



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE TELEMÁTICA

Trabajo de Integración Curricular previa
la obtención del Grado Académico de
Ingeniera en Telemática.

Título del Proyecto de Investigación:

**RENDIMIENTO DEL ESPECTRO DINÁMICO COMPARTIDO EN ESCENARIOS DE
ALTA DENSIDAD DE TRÁFICO**

Autor:

Kiara Julissa Intriago Posligua

Director del Proyecto de Investigación:

Ing. Ángel Ivan Torres Quijije, M. Sc

Quevedo – Los Ríos – Ecuador

2025



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, **Kiara Julissa Intriago Posligua**, declaro que la investigación aquí descrita es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Técnica Estatal de Quevedo, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Kiara Intriago.

Kiara Julissa Intriago Posligua

C.I: 094255445-2



CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

El suscrito, **Ing. Ángel Ivan Torres Quijije, M. Sc**, Docente de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, certifica que la estudiante **Kiara Julissa Intriago Posligua**, realizó el Proyecto de Investigación de grado titulado **“RENDIMIENTO DEL ESPECTRO DINÁMICO COMPARTIDO EN ESCENARIOS DE ALTA DENSIDAD DE TRÁFICO”**, previo a la obtención del título de **Ingeniera en Telemática**, bajo mi dirección, habiendo cumplido con las disposiciones reglamentarias establecidas para el efecto.

Ing. Ángel Ivan Torres Quijije, M. Sc
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO

El suscrito, **Ing. Ángel Ivan Torres Quijije, M. Sc**, mediante el presente cumpla en presentar a usted, el informe de proyecto de Investigación titulado **“RENDIMIENTO DEL ESPECTRO DINÁMICO COMPARTIDO EN ESCENARIOS DE ALTA DENSIDAD DE TRÁFICO”** Presentado por la estudiante **Kiara Julissa Intriago Posligua**, egresada de la **Carrera de Telemática**, que fue revisado bajo mi dirección según resolución del Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, que se ha desarrollado de acuerdo al Reglamento de la Unidad de Integración Curricular de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y cumple con el requerimiento de análisis de COMPILATIO el cual avala los niveles de originalidad en un 96% y similitud 4%, del trabajo investigativo. Valido este documento para que el estudiante siga con los trámites pertinentes, de acuerdo como lo establece el Reglamento.

 CERTIFICADO DE ANÁLISIS magister		
tesis_casi_terminadoKIARA		
4% Textos sospechosos		4% Similitudes < 1% similitudes entre comillas 0% entre las fuentes mencionadas 0% Idiomas no reconocidos
Nombre del documento: tesis_casLterminadoKIARA.pdf ID del documento: 3b9bb46e9ac97478e39b12115c90c441d1ae092 Tamaño del documento original: 1,84 MB	Depositante: ANGEL IVAN TORRES QUIJJE Fecha de depósito: 12/5/2025 Tipo de carga: Interface fecha de fin de análisis: 12/5/2025	Número de palabras: 21.281 Número de caracteres: 155.313


Ing. Ángel Ivan Torres Quijije, M. Sc

DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



UNIVERSIDAD TÉCNICA ESTATAL DE QUEVEDO
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE TELEMÁTICA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título:

**“RENDIMIENTO DEL ESPECTRO DINÁMICO COMPARTIDO EN
ESCENARIOS DE ALTA DENSIDAD DE TRÁFICO”**

Presentado al Consejo Directivo de Facultad como requisito previo a la obtención del título de
Ingeniera en Telemática.

Aprobado por:

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Byron Wladimir Oviedo Bayas, PhD.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. Eduardo Amable Samaniego Mena

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Ing. José Luis Tubay Vergara

QUEVEDO – LOS RÍOS – ECUADOR

2025

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a Dios por haberme sostenido en cada etapa de este camino, brindándome fortaleza en los momentos difíciles, sabiduría en las decisiones y gratitud ante cada oportunidad que se presentó a lo largo de este proceso académico.

Estoy eternamente agradecida con mi madre, quien ha sido mi guía, mi amiga y ha asumido con valentía los roles de madre y padre, gracias por encaminarme con amor, por tus sacrificios silenciosos y por velar siempre por mi bienestar. A mi padre, Wilson Vintimilla, le agradezco profundamente por haberme criado con dedicación, principios, esfuerzo y tu ejemplo de perseverancia y fortaleza ha sido fundamental para alcanzar esta meta.

A mis tíos Mirella y Francisco, valoro profundamente su apoyo constante y las palabras de aliento que supieron darme en los momentos adecuados. A mis amigos Eduardo, José, Junior, Deyber, Steven y Daira, gracias por estar presentes, por su apoyo sincero y por tenderme la mano cuando más lo necesité.

Agradezco sinceramente a mis docentes por su dedicación, guía y compromiso durante mi formación en especial al Ingeniero Ángel Torres por ser la única persona que creyó en mí, su confianza, apoyo y palabras oportunas marcaron una gran diferencia en mi camino, gracias por ver en mí el potencial que a veces incluso yo dudaba tener y a la Universidad Técnica Estatal de Quevedo por abrirme las puertas ofreciéndome un espacio de aprendizaje que contribuyó de manera significativa a mi crecimiento académico y personal.

DEDICATORIA

Desde el inicio, esta carrera tuvo un motivo especial, tú mamita Elena mi viejita linda. Siempre imaginé que al llegar este momento estarías en primera fila, con tu sonrisa orgullosa y tus ojos llenos de amor. Aunque la vida no lo permitió, tu presencia ha estado en cada paso, en cada esfuerzo, en cada logro. Esta tesis no solo es un proyecto académico, es un homenaje a tu memoria a todo lo que sembraste en mí, porque más que inspiración, fuiste el motor que me impulsó a seguir adelante, aquí estoy honrando la promesa que te hice mis ojitos azules.

Mamá este logro es tuyo, con el alma llena de gratitud madre gracias por ser mi fuerza, mi mayor amor, hoy y siempre pido a Dios salud y larga vida para ti. A mis hermanas por su amor sin medida y por enseñarme a no rendirme nunca.

A mi Abuelito Agapito Posligua el más feliz de que pase este proceso, a esperando tanto este momento, ahora si puedas decir mi Ingeriera papito de mi corazón. También dedico esta meta a mi pareja Josue Triana, por estar a mi lado en cada paso, brindándome apoyo, paciencia y amor incondicional, gracias por ser mi compañero en los momentos más exigentes y por impulsarme siempre a dar lo mejor de mí, ahora si amor si se pudo.

RESUMEN Y PALABRAS CLAVES

El presente proyecto de investigación analiza el impacto del crecimiento acelerado de las redes móviles sobre la demanda de espectro radioeléctrico, destacando la compartición dinámica del espectro (DSS), una tecnología que facilita la coexistencia simultánea de 4G LTE y 5G NR en las mismas bandas de frecuencia. DSS permite una transición gradual entre generaciones tecnológicas sin la necesidad de reasignar espectro exclusivo para cada red. Este estudio evalúa el desempeño de DSS en escenarios de alta densidad de tráfico mediante simulaciones en OMNeT++, utilizando las herramientas Simu5G e INET para modelar redes bajo un esquema FDD (Frequency Division Duplexing). Los resultados muestran que DSS mejora la eficiencia en la utilización del espectro y posibilita el despliegue de redes 5G sobre bandas bajas, ampliando la cobertura sin afectar la continuidad de los servicios LTE. Sin embargo, su implementación presenta desafíos técnicos, como la interferencia entre señales y la sobrecarga en la señalización, lo que puede limitar la capacidad global de la red. A pesar de estas dificultades, DSS se posiciona como una solución viable para los operadores que buscan modernizar infraestructuras sin la necesidad de adquirir nuevo espectro, ofreciendo una transición flexible y eficiente. Los hallazgos de esta investigación confirman que DSS es clave para la evolución de las telecomunicaciones, permitiendo una gestión inteligente del espectro y asegurando la continuidad de los servicios móviles avanzados.

Palabras clave: Gestión espectral, Acceso compartido, Redes móviles, Optimización de recursos, Eficiencia espectral.

