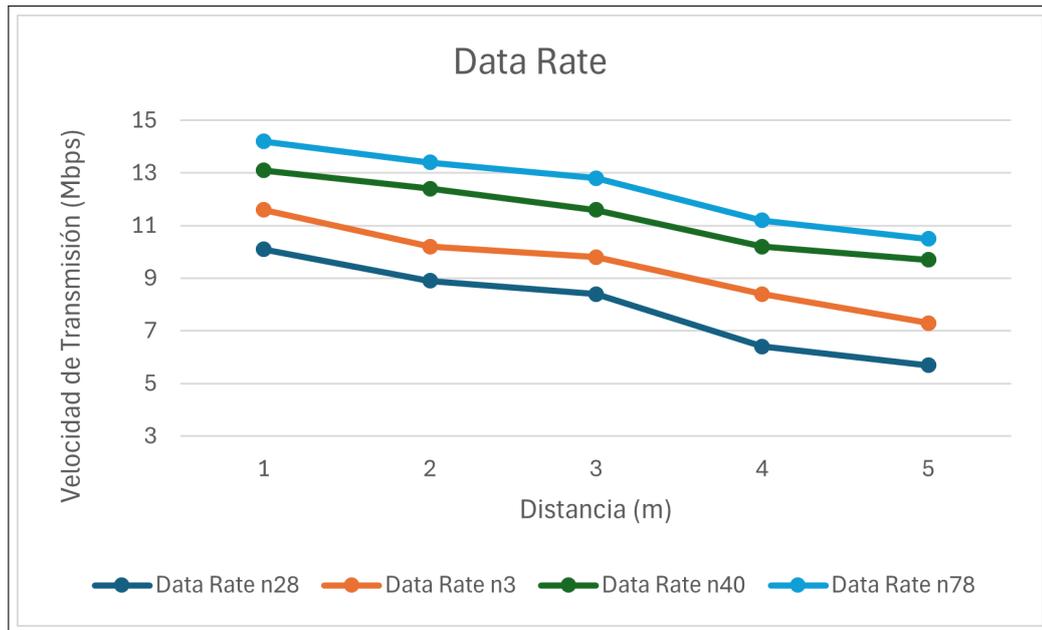
#### 4.3.2 Velocidad de transmisión

En cuanto a la velocidad de transmisión, se utilizó el mismo intervalo de tiempo desde las 15:00 horas hasta las 18:00 horas, pero en este caso sí existió una variación de los resultados a diferentes horas, esto es debido a que la red que utiliza la computadora para acceder a internet y ejecutar la red como tal, es la misma red que se está utilizando en otros lugares del edificio mostrado en la Ilustración 3-1. Para la medición de los valores, se optó por tomar el peor de los casos, es decir el intervalo de tiempo donde más usuarios estaban compartiendo el ancho de banda en ese momento, de igual manera se realizó el promedio de los valores obtenidos debido a que la Normalidad era de 0.05 al aplicar el test de Shapiro Wilk. En la tabla 4-22 se pueden ver los resultados y en la Ilustración 4-14, la gráfica correspondiente.

**Tabla 4-22:** Media y Normalidad

Metros	Data Rate n28		Date Rate n3		Data Rate n40		Data Rate n78	
	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad	Media	Normalidad
1	10.1	0.05	11.6	0.05	13.1	0.05	14.2	0.05
2	8.9	0.05	10.2	0.05	12.4	0.05	13.4	0.05
3	8.4	0.05	9.8	0.05	11.6	0.05	12.8	0.05
4	6.4	0.05	8.4	0.05	10.2	0.05	11.2	0.05
5	5.7	0.05	7.3	0.05	9.7	0.05	10.5	0.05

Realizado por: Mayorga, B., 2024.



**Ilustración 4-14:** Gráfica de Velocidad de transmisión en todas las frecuencias.  
 Realizado por: Mayorga, B.,2024.

### 4.3.3 Latencia

En cuanto a latencia, este parámetro no va a depender solo del ancho de banda de conexión como fue el caso anterior, sino más bien de los recursos que esté ocupando la computadora al momento de ejecutar la red, por tanto, no fue necesario realizar otras mediciones debido a que ya se estaban utilizando los recursos al máximo que puede ofrecer la computadora, durante el intervalo de tiempo en el que se hicieron las mediciones anteriormente.

## 4.4 Discusión de resultados

### 4.4.1 Cobertura

Para evaluar la cobertura, se consideró los umbrales RSRP, RSRQ y SNR y se observaron niveles favorables en todas las bandas, pero existe una tendencia respecto a las frecuencias más bajas donde estos umbrales son mejores, esto no quiere decir que los resultados en las frecuencias más altas sean malos, todavía existe una cobertura aceptable e incluso excelente considerando el umbral RSRQ, esto se pudo corroborar mediante la navegación de páginas web y la visualización de vídeos en Youtube.

#### ***4.4.2 Velocidad de transmisión***

Respecto a Velocidad de transmisión se tienen velocidades aceptables dentro de lo esperado, debido a que la velocidad de transmisión proporcionada por el proveedor de red a la computadora donde se realizó la ejecución de la red no era demasiado alta, aproximadamente de 40 Mbps, teniendo en cuenta que la banda donde más velocidad se alcanzó fue en bandas altas con velocidades un poco superiores a 30 Mbps mientras que en bandas bajas fueron superiores a 10 Mbps.

#### ***4.4.3 Latencia***

Para Latencia se obtuvieron resultados inferiores a lo esperado donde en frecuencias altas se lograron mejores resultados sobre los 25-28 milisegundos a distancias más cercanas, mientras que para frecuencias bajas fueron superiores a los 30 milisegundos. Esto se debe principalmente a las características de los equipos que influyen en este parámetro.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

- El estudio del estado del arte de la tecnología 5G se llevó a cabo de manera satisfactoria, tomando como referencia estudios realizados desde el 2018 (implementaciones 5G en países asiáticos). Este análisis se viene llevando a cabo hasta el presente año, en el cual las redes 5G son una realidad en muchos países del mundo.
- Recopilando información sobre las frecuencias más utilizadas en las redes 5G, se han seleccionado las bandas n28 y n3, las cuales emplean duplexación por división de frecuencia (FDD), junto con las bandas n40 y n78, que utilizan duplexación por división de tiempo (TDD). Estas selecciones se basan en antecedentes de una implementación exitosa de la red 5G en otros países, lo que las hace idóneas para llevar a cabo evaluaciones correspondientes.
- La implementación de la red 5G en ambiente de laboratorio se desarrolló de manera satisfactoria, considerando las medidas de precaución necesarias para el uso de los equipos. Se siguió un procedimiento secuencial para ejecutar los procesos en el orden correcto y se solucionaron problemas que surgieron a medida que se desarrollaba las pruebas correspondientes, asegurando la operatividad de la red para cualquier dispositivo con capacidad 5G.
- Se llevaron a cabo mediciones utilizando los equipos y aplicaciones correspondientes para evaluar el rendimiento de la red 5G SA de manera satisfactoria, donde se comprobó las prestaciones que puede ofrecer la red en ambiente de laboratorio, pudiendo realizar trabajos posteriores gracias a este trabajo.