ABSTRACT AND KEYWORDS

This research project analyzes the impact of the rapid growth of mobile networks on the demand for radio frequency spectrum, highlighting Dynamic Spectrum Sharing (DSS), a technology that enables the simultaneous coexistence of 4G LTE and 5G NR within the same frequency bands. DSS allows a gradual transition between technological generations without the need to reallocate exclusive spectrum for each network. This study evaluates the performance of DSS in high traffic density scenarios through simulations in OMNeT++, using the Simu5G and INET tools to model networks under a Frequency Division Duplexing (FDD) scheme. The results show that DSS improves spectrum utilization efficiency and enables the deployment of 5G networks on low bands, extending coverage without affecting the continuity of existing LTE services. However, its implementation presents technical challenges such as signal interference and signaling overload, which may limit the overall capacity of the network. Despite these difficulties, DSS is positioned as a viable solution for operators looking to modernize infrastructures without acquiring new spectrum, offering a flexible and efficient transition. The findings of this research confirm that DSS is key to the evolution of telecommunications, enabling intelligent spectrum management and ensuring the continuity of advanced mobile services.

Keywords: Spectrum management, Optimization, Coexistence, Simulations, Efficiency, Transition.

TABLA DE CONTENIDO

PORTADA	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii
CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	iii
CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO.....	iv
PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTO	vi
DEDICATORIA.....	vii
RESUMEN Y PALABRAS CLAVES	viii
ABSTRACT AND KEYWORDS	ix
TABLA DE CONTENIDO	x
CÓDIGO DUBLIN.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	4
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1 Problema de investigación.....	5
1.1.1 Planteamiento del problema.....	5
1.1.2 Formulación del problema.	6
1.1.3 Sistematización del problema.....	6
1.2 Objetivos.....	6
1.2.1 Objetivo general.	6
1.2.2 Objetivos específicos	6

1.3	Justificación.....	7
CAPÍTULO II.....		9
MARCO TEÓRICO		9
2.1.	Marco conceptual	10
2.1.1.	<i>Redes móviles.</i>	10
2.1.2.	<i>Tecnología 5G.</i>	10
2.1.2.1.	<i>Aspectos de la tecnología 5G.</i>	10
2.1.2.2.	<i>Arquitectura 5G</i>	11
2.1.3.	<i>Espectro radioeléctrico</i>	12
2.1.3.1.	<i>Análisis del espectro radioeléctrico para la utilización de la tecnología 5G</i> 12	
2.1.4.	<i>Estructura técnica del DSS</i>	13
2.1.4.1.	<i>Estructura de trama y flexibilidad en LTE y 5G NR para DSS</i>	13
2.1.5.	<i>Despliegue de redes 5G en modo no autónomo.</i>	13
2.1.6.	<i>Espectro dinámico compartido (DSS)</i>	14
2.1.6.1.	<i>Asignación de recursos en DSS</i>	14
2.1.6.2.	<i>Características del DSS:</i>	15
2.1.6.3.	<i>Ventajas y desafíos del DSS</i>	15
2.1.6.4.	<i>Capas del protocolo en el Dynamic Spectrum Sharing (DSS)</i>	16
2.1.6.5.	<i>Importancia del DSS en la tecnología 5G</i>	17
2.1.6.6.	<i>Funcionamiento del DSS</i>	18
2.1.6.7.	<i>Tecnologías complementarias del DSS</i>	18
2.1.6.8.	<i>Técnicas principales basada en (DSS)</i>	19
2.1.6.9.	<i>Asignación comercial del espectro</i>	20
2.1.6.10.	<i>Mecanismos de implementación del DSS</i>	20

2.1.6.11.	<i>Implementación y aplicaciones del DSS.....</i>	22
2.1.6.12.	<i>Aplicaciones de DSS.....</i>	22
2.1.6.13.	<i>Beneficios de la compartición de espectro.</i>	23
2.1.6.14.	<i>Bandas en las que se trabaja el espectro.</i>	23
2.1.6.15.	<i>Funcionamiento 5G en DSS</i>	23
2.1.6.16.	<i>Estructura y elementos clave en DSS</i>	25
2.1.6.17.	<i>Clasificación y modos de implementación del DSS.....</i>	26
2.1.6.18.	<i>Transferencia de señales de control en DSS</i>	26
2.1.6.19.	<i>Utilización de MBSFN para DSS</i>	27
2.1.6.20.	<i>Requisitos técnicos del DSS.....</i>	27
2.1.7.	<i>Interferencia en redes móviles.....</i>	28
2.1.7.1.	<i>Causas de la interferencia.....</i>	29
2.1.8.	<i>Alta Densidad de tráfico en redes móviles.</i>	29
2.1.8.1.	<i>Soluciones y estrategias para manejar alta densidad.</i>	29
2.1.9.	<i>Métricas de Rendimiento en Redes de Alta Densidad.....</i>	30
2.1.	<i>Marco referencial.....</i>	32
2.1.1.	<i>Compartición dinámica del espectro (DSS) para 5G y LTE: generación y análisis de señales.....</i>	32
2.1.2.	<i>Compartición dinámica del espectro para futuras redes LTE-NR.....</i>	33
2.1.3.	<i>Implementación de pequeños transmisores en un esquema de compartición del espectro. 33</i>	
2.1.4.	<i>Dynamic Spectrum Sharing.....</i>	33
2.1.5.	<i>Uso compartido dinámico del espectro y coexistencia con comunicaciones de dispositivo a dispositivo full duplex en redes 5G.....</i>	34
2.2.	<i>Marco legal.....</i>	34
2.2.1.	<i>Ley Orgánica de Telecomunicaciones.....</i>	34

CAPÍTULO III	36
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	36
3.1. Localización.....	37
3.2. Tipo de investigación.....	37
3.2.1. Investigación bibliográfica.....	37
3.2.2. Investigación descriptiva.....	38
3.2.3. Investigación comparativa.	38
3.3. Diseño Cuasi-Experimental.....	38
3.4. Métodos de investigación.	39
3.4.1. Método cuantitativo.....	39
3.4.2. Método bibliográfico.....	39
3.4.3. Método Cuasi-Experimental.....	39
3.5. Fuentes de recopilación de información.....	39
3.5.1. Fuentes primarias.....	40
3.5.2. Fuentes secundarias.	40
3.6. Diseño de investigación.....	40
3.6.1. Estudio e investigación.....	40
3.6.2. Fases del estudio.	40
3.7. Instrumentos de investigación.	42
3.8. Tratamiento de los datos.....	42
3.9. Recursos humanos y materiales.....	43
3.9.1. Talento humano.....	43
3.9.2. Equipo de investigación.....	43
3.9.3. Selección de la herramienta de simulación.....	44
3.9.4. Recurso del Software.....	45

CAPÍTULO IV	46
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	46
4.1. Primer resultado.....	47
4.1.1. Identificación de Métricas.....	47
4.2. Segundo resultado.....	50
4.2.1. Simulación de escenarios y parámetros	50
4.2.2. Código de configuración en OMNeT++	50
4.2.3. Demostración de la simulación en escenario de 5G y DSS.	52
4.2.4. Throughput promedio de LTE-5G-DSS.....	55
4.2.5. Paquetes perdidos en LTE-5G DSS.....	56
4.2.6. Delay en LTE-5G DSS.....	56
4.2.7. SIRN en LTE-5G DSS.	57
4.2.8. CQI en LTE-5G DSS.....	58
4.3. Tercer Resultado.....	59
4.3.1. Comparación Troughput promedio en escenarios LTE, NR, DSS.	59
4.3.2. Comparación Delay promedio en escenarios LTE, NR, DSS.....	61
4.3.3. Comparación de promedio de paquetes perdidos en escenarios LTE, NR, DSS.	62
4.3.4. Comparación SINR promedio en escenarios LTE, NR, DSS.....	63
4.3.5. Comparación CQI promedio en escenarios LTE, NR, DSS.	64
4.4. Discusión de resultados	65
CAPÍTULO V.....	66
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
5.1. CONCUSIONES	67
5.2. RECOMENDACIONES	68

CAPÍTULO VI	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
CAPÍTULO VII.....	78
ANEXOS	78