#### 5.2 Recomendaciones

- Se recomienda utilizar información verídica a la hora de realizar el estudio del estado del arte para cualquier tipo de investigación, preferentemente documentos de hace tres o hace cinco años como mucho, sino la información puede quedar obsoleta debido a que cualquier aspecto de las Telecomunicaciones se encuentra en constante cambio.

- Se recomienda hacer una lectura crítica de los documentos más importantes, una vez hayan sido clasificados para discernir la información necesaria para incluirla en el trabajo de investigación.
  
- A la hora de implementar la red en ambiente de laboratorio, se recomienda manipular los equipos de manera cuidadosa, prestando atención a los conectores y demás elementos, de preferencia consultar los datasheets de los dispositivos ante cualquier inquietud.
  
- A la hora de hacer mediciones, se recomienda plantear un escenario de medición previamente, elegir los dispositivos o aplicaciones necesarios que más se adapten a los resultados que se quieran conseguir.
  
- Cuando se debe manejar un buen número de datos y realizar procesos estadísticos con ellos, se recomienda utilizar plataformas que ayuden a realizar dichos procesos para ser más eficientes y que no exista pérdida de información.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **3GPP**, *Release 16*. [website]. [Consulta: 07 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-16>.
2. **3GPP**, *Release 17*. [website]. [Consulta: 07 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-17>.
3. **3GPP**, *Release 18*. [website]. [Consulta: 07 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-18>.
4. **ABRIL, Evaristo, & AVEDAÑO, Manuel**: *CHAPPE, Claude*. [blog], 2020 [Consulta: 27 octubre 2023]. Disponible en: <https://forohistorico.coit.es/index.php/personajes/personajes-internacionales/item/chappe-claude>.
5. **AMBROSI, Claudio**. *El acceso a Internet como derecho humano básico - ENACOM*, 2021. [website], [Consulta: 27 noviembre 2023]. Disponible en: [https://www.enacom.gov.ar/institucional/el-acceso-a-internet-como-derecho-humano-basico\\_n3205](https://www.enacom.gov.ar/institucional/el-acceso-a-internet-como-derecho-humano-basico_n3205).
6. **ATOMIC32**, *Tecnología 5G: La revolución de la conectividad inalámbrica*. 2023-12. [website]. [Consulta: 16 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/tecnologia-5g-la-revolucion-de-conectividad-inalambrica-atomic-32>.
7. **AVEDAÑO, Xavier et al.** "PLAN DE LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN Y DEL CONOCIMIENTO". *MINTEL* [en línea], 2018, (Ecuador), pág. 3, [Consulta: 16 enero 2024]. Disponible en: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2018/11/Plan-de-la-Sociedad-de-la-Informacion-PSIC-20181026.pdf>.
8. **BARRAGÁN, Xavier**. *Las Redes 5G*, 2021. [website], [Consulta: 03 noviembre 2023]. Disponible en: <https://ceabad.com/2021/04/16/las-redes-5g/>.
9. **BNAMÉRICAS**, *Mayor parte de Sudamérica ya cuenta con redes 5G*, 2021. [website], [Consulta: 21 enero 2024]. Disponible en: <https://www.bnamericas.com/es/noticias/mayor-parte-de-sudamerica-ya-cuenta-con-redes-5g>.
10. **CASTAÑEDA, Ricardo**. "Esquemas técnicos y regulatorios para el acceso y uso flexible del Espectro Radioeléctrico en México". *INFOTEC* [en línea], 2022, (Ciudad de Mexico), [Consulta: 26 enero 2024]. Disponible en: <https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1027/582>.
11. **CASTILLA GARCÍA, Alejandro**. "Telepresencia 5G. Sistema de control remoto y navegación inmersiva de vehículos". *UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación* [en línea], 2018, (España), págs. 5-6, [Consulta: 18 diciembre 2023]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/190969>.
12. **CASTRO SANCHEZ, David**. *Diseño de una red de acceso radio 5G (RAN-5G) aplicado a la zona portuaria de Valencia*. Valencia, España, 2021, págs. 43-44.
13. **CATALANO, Andrea**. *El espectro de 1.800 MHz se erige como una alternativa adicional en el camino hacia 5G - TeleSemana.com*, 2022. [blog], [Consulta: 12 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.telesemana.com/blog/2022/06/13/el-espectro-de-1-800-mhz-se-erige-como-una-alternativa-adicional-en-el-camino-hacia-5g/>.