Índice de Figura

Figura 1. Arquitectura 5G.....	11
Figura 2. Soluciones de Proveedores.....	14
Figura 3. Formas de compartición dinámico del espectro.....	20
Figura 4. Locación de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo	37
Figura 5. Escenario5G con 100 usuarios	53
Figura 6. Escenario DSS con 100 usuarios.....	53
Figura 7. Escenario DSS con 150 usuarios.....	54
Figura 8. Escenario DSS con 200 usuarios.....	54
Figura 9. Throughput promedio de LTE-5G-DSS.....	55
Figura 10. Promedio de paquetes perdidos en LTE-5G DSS.	56
Figura 11. Promedio de Delay en LTE-5G DSS.	57
Figura 12. Promedio de SIRN en LTE-5G DSS.....	58
Figura 13. Promedio de QCI en LTE-5G-DSS.....	59
Figura 14. Promedio de Troughput en escenarios LTE, NR, DSS.	60
Figura 15. Promedio de Delay en escenarios LTE, NR, DSS.	61
Figura 16. Promedio de paquetes perdidos en escenarios LTE, NR, DSS.	62
Figura 17. Promedio de SINR en escenario de LTE, NR, DSS	63
Figura 18. Promedio de CQI en escenario de LTE, NR, DSS.....	64

Índice de Tabla

Tabla 1. Enfoque multicapa para escenarios 5G	24
Tabla 2. Recuso Humano.....	44
Tabla 3. Comparación de simuladores	44
Tabla 4 Tabla comparativa de metricas.....	47

Índice de Anexos

Anexo 1. Código de configuración de parámetros	79
Anexo 2. Código de un tiempo limite.....	79
Anexo 3. Código de agregación de portadoras.....	80
Anexo 4. Código para los escenarios 100, 150 y 200.....	80
Anexo 5. Código de la configuración de DSS.....	81

CÓDIGO DUBLIN

Título:	RENDIMIENTO DEL ESPECTRO DINÁMICO COMPARTIDO EN ESCENARIOS DE ALTA DENSIDAD DE TRÁFICO				
Autor:	Kiara Julissa Intriago Posligua				
Palabras claves:	Gestión espectral	Acceso compartido	Redes móviles	Optimización de recursos	Eficiencia espectral
Fecha de publicación:					
Editorial:	Quevedo- UTEQ “La María”, 2025				
Resumen: (hasta 300 palabras)	Resumen. - El presente proyecto de investigación analiza el impacto del crecimiento acelerado de las redes móviles sobre la demanda de espectro radioeléctrico, destacando la compartición dinámica del espectro (DSS), una tecnología que facilita la coexistencia simultánea de 4G LTE y 5G NR en las mismas bandas de frecuencia. DSS permite una transición gradual entre generaciones tecnológicas sin la necesidad de reasignar espectro exclusivo para cada red. Este estudio evalúa el desempeño de DSS en escenarios de alta densidad de tráfico mediante simulaciones en OMNeT++, utilizando las herramientas Simu5G e INET para modelar redes bajo un esquema FDD (Frequency Division Duplexing).				
Abstract: (hasta 300 palabras)	Abstract. - This research project analyzes the impact of the rapid growth of mobile networks on the demand for radio frequency spectrum, highlighting Dynamic Spectrum Sharing (DSS), a technology that enables the simultaneous coexistence of 4G LTE and 5G NR within the same frequency bands. DSS allows a gradual transition between technological generations without the need to reallocate exclusive spectrum for each network. This study evaluates the performance of DSS in high traffic density scenarios through simulations in OMNeT++, using the Simu5G and INET tools to model networks under a Frequency Division Duplexing (FDD) scheme.				
Descripción:	100 hojas: dimensiones, 29 x 21 cm + CD-ROM 6162				
URI:					

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el creciente desarrollo de las redes móviles de quinta generación (5G) representa un avance crucial en las telecomunicaciones, destacándose por su capacidad de ofrecer altas velocidades de transmisión, latencia ultrabaja y conectividad masiva. Estas capacidades han permitido la implementación de aplicaciones avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT) y las comunicaciones ultra confiables de baja latencia (URLLC). No obstante, este avance también sufre grandes obstáculos como la gestión eficiente del espectro radioeléctrico, un recurso limitado y ampliamente demandado. Para abordar estas limitaciones surge una tecnología conocida como el Espectro Dinámico Compartido (DSS) el mismo que permite la coexistencia simultánea de redes 4G LTE “Long Term Evolution” y 5G NR “New Radio” en las mismas bandas de frecuencia, optimizando su uso sin necesidad de adquirir espectro adicional[1].

En América Latina, el despliegue de redes 5G avanza de manera gradual debido a limitaciones relacionadas con la disponibilidad del espectro y los retos inherentes a la integración de usuarios provenientes de tecnologías previas. El Espectro Dinámico Compartido (DSS) emerge como una solución técnica eficiente para optimizar los recursos espectrales existentes y garantizar la continuidad de los servicios basados en LTE durante la transición hacia 5G. Las operadoras enfrentan desafíos específicos en áreas densamente pobladas, donde la alta demanda de tráfico de datos y las complejidades geográficas afectan el rendimiento del DSS. En este contexto, mientras países como Brasil, Chile, Uruguay y Colombia lideran la implementación de redes 5G, otros en la región avanzan a un ritmo más lento.[2].

En Ecuador, el despliegue de redes móviles 5G aún es un proyecto a futuro, el país enfrenta importantes barreras regulatorias, administrativas y económicas, que incluyen la actualización del marco normativo, la asignación eficiente del espectro radioeléctrico y la necesidad de transformar los modelos de negocio de las operadoras de telecomunicaciones. Actualmente, con un índice de penetración del 46,34 % en tecnologías 2G, 3G y 4G, el país presenta un rezago en comparación con otras naciones de la región[3].

La relevancia de esta investigación radica en su capacidad para optimizar la gestión del espectro radioeléctrico frente a la creciente demanda de servicios de datos móviles. Al evaluar el rendimiento del DSS en un entorno simulado, se analizan escenarios de alta densidad de tráfico, considerando métricas como velocidad de transmisión de datos, latencia, pérdidas de paquetes y eficiencia espectral. Este enfoque no solo permite comprender el comportamiento del DSS bajo condiciones exigentes, sino también proporciona una guía técnica para su implementación futura en Ecuador, contribuyendo al desarrollo de una infraestructura de red que respalde las demandas de la economía digital emergente [4].

En el primer capítulo se presentó el planteamiento del problema, donde se abordó los desafíos técnicos relacionados con la implementación de sistemas DSS. A partir de esto, se formuló el problema de investigación, se desarrollaron preguntas sistematizadas para estructurar el análisis y se definieron los objetivos generales y específicos. Asimismo, se justificó la relevancia del estudio al evidenciar su importancia en la mejora de la gestión del espectro radioeléctrico y en el fortalecimiento de las redes móviles de próxima generación.

El segundo capítulo desarrolló el marco conceptual, referencial y legal, proporcionando la base teórica y normativa que sustenta el estudio. En el marco conceptual se definieron los términos y las tecnologías asociadas al DSS, lo que aporta precisión al análisis. Por su parte, el marco referencial examina investigaciones previas relevantes que permiten contextualizar el problema y comprender los avances en el campo. Por último, el marco legal abordó las regulaciones y normativas aplicables al uso del espectro radioeléctrico, estableciendo los lineamientos técnicos y jurídicos que orientan la implementación del DSS en redes móviles de 5G.

En el tercer capítulo se describió la metodología utilizada, abarcando los procedimientos implementados y las herramientas aplicadas durante el desarrollo del estudio. Este apartado proporciona una visión estructurada del proceso seguido, garantizando claridad en las etapas que conforman la investigación.

En el cuarto capítulo se centra en la exposición de los resultados obtenidos a partir del análisis técnico realizado, presentando además recomendaciones estratégicas que buscan optimizar la implementación del DSS en un contexto global. Estas recomendaciones no solo abordan los desafíos técnicos asociados, como la asignación dinámica de recursos y la mitigación de

interferencias, sino que también consideran la importancia de garantizar una experiencia de usuario óptima en aplicaciones críticas como comunicaciones ultra-confiables de baja latencia (URLLC) y servicios de banda ancha mejorada (eMBB).

En el quinto capítulo resaltan los hallazgos más relevantes respecto al impacto del DSS en el desempeño de las redes móviles y proponiendo reflexiones en torno a su evolución futura. Este apartado sintetiza las oportunidades y limitaciones del DSS, subrayando la necesidad de un equilibrio entre las demandas técnicas y las experiencias humanas. Además, plantea líneas de investigación futuras orientadas a perfeccionar esta tecnología en escenarios de alta densidad de tráfico, promoviendo con ello una transición armoniosa hacia ecosistemas digitales más conectados, confiables y sostenibles.

CAPÍTULO I
CONTEXTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Problema de investigación

1.1.1 Planteamiento del problema.

El crecimiento sostenido en la demanda de servicios móviles ha generado una presión significativa sobre los recursos de espectro disponibles, especialmente en bandas de frecuencia bajas ocupadas predominantemente por sistemas 4G LTE. La implementación de tecnologías 5G, con sus exigentes requerimientos de baja latencia, alta capacidad y cobertura extensa, agrava esta situación al competir por el mismo recurso limitado. Los desafíos asociados a esta tecnología son numerosos, especialmente en entornos de alta densidad de tráfico, como áreas urbanas densamente pobladas o zonas con múltiples usuarios simultáneos [1].

Entre los principales retos destacan la interferencia entre señales de control y datos de LTE y NR, la complejidad en la asignación dinámica de recursos temporales y frecuenciales, así como la pérdida de capacidad y la disminución de la eficiencia espectral, provocadas por los elevados costos de implementación y la sobrecarga de control necesaria. Además, la interferencia entre celdas se vuelve crítica cuando múltiples celdas comparten el mismo espectro de manera dinámica, generando impactos significativos en la calidad de la red. Este tipo de interferencia puede ocasionar fluctuaciones en las velocidades de transmisión, aumento en la latencia, pérdida de paquetes y una reducción considerable en la eficiencia espectral, afectando directamente la experiencia del usuario y el rendimiento global del sistema [4].

La interferencia, ocurre cuando las señales de múltiples transmisores se superponen, causando confusión en la recepción de las señales. Esto afecta directamente la velocidad de datos, puesto que errores en la interpretación de las señales pueden requerir retransmisiones, disminuyendo efectivamente la velocidad de transmisión fiable de datos [5].

El tiempo que tarda un paquete de datos en viajar desde su origen hasta su destino aumenta, debido a las retransmisión y corrección de errores que introduce un retardo adicional, los dispositivos deben emplear procesos más complejos para la decodificación de señales con interferencias, lo cual añade latencia. La pérdida de paquetes se intensifica bajo condiciones de interferencia, dado que los paquetes de datos pueden llegar a ser completamente indecifrables y descartados por el receptor. Como consecuencia, la eficiencia espectral se ve gravemente

afectada, al reducirse la cantidad de información útil transmitida por unidad de espectro debido al tiempo y los recursos desperdiciados en corregir errores y manejar interferencias [6].

Además, las actuales configuraciones de referencia para DSS presentan impactos negativos en el rendimiento individual de los usuarios y en la utilización total del espectro, siendo necesario evaluar las configuraciones óptimas que balanceen estas limitaciones con los beneficios esperados [7].

1.1.2 Formulación del problema.

El problema que se plantea en esta investigación es:

¿Cómo afecta la implementación del Espectro Dinámico Compartido (DSS) en entornos de alta densidad de tráfico en el rendimiento de las redes móviles de quinta generación?

1.1.3 Sistematización del problema.

- ✓ ¿Cuáles son las métricas básicas para analizar la eficacia del Espectro Dinámico Compartido en redes de quinta generación bajo diversas condiciones de operación?
- ✓ ¿Cómo implementar escenarios simulados que permita la evaluación detallada del rendimiento del Espectro Dinámico Compartido en condiciones de alta densidad de tráfico?
- ✓ ¿Cómo varían las métricas de rendimiento obtenidas en diferentes escenarios simulados para estimar la eficacia del Espectro Dinámico Compartido en redes móviles de quinta generación?

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo general.

Determinar el rendimiento en redes móviles de quinta generación para el despliegue del Espectro Dinámico Compartido en escenarios de alta densidad de tráfico mediante métricas básicas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar métricas de rendimiento relevantes mediante el análisis de literatura técnica previa para el reconocimiento de condiciones de operación que influyen en la eficacia del Espectro Dinámico Compartido.

- Diseñar escenarios simulados mediante herramientas especializadas que permitan la evaluación del comportamiento del Espectro Dinámico Compartido bajo condiciones de alta demanda de tráfico mediante métricas que reflejen su efectividad en el rendimiento de la red.
- Comparar las métricas obtenidas en los escenarios simulados para la determinación del rendimiento del espectro dinámico compartido en redes móviles de quinta generación.

1.3 Justificación.

La investigación sobre el Espectro Dinámico Compartido (DSS) en la coexistencia de las tecnologías 4G LTE y 5G NR resulta fundamental para enfrentar los desafíos contemporáneos en la gestión del espectro radioeléctrico, especialmente ante el crecimiento sostenido de la conectividad móvil a nivel global. Según la UIT, más de dos tercios de la población mundial cuentan con una suscripción móvil, y se proyecta un incremento significativo de usuarios para 2025, lo que aumenta las exigencias de conectividad y calidad de servicio en las redes. El DSS se presenta como una solución innovadora y eficiente para maximizar el uso del espectro radioeléctrico, permitiendo que ambas tecnologías coexistan en el mismo espectro, promoviendo así el desarrollo tecnológico inclusivo y equitativo[8].

La implementación de esta tecnología, como lo demuestran Lin et al. (2023), muestra que en un entorno de 40 MHz DSS en la banda de 2.1 GHz, se logra una reducción del 5% en las tasas de transmisión NR para sistemas de vía única y hasta un 11% en sistemas de cuatro vías, sin comprometer la calidad de experiencia del usuario. Además, su capacidad para operar en bandas bajas extiende la cobertura de las redes, resolviendo problemas de propagación tanto en zonas rurales como en áreas urbanas densas. Esto posiciona al DSS como una solución técnica y económica durante las etapas iniciales del despliegue 5G, facilitando un desarrollo más ágil del ecosistema de usuarios y dispositivos [9].

El DSS no solo mejora la eficiencia en el uso del espectro, sino que también reduce costos asociados al refarming y mantiene la compatibilidad con dispositivos existentes, lo que facilita una transición sostenible hacia redes más avanzadas. Comprender las implicaciones técnicas y las oportunidades que ofrece el DSS es fundamental para optimizar su implementación y garantizar una conectividad robusta y accesible [10].

Esta investigación tiene un impacto significativo, ya que promueve la creación de estándares y buenas prácticas que benefician a operadores, fabricantes y usuarios a nivel global, fortaleciendo un ecosistema tecnológico más eficiente e inclusivo. Al democratizar el acceso a redes de última generación, el DSS se consolida como una solución viable para mercados emergentes y regiones en desarrollo, promoviendo la inclusión digital y creando condiciones para un crecimiento sostenido en un mundo cada vez más interconectado [11].

Al facilitar una integración fluida entre 4G y 5G, DSS crea un ecosistema más resiliente y adaptable, capaz de responder a las demandas cambiantes de un mundo digital en constante evolución. Su implementación no solo optimiza el uso del espectro, sino que también fomenta la innovación en servicios y aplicaciones, enriqueciendo la experiencia del usuario. En última instancia el DSS es un faro de progreso que impulsa el avance hacia un futuro donde la conectividad es universal y accesible, asegurando que cada individuo y comunidad pueda beneficiarse de las ventajas de la tecnología avanzada [12].

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Marco conceptual

2.1.1. Redes móviles.

Las redes móviles son sistemas de comunicación que utilizan ondas radioeléctricas para conectar estaciones móviles y fijas, dicho de otra forma, estas redes conectan estaciones móviles y fijas mediante el uso de ondas radioeléctricas. Los servicios de estas se dividen en terrestres, marítimas y aeronáuticos, siendo el terrestre el más común [13]. Por otro lado, se encarga de proporcionar movilidad completa, permitiendo comunicación continua y conexiones a velocidades superiores a 300 km/h. También, son conocidas por ser esenciales para la infraestructura moderno, apoyando los servicios de emergencia, entretenimiento y comercio electrónico, y son vitales para la conectividad y el intercambio de información de la sociedad [14].