14. **CIRO, Salazar, & PERÉZ, Adriana.** "Historia de la tecnología celular". *UAEH* [en línea], 2013, (Mexico) vol. 1, págs. 17-31, [Consulta: 27 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa3/n4/p1.html>.
15. **CNMC, ACUERDO POR EL QUE SE EMITE INFORME AL PROYECTO DE ORDEN, POR LA QUE SE APRUEBA EL PLIEGO DE CLÁUSULAS ADMINISTRATIVAS PARTICULARES Y DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARA EL OTORGAMIENTO POR SUBASTA DE CONCESIONES DE USO PRIVATIVO DE DOMINIO PÚBLICO RADIOELÉCTRICO EN LA BANDA DE 700 MHz Y SE CONVOCA LA CORRESPONDIENTE SUBASTA.** 2021-04. Inf. téc.
16. **CONSTAIN, Sylvia et al.** *Plan 5G Colombia*. Inf. téc. Gobierno de Colombia MinTic.
17. **CONTRERAS, Violeta.** *Francia ya tiene más de 38 mil sitios 5G | DPL News*, 2023. [blog], [Consulta: 10 diciembre 2023]. Disponible en: <https://dplnews.com/francia-ya-tiene-mas-de-38-mil-sitios-5g/>.
18. **COURTNEY, Martin.** *¿Quién tiene 5G? Un informe acerca del progreso*. [blog]. [Consulta: 16 enero 2024]. Disponible en: <https://www.datacenterdynamics.com/es/features/qui%C3%A9n-tiene-5g-un-informe-acerca-del-progreso/>.
19. **DE LEÓN, Omar.** *Redes 5G en América Latina Desarrollo y potencialidades*. [en línea] Documentos de Proyectos (LC/TS.2022/181/Rev.1), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). [Consulta: 15 diciembre 2023]. Disponible en: <https://issuu.com/publicacionescepal/stacks>.
20. **DELGADO, David,** Evaluación de redes móviles 5G en entornos con aplicaciones IoT(, Trabajo de titulación), Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, España, 2020. Págs. 15-43.
21. **DILLI, Ravilla.** "Analysis of 5G Wireless Systems in FR1 and FR2 Frequency Bands". *Electronics and Communication Engineering* [en línea], 2020, (India), págs. 767-772, [Consulta: 12 enero 2024]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9074973>.
22. **ECONOMISTA,** *Analista sostiene que las pistas sobre la red 5G que llegará a México están en las bandas que tienen AT&T y Telcel*, 2020. [blog], [Consulta: 27 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/analista-sostiene-que-las-pistas-sobre-la-red-5g-que-llegara-mexico-estan-en-las>.
23. **ECONOMISTA,** *Mexicana Telcel comprará bandas radioeléctricas para desarrollar sus redes 5G | AméricaEconomía*, 2023. [blog]. [Consulta: 02 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.americaeconomia.com/negocios-e-industrias/mexicana-telcel-comprara-bandas-radioelectricas-para-desarrollar-sus-redes-5g>.
24. **ENACOM,** *Lineamientos de Gestión 2020/2023*, 2020. [website], [Consulta: 27 noviembre 2023]. Disponible en: [https://www.enacom.gob.ar/lineamientos-de-gestion-20202023\\_p4496](https://www.enacom.gob.ar/lineamientos-de-gestion-20202023_p4496).
25. **ETTUS,** *USRP B210 USB Software Defined Radio (SDR)*. [website], [Consulta: 25 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>.
26. **FIGUEROA, Victor et al.** "5G tecnología inalámbrica que cambiará el mundo por completo". *UNESUM - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria* [en línea], 2022, (Ecuador), vol 6(3), 39-48. Disponible en: <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v6.n3.2022.393>.

27. **GARCÍA, Jesús**, TECNOLOGÍAS 3G, 4G Y 5G: Una perspectiva económica y social de la carrera por la innovación de las redes de banda ancha(, Trabajo de titulación), Universidad Pontificia Comillas, FACULTAD DE CIENCIAS ECONÓMICAS Y EMPRESARIALES (ICADE), Madrid, España, 2019. Pág. 13.
28. **GÓMEZ, Cristina**, Redes Mviles 5G(, Trabajo de titulación), Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, España, 2021. Pág. 24.
29. **GONZALEZ, Carlos**. "Vista de Desafíos de Seguridad en Redes 5G". *TECHNOLOGY inside* [en línea], 2019, (Costa Rica) vol. 3, págs. 38-39, [Consulta: 07 noviembre 2023] Disponible en: <https://cpic-sistemas.or.cr/revista/index.php/technology-inside/article/view/47/47>.
30. **GOORAM**, *5G : What's the NRF ? . The new 5G Core network (5GC)*. [website], [Consulta: 18 febrero 2024]. Disponible en: <https://gooram.medium.com/5g-whats-the-nrf-7db7a83cb1bd>.
31. **GSMA**, *Espectro 5G: Posición de política pública de la GSMA*. Inf. téc. Asociación GSM. Disponible en: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/10/5G-Spectrum-Positions-SPA.pdf>.
32. **GUERREO PINEDA, Marlon Stalin, & Fabricio, ÑACATO PEÑA Ricahrd**, ANÁLISIS DE LA INFRAESTRUCTURA 5G EN LA CIUDAD DE QUITO SECTOR EL RECREO(, Trabajo de titulación), UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA, Quito, Ecuador, 2022. Págs. 10-19.
33. **GUEVARA, Fabián**, Comparativo entre la tecnología de redes 4G Y 5G además de los Beneficios de su implementación en Colombia(, Trabajo de titulación), Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa de Tecnología en Sistemas, Cali, Colombia, 2018. Págs. 61-62.
34. **HUAWEI**, *Tópicos sobre 5G: Recursos de dominio de frecuencia 5G parte 1*. [website]. [Consulta: 29 diciembre 2023]. Disponible en: <https://forum.huawei.com/enterprise/es/t-%C3%B3picos-sobre-5g-recursos-de-dominio-de-frecuencia-5g-parte-1>.
35. **HUERTAS, Victor et al**. *NGN y el camino hacia la 5G*. [en línea] 2<sup>a</sup> ed. Barcelona-España: FUOC, 2019. [Consulta: 27 octubre 2023]. Disponible en: <https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/148658/4/NGNYELCaminoGaciaLa5G.pdf>.
36. *INFORME RESULTADO DE LOS CONCURSOS PÚBLICOS 5G*. Inf. téc. Subsecretaria de Telecomunicaciones. ISBN 1.102.000.000.
37. **KUMAR, Abhijeet**: *Network Repository Function (NRF) | LinkedIn*. [website], [Consulta: 20 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/network-repository-function-nrf-5g-learning-fjwee/>.
38. **LAROCCA, Nicolas**. *Telefónica Alemania alcanza con 5G a 82 % de la población | DPL News*, 2023. [blog], [Consulta: 10 diciembre 2023]. Disponible en: <https://dplnews.com/telefonica-alemania-alcanza-con-5g-a-82-de-la-poblacion/>.
39. **LUCAS-BARTOLO, Nicolas**. *El espectro de 700 MHz, más idóneo para la tecnología 5G por su penetración y cobertura que otras bandas, expone Analysys Mason*, 2021. [blog], [Consulta: 12 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/El-espectro-de-700-MHz-mas-idoneo-para-la-tecnologia-5G-por-su-penetracion-y-cobertura-que-otras-bandas-expone-Analysys-Mason-20210803-0062.html>.