2.1.2. Tecnología 5G.

La tecnología 5G es la quinta generación en redes móviles, se destaca por su baja latencia, lo que posibilita respuestas prácticas, fundamentales para las aplicaciones en tiempo real, A su vez, el 5G tiene una mayor capacidad para conectar con un mayor número de dispositivos simultáneamente, siendo una excelente respuesta por su capacidad masiva de tráfico, mayor capacidad de conexión para satisfacer las demandas de comunicación y aplicaciones avanzadas [15],[16]. Por lo tanto, su desarrollo se centra en la gestión eficiente del espectro y las bandas de frecuencia asignadas a esta tecnología van desde menos de 1 GHz hasta 100 GHz [17].

2.1.2.1. Aspectos de la tecnología 5G.

Entre los aspectos claves de la tecnología 5G se encuentran [18]:

- Latencia de un milisegundo (reduciendo el tiempo de transmisión de datos)
- 100% de cobertura [18].
- Ancho de banda de 1.000 por unidad en área [18].
- Duración de 10 años como vida útil para dispositivos IoT de baja capacidad [18].
- Con gran velocidad de 10 GB por segundo [18].
- Los dispositivos aumentaran de 10 a 100 veces, llegando a un total de 50.000 millones a la vez [18].

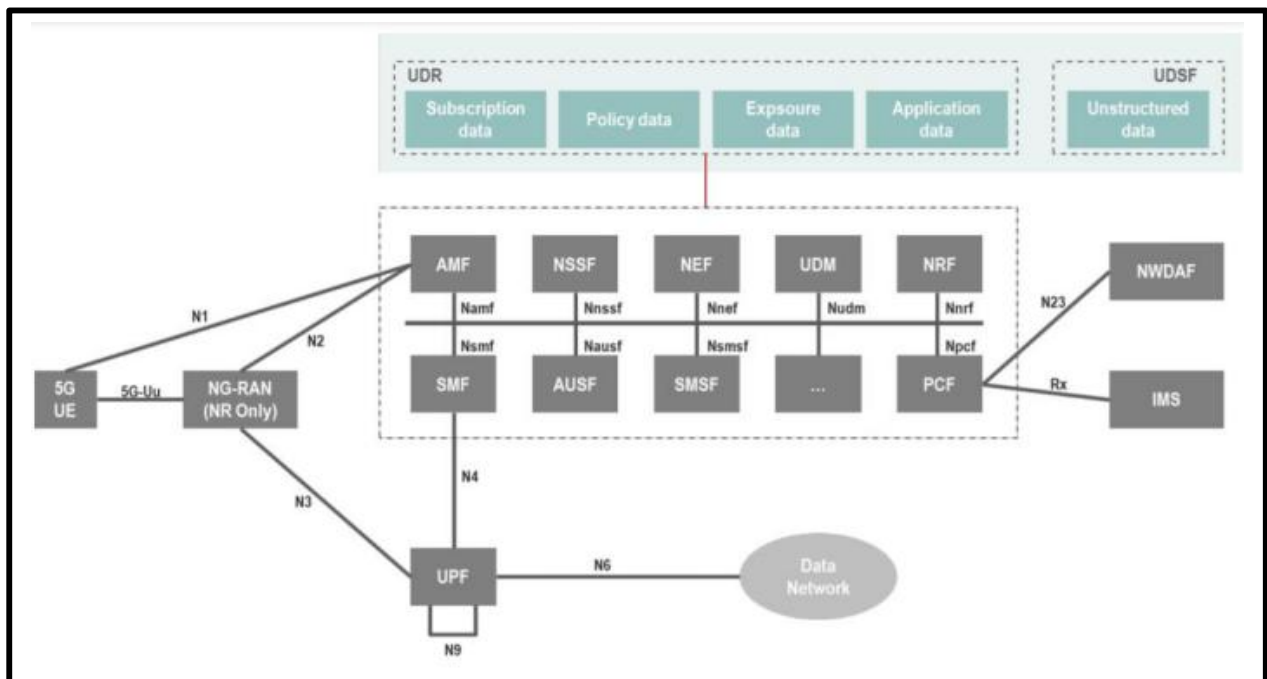
- Fiabilidad de la red del 99.99% [18].

2.1.2.2. Arquitectura 5G

La arquitectura 5G es sin duda una de las tecnologías más avanzadas, que incluye redes de acceso por radio (RA) que no se limitan por la complejidad de la infraestructura o la proximidad de las estaciones base. Sin embargo, esta tecnología se centra en una red RAN flexible, virtualizada y desagregada, con diversas interfases nuevas que generan puntos de acceso de datos adicionales [19], [20].

En la Figura 1, se observa como los gNBs se conectan al 5GC mediante las interfaces N2 y N3. Además, los gNBs están interconectados por medio de la interfaz Xn. L red NR opera de forma independiente de la red TE existente [19].

Figura 1. Arquitectura 5G



Fuente: [19]

Elaborado: Autora

2.1.3. Espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico, se define según [21] como el entorno que permite la propagación, sin guía artificial, de ondas electromagnéticas, cuyas bandas de frecuencia se establecen normalmente por debajo de los 3.000 Gigahertz (GHz). En sentido similar, está constituido por un subconjunto de ondas electromagnéticas que se propagan por el espacio, se considera que el espectro es un recurso vital e indispensable para las comunicaciones móviles, ya que es un portador importante para la transferencia inalámbrica de datos [21],[22] y [23].

2.1.3.1. Análisis del espectro radioeléctrico para la utilización de la tecnología 5G

La implementación de la tecnología 5G exige una asignación significativa y armonizada del espectro radioeléctrico, priorizando la desfragmentación y liberación de bandas de frecuencia clave. Los reguladores deben asignar 80-100 MHz de espectro contiguo por operador en bandas medias, como la de 3.5 GHz, y alrededor de 1 GHz por operador en bandas milimétricas, como las de 26/28 GHz. Estos rangos de frecuencia son esenciales para proporcionar una cobertura extensa y admitir todos los casos de uso de 5G [24].

La Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (CMR-19) identificó bandas de frecuencia críticas para IMT-2020, incluyendo 24.25-27.5 GHz, 37-43.5 GHz, 45.5-47 GHz, 47.2-48.2 GHz y 66-71 GHz, sumando 17.25 GHz de espectro asignado para 5G. Además, se otorgaron protecciones a servicios satelitales en la banda de frecuencia 22.55-23.15 GHz, asegurando su uso para seguimiento, telemetría y control de satélites.

La gestión del espectro 5G debe centrarse en licencias exclusivas, con opciones complementarias de compartición y bandas sin licencia. Reservar espectro para sectores verticales en bandas prioritarias como 3.5/26/28 GHz podría afectar negativamente los servicios 5G públicos. En su lugar, enfoques de compartición como el arrendamiento son más adecuados para estos sectores.

Además, se protegieron frecuencias para servicios meteorológicos y de investigación espacial en bandas adyacentes. Con las frecuencias aprobadas por la CMR-19, es crucial utilizar tres rangos de frecuencia: por debajo de 1 GHz para cobertura amplia en diversas áreas, entre 1-6 GHz para servicios iniciales clave, y por encima de 6 GHz para lograr velocidades ultra altas de banda ancha. Reguladores y gobiernos deben adoptar medidas que incentiven inversiones a largo plazo en redes 5G, como licencias prolongadas y procesos de renovación claros [24].