40. **M.2150-1, Recomendación UIT-R:** *Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas terrenales de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2020 (IMT-2020)*. Inf. téc.
41. **MAYORGA BOHORQUEZ, Miguel Angel et al.** "5G EN AMÉRICA ANTECEDENTES Y ANÁLISIS DE DESPLIEGUE". *Universidad Militar Nueva Granada* [en línea], 2021, (Colombia), págs. 4-5, [Consulta: 16 enero 2024]. Disponible en: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/wpecbti/article/download/4809/5181/19866>.
42. **MICHACA, Guadalupe.** *Redes 5G: el poder de las bandas de 600 MHz y 700 MHz – Consumotic*, 2023. [blog], [Consulta: 07 enero 2024]. Disponible en: <https://consumotic.mx/telecom/redes-5g-el-poder-de-las-bandas-de-600-mhz-y-700-mhz/>.
43. **MINTEL, ECUADOR RECIBE LA VALORACIÓN DE LAS BANDAS 2.5 GHZ Y 700 MHZ Y ABRE EL CAMINO PARA LA RENEGOCIACIÓN DE CONTRATOS CON LAS OPERADORAS DE SERVICIO MÓVIL AVANZADO Y NUEVOS SERVICIOS**, 2021. [website], [Consulta: 30 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/ecuador-recibe-la-valoracion-de-las-bandas-2-5-ghz-y-700-mhz-y-abre-el-camino-para-la-renegociacion-de-contratos-con-las-operadoras-de-servicio-movil-avanzado-y-nuevos-servicios/>.
44. **MINTIC, MINTIC publica para comentarios el nuevo proyecto de Decreto que actualiza los topes de espectro y habilita la asignación de espectro para 5G.** [website]. [Consulta: 16 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/195456:MINTIC-publica-para-comentarios-el-nuevo-proyecto-de-Decreto-que-actualiza-los-topes-de-espectro-y-habilita-la-asignacion-de-espectro-para-5G>.
45. *Modulación y multiacceso 5G NR: Visión actual el estándar de capa física.* [blog]. [Consulta: 11 noviembre 2023]. Disponible en: <http://www.grc.ssr.upm.es>.
46. **MROZOWSKI, Arturo, IMPLEMENTACIÓN DEL NÚCLEO DE RED LTE/5G VIRTUALIZADO(, Trabajo de titulación), Universitat Politècnica de Valencia, Telecom Escuela Técnica VLC Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Valencia, España, 2020. Págs. 12-13.**
47. **MTC, MTC autoriza el despliegue de tecnología 5G para servicios móviles**, 2021. [blog], [Consulta: 30 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/482361-mtc-autoriza-el-despliegue-de-tecnologia-5g-para-servicios-moviles>.
48. **ORANGE, Respuesta Consulta 5G Orange.** Inf. téc. Orange España.
49. **PARRA, Raul.** *Canadá subastará espectro en 3.8 GHz para 5G en octubre*, 2023. [blog], [Consulta: 27 noviembre 2023]. Disponible en: <https://dplnews.com/canada-subastara-espectro-en-3-8-ghz-para-5g-en-octubre/>.
50. **PARRA, Raul.** *China supera 3 millones de estaciones base 5G y revoluciona industrias*, 2023. [blog], [Consulta: 07 diciembre 2023]. Disponible en: <https://dplnews.com/china-supera-3-millones-de-estaciones-base-5g-y-revoluciona-industrias/>.
51. **PERUANO, Decreto Supremo que aprueba el Reglamento Específico para el Reordenamiento de una banda de frecuencias.** [blog]. [Consulta: 23 noviembre 2023]. Disponible en: <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1707888-2>.

52. *Plan Nacional 5G 2018-2020*. Inf. téc. MINISTERIO DE ENERGÍA, TURISMO Y AGENDA DIGITAL. [https://avancedigital.mineco.gob.es/5G/Documents/plan\\_nacional\\_5g.pdf](https://avancedigital.mineco.gob.es/5G/Documents/plan_nacional_5g.pdf).
53. *Plano Estrutural de Redes de Telecomunicações - PERT*, 2019. [blog]. [Consulta: 06 enero 2024]. Disponible en: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/dados/infraestrutura/pert>.
54. **PROXICAST**, *ANT-120-0083-6dBi Omni-Directional 4G/5G/CBRSTerminal Antenna*, 2023. [datasheet], [Consulta: 25 febrero 2024]. Disponible en: [www.proxicast.com](http://www.proxicast.com).
55. **PULPO**, *Expansión vertiginosa de la tecnología 5G en el mundo*. 2022. [New], [Consulta: 24 enero 2024]. Disponible en: <https://pulpo.ec/blog/tecnologia/expansion-vertiginosa-de-la-tecnologia-5g-en-el-mundo/>.
56. **RAMIRES, Anderson**: *Desarrollo de infraestructura, ¿obstáculo para la digitalización?* [blog]. [Consulta: 15 enero 2024]. Disponible en: <https://expansion.mx/opinion/2023/04/21/desarrollo-de-infraestructura-obstaculo-para-la-digitalizacion>.
57. **RESTREPO, Joaquín**. *Normas de la UIT y armonización de espectro*, 2019. [blog]. [Consulta: 24 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regulatory-Market/Documents/Events2019/SantoDomingo/5G-Workshop/Taller.pdf>.
58. **SAN MARTIN, Julio**. "Impacto en la productividad por el uso de tecnologías 5G en Ecuador". *Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)* [en línea], 2020, (Ecuador), págs. 51-55, [Consulta: 22 diciembre 2023]. Disponible en: .
59. **SHAREAMERICA**, *La ampliación de la Iniciativa Red Limpia protege los datos*, 2020. [blog], [Consulta: 27 noviembre 2023]. Disponible en: <https://share.america.gov/es/la-ampliacion-de-la-iniciativa-red-limpia-protege-los-datos/>.
60. *Sistemas de Telecomunicación*, 2018. [en línea]. Valencia-España [Consulta: 21 septiembre 2023]. Disponible en: <https://www.uv.es/hertz/hertz/Docencia/trabajos/Tema1.pdf>.
61. **SLEIMAN, Danny**: *RF and 5G new radio: top 5 questions answered*. [blog], 2021. [Consulta: 30 enero 2024]. Disponible en: <https://www.exfo.com/en/resources/blog/5g-new-radio-top-5-questions>.
62. **SMARTGSM**, *Xiaomi Redmi Note 12 Pro*. [blog], [Consulta: 28 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.smart-gsm.com/moviles/xiaomi-redmi-note-12-pro>.
63. **SPENCER, Leon**. *Which Asian countries are leading the 5G race?*, 2021. [blog], [Consulta: 05 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.channelasia.tech/article/687897/which-asian-countries-leading-5g-race/>.
64. **SRSRAN**, *5GSACOTSUE*. [blog]. [Consulta: 06 enero 2024]. Disponible en: <https://docs.srsran.com/projects/4g/en/latest/appn>.
65. **TAIPE, Gabriel**, DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA DE UNA RED 5G PARA LA CIUDAD DE AMBATO(, Trabajo de titulación), UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, 2022. Págs. 19-20.
66. **TECHPLAYON**, *5G NR SS-RSRP Value Measurement Mapping*. 2021-08. [website], [Consulta: 24 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.techplayon.com/5g-nr-ss-rsrp-value-measurement-mapping/>.
67. **TECHPLAYON**, *5G Measurements - RSRP, RSSI, RSRQ and SINR*. 2023-11. [website], [Consulta: 23 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.techplayon.com/5g-nr-measurements-rsrp-rssi-rsrq-and-sinr/>.

68. **TECHPLAYON**, *5G NR RSRQ Measurements and Its Mapping*. 2023-10. [website], [Consulta: 24 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.techplayon.com/5g-nr-rsrq-measurements-and-its-mapping/>.
69. **THESTAR**, *Malaysia leads the way in 5G connectivity, says Opensignal report*. [blog]. [Consulta: 15 enero 2024]. Disponible en: <https://www.mcmc.gov.my/en/media/press-clippings/malaysia-leads-the-way-in-5g-connectivity-says-ope>.
70. **TOMAS, Juan Pedro**. *South Korea ends 2022 with over 28 million 5G subscribers, 2023*. [blog], [Consulta: 20 noviembre 2023]. Disponible en: <https://www.rcrwireless.com/20230207/5g/south-korea-ends-2022-over-28-million-5g-subscribers>.
71. **UIT**, *Quinta generación de tecnologías móviles*, 2018. [blog]. [Consulta: 14 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>.
72. **UIT-R**, *Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas terrenales de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (IMT 2020) Serie M Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos*, 2020. [blog]. [Consulta: 02 diciembre 2023]. Disponible en: <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>.
73. *United States–Estonia Joint Declaration on 5G Security*. 2019-11. Inf. téc. U.S. Embassy Tallinn. <https://ee.usembassy.gov/joint-declaration-on-5g/>.
74. **VALENTINROJAS, Felipe Donato**, PROSPECTIVA TECNOLÓGICA DEL 5G EN EL DESARROLLO DE SMART CITY(, Trabajo de titulación), PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ ESCUELA DE POSGRADO, Lima, Perú, 2021. Págs. 5-6.
75. **VALERO, Claudio**. *Frecuencias y bandas 2G, 3G, 4G y 5G en España - operadores móviles*, 2023. [blog], [Consulta: 11 febrero 2024]. Disponible en: <https://www.adslzone.net/operadores/en-detalle/frecuencias-moviles-espana/>.
76. **VARGAS, Servando**. *Los pasos de Colombia hacia 5G*, 2021. [blog], [Consulta: 28 noviembre 2023]. Disponible en: <https://dplnews.com/los-pasos-de-colombia-hacia-5g/>.
77. **VEGA, Andy**. *Radio Definido por Software*, 2020. [blog], [Consulta: 30 noviembre 2023]. Disponible en: <https://telecomunicaciones.edu.ec/repositorio/articulos-blog/redes/radio-definido-por-software>.
78. **VERGARA BARRIOS, Edgardo Andres**, Estudio del rendimiento de nuevas numerologías para sistemas Beyond 5G en la banda de sub-THz(, Trabajo de titulación), Universitat Politècnica de Valencia, Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM, Valencia, España, 2020. Pág. 13.
79. **WITTE, Bob**. *The basics of 5G's modulation, OFDM*, 2020. [Website]. [Consulta: 24 enero 2024]. Disponible en: <https://www.5gtechnologyworld.com/the-basics-of-5gs-modulation-ofdm/>.
80. **WOYKE, Elizabeth, & MILUTINOVIC, Ana**: *Cinco argumentos que pueden convertir a China en líder del 5G*. [blog]. [Consulta: 02 enero 2024]. Disponible en: <https://www.technologyreview.es/s/10828/cinco-argumentos-que-pueden-convertir-china-en-lider-del-5g>.



## ANEXOS

### ANEXO A: Red 5G SA



**Ilustración 5-1:** USRP B210 con antena ANT-120-008



**Ilustración 5-2:** Mediciones de cobertura cercanas



**Ilustración 5-3:** Mediciones de cobertura intermedias



**Ilustración 5-4:** Mediciones de cobertura lejanas

## ANEXO B: Instalación del core Open5GS

Construir Open5GS desde las fuentes Obtener MongoDB Importa la clave pública utilizada por el sistema de gestión de paquetes con los siguientes comandos:

- `$ sudo apt update`
- `$ sudo install gnupg`
- `$ curl -fsSL https://pgp.mongodb.com/server-6.0.asc |`
- `sudo gpg -o /usr/share/keyrings/mongodb-server-6.0.gpg --dearmor`

Cree el archivo de lista `/etc/apt/sources.list.d/mongodb-org-6.0.list` para su versión de Ubuntu. En ubuntu 22.04 (Jammy)

- `$ echo "deb [ arch=amd64,arm64 signed-by=/usr/share/keyrings/mongodb-server-6.0.gpg] https://repo.mongodb.org/apt/ubuntu jammy/mongodb-org/6.0 multiverse"| sudo tee /etc/apt/sources.list.d/mongodb-org-6.0.list`

Instale los paquetes de MongoDB.

- `$ sudo apt update`
- `$ sudo apt install -y mongodb-org`
- `$ sudo systemctl start mongod (if '/usr/bin/mongod' is not running)`
- `$ sudo systemctl enable mongod (ensure to automatically start it on system boot)`

MongoDB se utiliza como base de datos para NRF/PCF/UDR y PCRF/HSS.

Configuración del dispositivo TUN

Crea el dispositivo TUN con el nombre de interfaz `ogstun`.

- `$ sudo ip tuntap add name ogstun mode tun`
- `$ sudo ip addr add 10.45.0.1/16 dev ogstun`
- `$ sudo ip addr add 2001:db8:cafe::1/48 dev ogstun`
- `$ sudo ip link set ogstun up`

## Construir Open5GS

Instale las dependencias para construir el código fuente.