2.1.4. Estructura técnica del DSS

2.1.4.1. Estructura de trama y flexibilidad en LTE y 5G NR para DSS

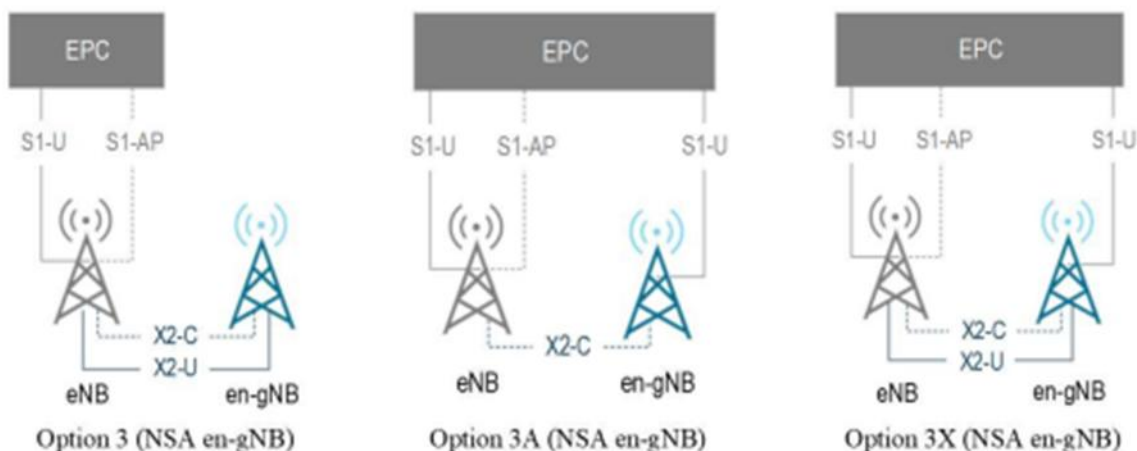
En LTE, la estructura de la trama se organiza en una duración de 10 ms con 10 subtramas de 1 ms cada una, y cada subtrama está formada por dos ranuras de 0.5 ms, resultando en un total de 20 ranuras por trama. El prefijo cíclico y el espaciado de subportadora (SCS) determinan el número de símbolos OFDM por ranura, con 14 símbolos en cada subtrama para un SCS de 15 kHz. En contraste, 5G NR ofrece mayor flexibilidad al admitir múltiples numerologías OFDM con SCS de 15 kHz, 30 kHz, 60 kHz, 120 kHz y 240 kHz. Esto permite una coexistencia eficiente del espectro compartido entre LTE y NR, optimizando el uso de los recursos sin interferencias entre las señales de ambas tecnologías [25].

2.1.5. Despliegue de redes 5G en modo no autónomo.

El primer despliegue de redes y dispositivos 5G se llevará a cabo en modo no autónomo (NSA), lo que significa que la infraestructura de 4G existente será la base para soportar las operaciones de 5G. Esta estrategia permite una transición más fluida hacia la nueva tecnología, aprovechando las inversiones previas en la infraestructura de red. DSS es una respuesta 3GPP que se basa en los proveedores y no se estandariza. La figura presenta las propuestas y soluciones de diversos proveedores para DSS [26] [27].

Figura 2. Soluciones de Proveedores

Vendedores	Huawei	Ericsson	Nokia	ZTE	Qualcomm	MediaTek	Samsung
Nombre de solución	Nube AIR	ESS- Ericsson Espectro Intercambio	Servicio de Seguridad	SuperDSS, Magia Radio profesional	Boca de dragón X60	Dimensión 1000	Servicio de Seguridad Nacional



Fuente:[26].

2.1.6. Espectro dinámico compartido (DSS)

La entidad 3GPP introdujo en su versión 15 la tecnología DSS con el objetivo de resolver el problema de la coexistencia del espectro. En donde DSS permite que los usuarios de 4G LTE y 5G NR coexistan en la misma banda, estaciones y redes, asignando de manera más dinámica los recursos de los canales entre los usuarios de 4G y 5G en cada celda [22].

Este sistema utiliza un método de acceso jerárquico, el cual implica que los usuarios (PU) poseen derechos sobre el espectro, mientras que los usuarios secundarios (SU) buscan acceder a ese espectro cuando esté disponible, según sea necesario y sin perturbar el sistema primario. Los SU son radios cognitivos (CR) y el PU es un sistema licenciado [28].

2.1.6.1. Asignación de recursos en DSS

En la compartición dinámica del espectro (DSS), los bloques de recursos (RB) se asignan dinámicamente a la tecnología de nueva radio (NR) para sus transmisiones de datos. Un RB es un conjunto de elementos de recurso (RE) que se asignan a un usuario o a un grupo de usuarios

en una red LTE. La asignación de RB es fundamental para garantizar la compatibilidad y el rendimiento de la red en entornos de DSS. Además, la asignación de RB debe tener en cuenta las características de las subtramas LTE, que se clasifican en dos tipos: MBSFN (red de frecuencia única de transmisión por multidifusión) y no MBSFN [29].

2.1.6.2. Características del DSS:

Entre las diferencias del DSS se destacan las siguientes características [19]:

- Mejora de la eficiencia del espectro
- Aumento de la capacidad de las redes de comunicaciones
- Reducción de los costos de infraestructura
- Mejora de la calidad del servicio

2.1.6.3. Ventajas y desafíos del DSS

El Dynamic Spectrum Sharing (DSS) es esencial para permitir la coexistencia de tecnologías 4G LTE y 5G NR en el mismo espectro, generando así diversos beneficios y retos esenciales [30]:

Ventajas

- **Optimización de recursos:** DSS, al modificar de manera dinámica el tiempo y a su vez la frecuencia de transmisión según la demanda de los usuarios previene el abuso del espectro en los servicios 5G cuando existen escasos usuarios, siendo posible que los operadores aprovechen de forma más eficaz los recursos espectrales existentes para servir tanto a los usuarios LTE como NR [30].
- **Transición suave entre generaciones:** DSS posibilita un paso paulatino de los usuarios de 4G LTE a 5G NR, evitando la necesidad de una resignación de espectro única para cada tecnología. Durante las primeras etapas de despliegue, cuando la cantidad de usuarios de NR es reducida, DSS distribuye recursos de manera flexible, optimizando el uso del espectro sin impactar de manera significativa a los usuarios de LTE [30] [31].
- **Disminución de gastos y periodo de implementación:** DSS posibilita que los operadores utilicen sus infraestructuras LTE ya existentes para brindar servicios 5G, evitando la

necesidad de comprar nuevo espectro o realizar modificaciones radicales en la infraestructura de la red. Esto disminuye el gasto y el tiempo requerido para una implementación total de 5G [30].

Desafíos

- **Disminución de capacidad:** el reto más significativo del DSS radica en disminuir la capacidad total de la red. Al intercambiar recursos espectrales entre LTE y NR, se produce una carga incrementada en los canales de control, lo que esto conllevaría a la disminución del rendimiento máximo que se puede lograr en ambos sistemas, resultando particularmente complicado cuando los canales de control de LTE (como el Cell Reference Signal, CRS) obstaculizan las transmisiones de 5G NR [30].
- **Complejidad en la administración del espectro:** la necesidad de sincronizar la distribución de recursos entre ambas tecnologías conlleva una complicada gestión de la red. Adicionalmente, dado que LTE posee señales estables y 5G emplea una numerología más adaptable, DSS necesita aplicar algoritmos sofisticados para prevenir colisiones y optimizar la eficiencia del espectro [30].
- **Desafíos Asociados a la Solución DSS:** Una de las principales desventajas de la implementación del DSS es que el uso frecuente de subtramas MBSFN para la asignación de frecuencias dinámicas puede agotar los recursos temporales y de frecuencia de los suscriptores de LTE. Esto podría resultar en una disminución notable del rendimiento de la red de acceso de radio LTE, lo que requiere un equilibrio cuidadoso en la gestión de recursos [29].

2.1.6.4. Capas del protocolo en el Dynamic Spectrum Sharing (DSS)

- **Capa física (PHY):** La capa física es responsable de la transmisión de señales a través del espectro compartido, gestionando la modulación y la codificación de datos. En el contexto del DSS, adapta el espaciado de subportadoras (SCS) para permitir la coexistencia eficiente de LTE y 5G NR, ajustando dinámicamente los recursos de tiempo y frecuencia según la demanda del tráfico. Además, coordina las señales de referencia para minimizar la interferencia entre ambas tecnologías [32].