- `$ sudo apt install python3-pip python3-setuptools python3-wheel ninja-build build-essential flex bison git cmake libsctp-dev libgnutls28-dev libgcrypt-dev libssl-dev libidn11-dev libmongoc-dev libbson-dev libyaml-dev libnghttp2-dev libmicrohttpd-dev libcurl4-gnutls-dev libnghttp2-dev libtins-dev libtalloc-dev meson`

Git clone.

- `$ git clone https://github.com/open5gs/open5gs`

Para compilar con meson:

- `$ cd open5gs`
- `$ meson build --prefix='pwd'/install`
- `$ ninja -C build`

Compruebe si la compilación es correcta.

- `$ ./build/tests/attach/attach ## EPC Only`
- `$ ./build/tests/registration/registration ## 5G Core Only`

Ejecute todos los programas de prueba como se indica a continuación.

- `$ cd build`
- `$ meson test -v`

Debe realizar el proceso de instalación.

- `$ cd build`

- `$ ninja install`
- `$ cd ../`

### Ejecutar Open5GS

Para probar que las funciones del núcleo operen correctamente, se debe ejecutar los siguientes comandos dentro del directorio de open5G:

- `$ cd open5gs`
- `./install/bin/open5gs-nrfd`
- `./install/bin/open5gs-scpd`
- `./install/bin/open5gs-amfd`
- `./install/bin/open5gs-smfd`
- `./install/bin/open5gs-upfd`
- `./install/bin/open5gs-ausfd`
- `./install/bin/open5gs-udmd`
- `./install/bin/open5gs-pcfd`
- `./install/bin/open5gs-nssfd`
- `./install/bin/open5gs-bsfd`
- `./install/bin/open5gs-udrd`
- `./install/bin/open5gs-mmed`
- `./install/bin/open5gs-sgwcd`
- `./install/bin/open5gs-sgwud`
- `./install/bin/open5gs-hssd`
- `./install/bin/open5gs-pcrfd`

Para mayor comodidad, puede ejecutar todas las NF a la vez utilizando el siguiente comando:

- `$ ./build/tests/app/5gc ## 5G Core Only with ./build/configs/sample.yaml`

- `$ ./build/tests/app/epc -c ./build/configs/srslte.yaml ## EPC Only with ./build/configs/srslte.yaml`
- `$ ./build/tests/app/app ## Both 5G Core and EPC with ./build/configs/sample.yaml`

## Construyendo la WebUI de Open5GS

Node.js es necesario para construir WebUI de Open5GS

- `# Download and import the Nodesource GPG key`
- `$ sudo apt update`
- `$ sudo apt install -y ca-certificates curl gnupg`
- `$ sudo mkdir -p /etc/apt/keyrings`
- `$ curl -fsSL https://deb.nodesource.com/gpgkey/nodesource-repo.gpg.key | sudo gpg --dearmor -o /etc/apt/keyrings/nodesource.gpg`
- `# Create deb repository`
- `$ NODE_MAJOR=20`
- `$ echo "deb[signed-by=/etc/apt/keyrings/nodesource.gpg]https://deb.nodesource.com/node_${NODE_MAJOR}.x nodistro main" | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/nodesource.list`
- `# Run Update and Install`
- `$ sudo apt update`
- `$ sudo apt install nodejs -y`

Instala las dependencias para ejecutar WebUI

- `$ cd webui`
- `$ npm ci`

La WebUI se ejecuta como un script npm.

- `$ npm run dev`

Registrar información de abonado

Conéctese a <http://127.0.0.1:3000> e inicie sesión con la cuenta de administrador.

Nombre de usuario : admin

Contraseña : 1423

Nota: Puede cambiar la contraseña en el menú Cuenta.

Para añadir información de abonado, puede realizar las operaciones de WebUI en el siguiente orden:

- Vaya al menú de abonados.
- Pulse el botón + para añadir un nuevo abonado.
- Introduzca el IMSI, el contexto de seguridad (K, OPc, AMF) y el APN del abonado.
- Pulse el botón GUARDAR.

#### **ANEXO C:** Instalación de srsRAN

Para descargar y compilar el proyecto srsRAN es necesario seguir los siguientes pasos:

- Instalar dependencias
- Instalar el controlador RF
- Clonar el repositorio
- Construir el código base

Herramientas de compilación y dependencias

El proyecto srsRAN utiliza CMake y C++14. Recomendamos las siguientes herramientas de compilación:

- Cmake
- gcc (v9.4.0 o posterior) O Clang (v10.0.0 o posterior)

El Proyecto srsRAN tiene las siguientes dependencias necesarias:

- libfftw
- libsctp

- yaml-cpp
- PolarSSL/mbedtls
- Googletest

Se puede instalar las herramientas de compilación y las dependencias necesarias para varias distribuciones para Ubuntu 22.04 con el siguiente comando:

- `sudo apt-get install cmake make gcc g++ pkg-config libfftw3-dev libmbedtls-dev libsctp-dev libyaml-cpp-dev libgtest-dev`

También se recomienda instalar lo siguiente, no es obligatorio, pero de manera personal funcionó:

- Ccache: Esto ayudará a acelerar la re-compilación
- backward-cpp: Esta librería ayuda a generar backtraces más informativos en la salida estándar si se produce un error durante la ejecución.

## Controladores RF

El proyecto srsRAN utiliza controladores RF para soportar diferentes tipos de radio.

En la actualidad, solo admite UHD, pero se están desarrollando controladores adicionales:

En primer lugar, clone el repositorio del Proyecto srsRAN:

- `git clone https://github.com/srsRAN/srsRAN_Project.git`

A continuación, construye el código base:

- `cd srsRAN_Project`
- `mkdir build`
- `cd build`
- `cmake ../`
- `make -j $(nproc)`
- `make test -j $(nproc)`

Ahora se puede ejecutar el gNB desde el directorio srsRAN\_Project/build/apps/gnb/.

Para instalar el srsRAN Project gNB se puede utilizar el siguiente comando:

- sudo make install

## **ANEXO D:** Programación de la tarjeta SIM

Instalar PYSIM

- git clone <https://gitea.osmocom.org/sim-card/pysim>
- cd pysim

Desactivación de los servicios

- ./pySim-shell.py -p 0
- verify\_adm XXXXXXXXX (Poner el código AMF correspondiente)
- select MF
- select ADF.USIM
- select EF.UST
- read\_binary\_decoded
- ust\_service\_deactivate 123
- ust\_service\_activate 124

## **ANEXO E:** Aplicaciones para las mediciones



Ilustración 5-5: Mediciones de velocidad.