- **Capa de enlace de datos:** Esta capa se divide en subcapas, incluyendo MAC, RLC y PDCP, que gestionan la asignación de recursos, la segmentación y la retransmisión de datos. En el DSS, la subcapa MAC es crucial para asignar dinámicamente bloques de recursos (RB) entre LTE y 5G NR, evitando colisiones con las señales de referencia. Las subcapas RLC y PDCP aseguran la integridad y la seguridad de los datos, permitiendo una transmisión eficiente y confiable en un entorno compartido [32].
- **Capa de control de recursos de radio (RRC):** La capa RRC se encarga de la gestión de la conexión y de la movilidad, coordinando la asignación de recursos entre LTE y 5G NR en el entorno DSS. Su función es garantizar que los dispositivos se conecten de manera óptima a la red, ajustando los recursos según la demanda del tráfico y las condiciones de la red. Esta capa es fundamental para mantener la calidad del servicio durante la transición entre tecnologías [32].
- **Capa de red Y transporte:** La capa de red gestiona el enrutamiento y la dirección del tráfico de datos, optimizando la distribución entre LTE y 5G NR en un entorno de Dynamic Spectrum Sharing (DSS), esta capa es fundamental para mantener un flujo de datos eficiente y sin interrupciones, facilitando la transmisión correcta de paquetes. Por su parte, la capa de transporte, a través de protocolos como TCP y UDP, garantiza la transmisión confiable de datos entre dispositivos, adaptándose a los cambios en la asignación de espectro [32].

2.1.6.5. Importancia del DSS en la tecnología 5G

El DSS es fundamental ya que radica como una tecnología fundamental y clave en el uso del espectro radioeléctrico en la tecnología 5G, a su vez permite una transición fluida para los usuarios, lo cual sin duda es esencial dado el aumento de dispositivos conectados como en la demanda de datos, por otra parte, permite la reducción de los costos al permitir a los operadores utilizar el ancho de banda existente y ofrece flexibilidad para ajustar las redes a las demandas del mercado. Siendo una tecnología bastante satisfactoria en la evolución continua de las telecomunicaciones [1], [33].

2.1.6.6. *Funcionamiento del DSS*

Uno de los parámetros fundamentales en este proceso es el espaciado de subportadoras (SCS). El DSS utiliza un SCS estándar de 15 kHz, común tanto en LTE como en 5G, lo que facilita la integración y el intercambio de espectro entre ambas tecnologías. Sin embargo, en aplicaciones avanzadas de 5G, donde se requieren mayores capacidades o menores latencias, el SCS puede incrementarse permitiendo que la red maneje una mayor cantidad de datos y responda más rápidamente a las demandas del tráfico [34].

DSS principalmente esfuerza el intercambio dinámico de recurso temporal-frecuencia entre 4G LTE y 5G NR, mediante la tecnología de igualación de tarifas. Los recursos del espectro están coordinados cada 1 ms en el dominio del tiempo, permitiendo la compartición dinámica de recurso con una granularidad de 1 RB en el dominio de la frecuencia y la asignación dinámica de recurso, a su vez esta se realiza de acuerdo con la demanda de volumen de servicio en las bandas LTE y NR [35]. En el mismo contexto, proporciona un intercambio de espectro dinámico a nivel de portadora LTE y NR estableciendo umbrales definidos por el usuario o un uso razonable para las celdas LTE y NR, alterando la porción de ancho de banda (BWP) [36].

2.1.6.7. *Tecnologías complementarias del DSS*

El DSS no opera de forma autónoma, sino que puede fusionarse con otras tecnologías para optimizar su desempeño y adaptabilidad en redes móviles, las cuales se mencionan a continuación:

- **Estructura autónoma (Standalone-SA):** a pesar de que en numerosos despliegues iniciales de 5G se emplea una arquitectura no standalone (NSA), en la que 5G NR se basa en la infraestructura 4G, DSS también puede ser incorporado en una arquitectura autónoma. En una red SA, 5G NR opera de forma independiente, sin embargo, DSS aún puede emplearse para optimizar el uso del espectro compartido, particularmente en situaciones donde tanto LTE como NR permanecen en la misma zona geográfica. El DSS no opera de forma autónoma, sino que puede fusionarse con otras tecnologías para optimizar su desempeño y adaptabilidad en redes móviles [30].

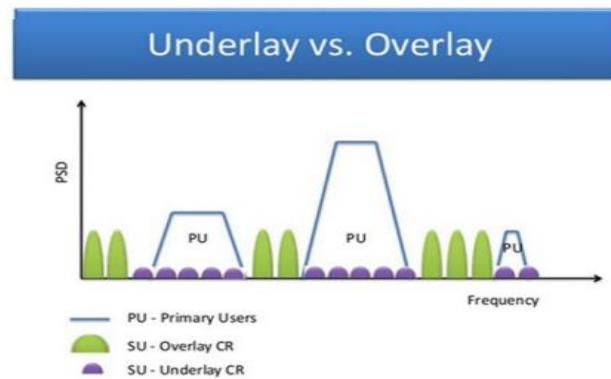
- **Agregación de portadores (Carrier Aggregation -CA):** DSS puede incrementar su eficacia al fusionarse con agregación de portadoras, un método que posibilita el uso simultáneo de varias bandas de frecuencia para optimizar el desempeño de la red. Con CA, los operadores tienen la posibilidad de incorporar espectro LTE y 5G de diversas bandas para proporcionar velocidades superiores y mayor cobertura, optimizando así el uso de las capacidades del DSS [30].
- **Numerologías versátiles de 5G NR:** En contraste con LTE, que emplea un espaciado fijo entre las subportadoras (SCS), 5G NR soporta diversas numerologías (tales como 15 kHz, 30 kHz, 60 kHz). Esta versatilidad en las numerologías puede ser utilizada por DSS para mejorar la coexistencia de NR y LTE en distintas bandas de frecuencia, optimizando de esta manera el desempeño de ambos sistemas [30].

2.1.6.8. Técnicas principales basada en (DSS)

Según menciona [37], hay dos enfoques principales para lograr la coexistencia de espectro basada en (DSS):

- La capa subyacente (underlay): La capa underlay permite a los radios cognitivos secundarios (CR/SU) compartir el espectro con los usuarios primarios (PU), siempre y cuando la interferencia se mantenga por debajo de un nivel específico, como se muestra en la Figura 2. Esto usualmente significa que las comunicaciones primarias son de banda estrecha, mientras que las comunidades secundarias emplean espectro extendido o de banda ancha [37].
- Entrelazado de espectro (espectro-overlay): este método permite que los usuarios secundarios (SU) accedan al espectro primario únicamente cuando los usuarios primarios (PU) no lo están utilizando, como se observa en la Figura 2. Los SU vigilan y aprovechan las oportunidades del espectro sin que los PU requieran estar al tanto del intercambio, lo que teóricamente permite un uso eficiente del espectro, método conocido como acceso dinámico de espectro DSA) [37].

Figura 3. Formas de compartición dinámica del espectro



Fuente: [37]

Elaborado: Autora

2.1.6.9. Asignación comercial del espectro

La asignación comercial del espectro DSS (*Synami Spectrum Sharing*) es un enfoque innovador en donde los operadores móviles utilizan el mismo espectro para múltiples generaciones de tecnologías de red (como 4G y 5G). Este método es esencial para maximizar el uso del espectro y permitir así una mejor transición a las redes de próxima generación, particularmente en entornos con alta densidad de tráfico [24], [38]. En la asignación comercial del espectro interactúan mecanismos los cuales facilitan una transición más rentable sin necesidad de adquirir nuevo espectro de inmediato.

2.1.6.10. Mecanismos de implementación del DSS

La implementación del Espectro Dinámico Compartido (DSS) en cuanto a las redes móviles 5G implica una serie de mecanismos técnicos y operativos de importancia como se mencionan a continuación [39]:

- **Acceso múltiple por división de frecuencia (OFDMA)**

Los usuarios pueden acceder simultáneamente a diferentes subportadores gracias a OFDMA, una técnica de multiplexación que divide el espectro al permitir la asignación dinámica y flexible de recursos de frecuencia a los usuarios en función de la demanda [24].

- **Gestión de recursos de radio (RRM)**

RRM comprende técnicas y algoritmos para maximizar el rendimiento de la red mediante la optimización de la asignación de recurso de radio, como potencia, frecuencia y tiempo, esto garantiza que los recursos del espectro se asignen de manera óptima entre los usuarios de 4GLTE y 5G NR, manteniendo la calidad del servicio y minimizando las interferencias [40].