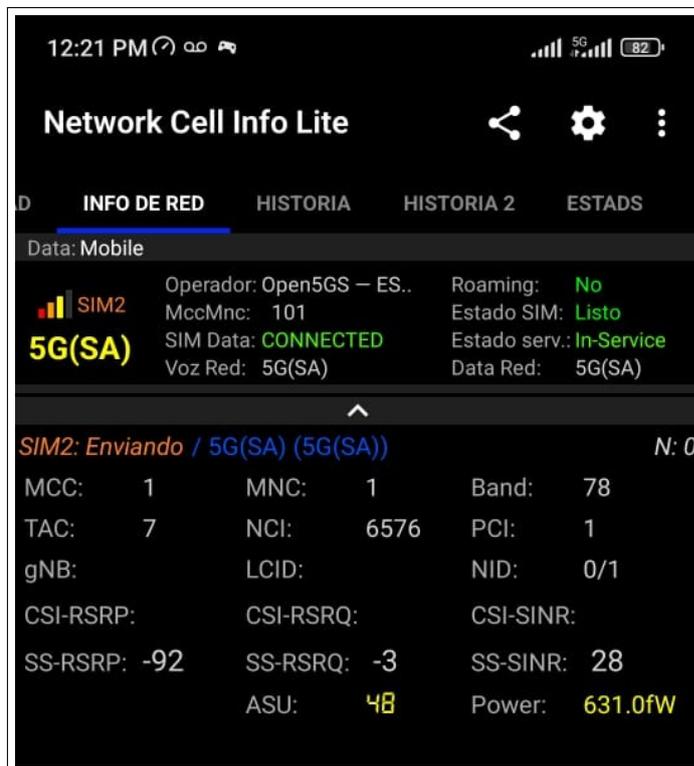
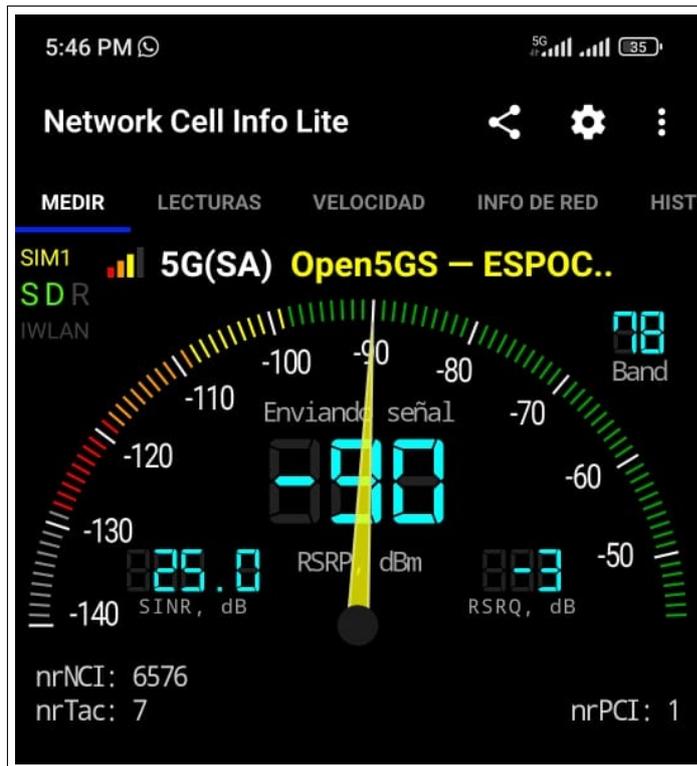


Ilustración 5-6: Datos de cobertura en la aplicación

```
12:42 PM 5G 79
host: 10.45.0.1 >
PING 10.45.0.1 (10.45.0.1) 56(84) bytes of data.
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=1 ttl=64 time=20.3 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=2 ttl=64 time=9.23 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=3 ttl=64 time=25.0 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=4 ttl=64 time=20.0 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=5 ttl=64 time=34.4 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=6 ttl=64 time=33.1 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=7 ttl=64 time=26.8 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=8 ttl=64 time=20.1 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=9 ttl=64 time=36.3 ms
64 bytes from 10.45.0.1: icmp_seq=10 ttl=64 time=31.4 ms
--- 10.45.0.1 ping statistics ---
10 packets transmitted, 10 received, 0% packet loss, time 9039ms
rtt min/avg/max/mdev =
9.230/25.707/36.367/8.014 ms
```

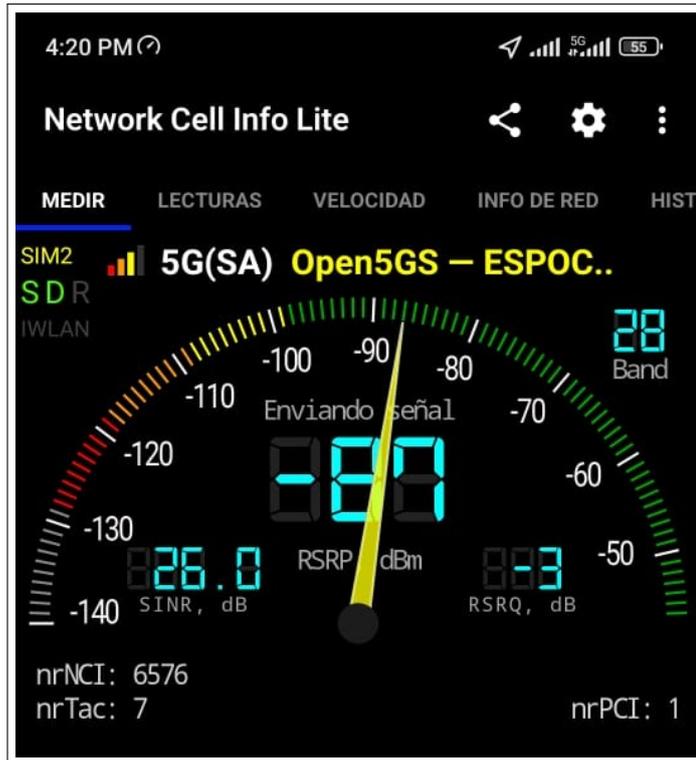
**Ilustración 5-7:** Mediciones de latencia



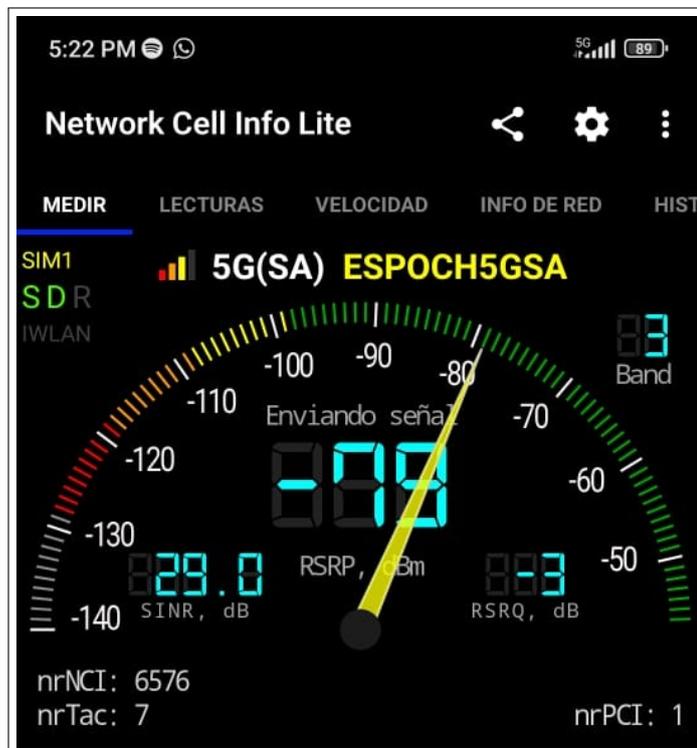
**Ilustración 5-8:** Datos de cobertura n78



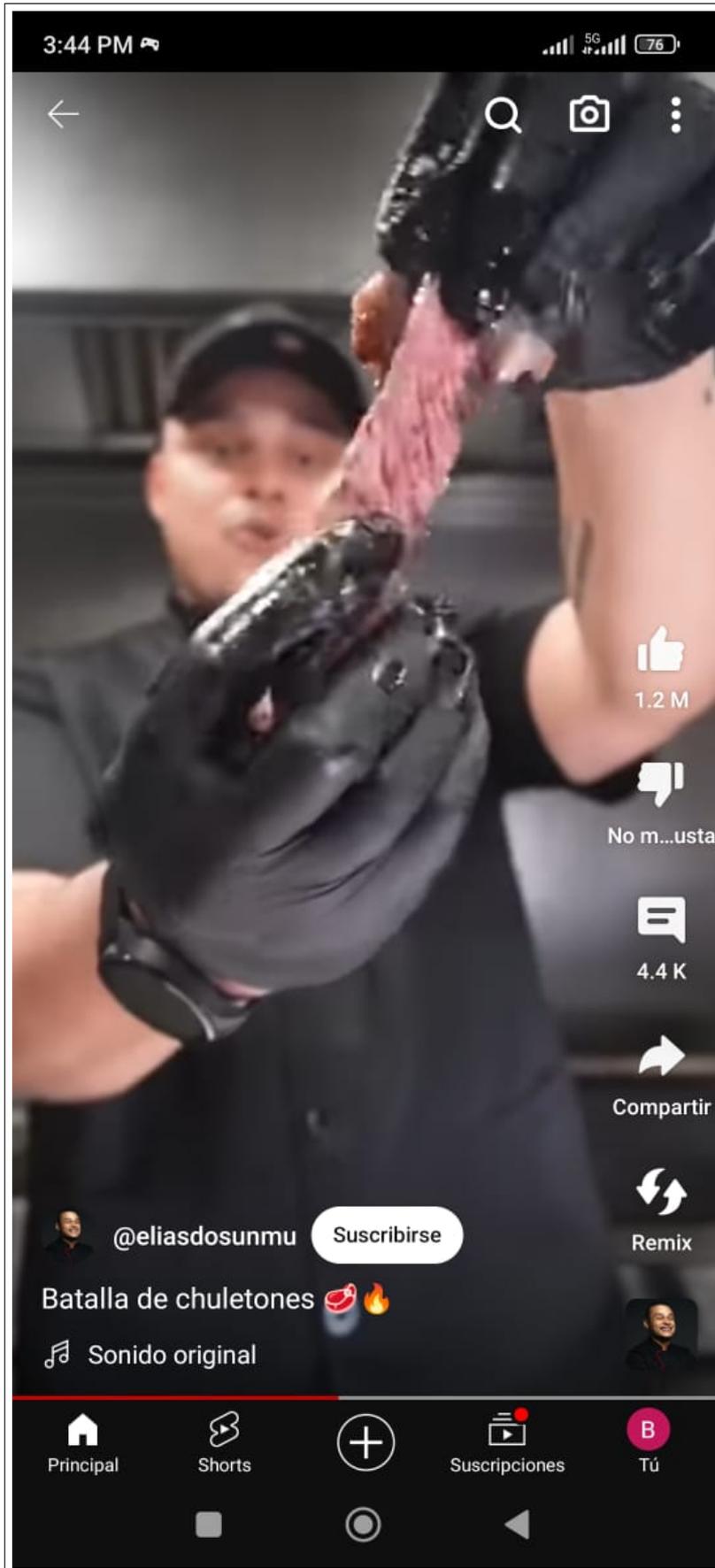
**Ilustración 5-9:** Datos de cobertura n40



**Ilustración 5-10:** Datos de cobertura n28



**Ilustración 5-11:** Datos de cobertura n3



**Ilustración 5-12:** Visualización de un video en Youtube con la red 5G



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA**  
**NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO**

**Fecha de entrega:** 09/ 04 / 2024

**INFORMACIÓN DEL AUTOR**

**Nombres-Apellidos:** Byron Stalyn – Mayorga Orozco

**INFORMACIÓN INSTITUCIONAL**

**Facultad:** Informática y Electrónica

**Carrera:** Telecomunicaciones

**Título a optar:** Ingeniero en Telecomunicaciones

**Ing. Paúl David Moreno Avilés PhD**  
**Director del Trabajo de Titulación**

**Ing. Jefferson Alexander Ribadeneira Ramírez PhD**  
**Asesor del Trabajo de Titulación**