- **Coordinación de interferencias entre celdas (ICIC)**

Por medio de esta técnica se controla y minimiza la interferencia entre teléfonos celulares adyacentes en una red móvil, siendo así eficiente al reducir las interferencias entre usuarios que comparten las mismas frecuencias, permitiendo una coexistencia más armoniosa entre 4G y 5G [41].

- **Computación en el borde (Edge Computing)**

Edge Computing implica la ejecución y procesamiento de datos de aplicaciones lo más cerca posible del borde de la red, en otras palabras, lo más acercado posible de los usuarios finales. Facilitando de dicha forma a una mejor gestión del espectro al tomar decisiones rápidas sobre la asignación y el uso de este, mejorando de esta manera la latencia y el rendimiento de las aplicaciones críticas [42].

- **Software de gestión del espectro**

Se utilizan softwares diseñados para supervisar y regular el uso del espectro en tiempo real, su función en DSS es asignar dinámicamente al espectro ajustando los parámetros de la red en función de las condiciones de tráfico y demanda a medida que cambien [43].

- **Actualización de firmware y hardware**

Por medio de este método, los dispositivos de red pueden manejar la complejidad de DSS, como la administración de múltiples bandas y modos operativos. Todo gracias a las mejoras y las actualizaciones constantes del firmware y hardware de los equipos de red [44].

- **Priorización del tráfico**

Prioriza varios tipos de tráfico de red, garantizando que las aplicaciones críticas reciban un tratamiento preferencial. Su papel en DSS es proporcionar una gestión eficaz de la carga de la red, asegurando que los recursos del usuario se asignen primero a los servicios más críticos [45].

2.1.6.11. Implementación y aplicaciones del DSS

Eficiencia en la utilización del espectro con DSS

Las bandas de frecuencia en la gama de 700 MHz a 2 GHz, ideales para extender la cobertura debido a su mayor alcance, están mayormente ocupadas por servicios 4G. Sin embargo, las bandas superiores a 3 GHz, que proporcionan un ancho de banda más amplio, son más adecuadas para ofrecer velocidades de datos superiores. El DSS permite que 5G utilice estas bandas bajas ocupadas por LTE, reduciendo la latencia y aumentando la velocidad de transmisión en un 20% y facilitando así una cobertura más extensa y una mejor experiencia de usuario [19].

2.1.6.12. Aplicaciones de DSS

- **Asignación dinámica de recursos:** En DSS, no se distribuyen de manera estática los recursos de tiempo y frecuencia entre LTE y 5G NR, sino que se modifican dinámicamente en base a la necesidad de los usuarios en tiempo real. Esto resulta especialmente beneficioso en situaciones donde el espectro es restringido y ambos sistemas deben cohabitar. La asignación dinámica posibilita el uso máximo del espectro, destinando más recurso a la tecnología con mayor demanda en un momento específico [30].
- **Aumento de la eficiencia del espectro:** el beneficio principal de DSS radica en que posibilita un uso más eficaz del espectro sin la obligación de asignar de manera permanente determinadas bandas a una tecnología u otra. En vez de reservar espectro para una tecnología (como LTE), el cual podría estar infrautilizado, DSS reutiliza el espectro para 5G cuando el tráfico es inferior, y viceversa. Esto mejora el aprovechamiento de las frecuencias, optimizando el desempeño de la red [30].
- **Compatibilidad retrospectiva:** DSS es compatible con los dispositivos LTE heredados, lo que implica que los dispositivos 4G actuales pueden continuar operando de manera habitual mientras los operadores implementan progresivamente 5G en el mismo espectro. Esto garantiza una transición sin pausas y previene la obsolescencia instantánea de los aparatos antiguos [30].

2.1.6.13. Beneficios de la compartición de espectro.

Entre los beneficios de la compartición del espectro se destacan las siguientes:

- **Optimización en el uso del espectro:** Se hace un mejor uso del espectro al compartirlo entre proveedores 4G y 5G, lo que no requiere licencias extras y permite a los proveedores de servicios utilizar de mejor forma el espectro disponible [46].
- **Transición sin contratiempos a 5G:** Al utilizar el espectro de 4G como apoyo en los servicios de 5G, los proveedores de servicio pueden ejecutar una transición más sencilla a 5G sin necesidad de configurar una red completamente nueva [46].
- **Ahorro de coste:** La evitación de obtener licencias adicionales da como resultado una reducción en el coste operativo y financiero para los proveedores de servicio [46].

2.1.6.14. Bandas en las que se trabaja el espectro.

Al utilizar muchas bandas para maximizar el rendimiento y la eficiencia del espectro disponible, la compartición dinámica del espectro DSS, permite que las redes 5G y 4g coexistan en el mismo espectro de frecuencias [47]. Entre las bandas que trabaja el espectro, según[48] la mayoría de las redes 5G-NR desplegadas comercialmente operan en dos rangos de frecuencia: de 3,3 a 4,2 GHz y de 24,25 a 29,5 GHz.

- **Bandas sub-6 GHz (3.3-4.2.):** estas bandas son esenciales para el primer despliegue de redes 5G a causa de su capacidad de proporcionar un equilibrio entre capacidad y cobertura, esto habilita una mayor abragente e infiltración en interiores, eso que es beneficioso para las áreas rurales y urbanas [47].
- **Bandas milimétricas (24.25-29.5 GHz):** Si bien son las bandas de frecuencia más altas, a veces denominadas mmWare, son fundamentales para suministrar velocidades de datos extremadamente altas con baja latencia, son óptimos para entornos de alta densidad como centros de convivencia, estadios y áreas metropolitanas [39].

2.1.6.15. Funcionamiento 5G en DSS

El 5G funciona en frecuencias que oscilan entre 1 GHz y las ondas de milimétricas. Dicha tecnología tiene la gran capacidad de ser implementada en espectros compartidos, tanto con

licencia como sin ella. Se emplea la técnica de duplexación por división de frecuencia (FDD) para el espectro emparejado, en cambio, para el espectro no emparejado se emplea la técnica duplexación por división de tiempo (TDD) [30].

Por lo general, se utiliza una metodología de triple capa, tal como se especifica en la Tabla 3, que puede ser utilizada en los recursos espectrales. Específicamente, para los servicios de comunicación a gran escala de tipo maquina (mMTC) y la comunicación de baja latencia (URLLC), se ve como esencial una capa de sobre velocidad que funcione por debajo de 2 GHz para así asegurar cobertura en zonas amplias y en interiores. La capa intermedia, que se extiende desde 2 GHz hasta 6 GHz, simboliza un balance apropiado entre la capacidad y la cobertura. Sobre 6 GHz, se puede utilizar la capa de super datos para servicios que necesitan velocidades de datos muy elevadas, aunque con una cobertura menos rigurosa [30].

Dicho modelo de triple capa posibilita cubrir las variadas demandas de servicios 5G, tales como eMBB, mMTC y URLLC, garantizando que cada uno obtenga el beneficio correspondiente [30].

Tabla 1. Enfoque multicapa para escenarios 5G

Servicio 5G	Requisito de servicio	Capa espectral	Banda de espectro	Cantidad de espectro	DSS
eMBB	Velocidades de datos extremadamente altas	Capa de super datos	Por encima de 6 CHz	800 MHz (contiguos)	Despliegue de 5G sin 4G
eMBB, URLLC, mMTC (área amplia, pero sin cubertura profunda)	Un compromiso entre capacidad y cobertura	Capa de cobertura y capacidad	2-6 GHz	100 MHz (contiguos)	Generalmente se aplica hasta menos de 3

eMBB, URLLC, mMTC	Amplia área y cobertura profunda en interiores	Capa de sobrelapa	Por debajo de 2 GHz	Hasta 20 GHz emparejado/no emparejado	GHz(2.6 GHz)
-------------------------	---	----------------------	------------------------------	---	------------------

Fuente: [30]

Elaborado: Autora

Por otro lado, funcionar con una sola capa enfocada en servicios sería ineficiente para brindar servicios que requieren tanto cobertura como velocidades de datos elevadas, así como poca latencia, entre otros requerimientos. Así pues, para cumplir con las variadas necesidades de los servicios 5G, es primordial emplear capas espectrales conjuntas y múltiples en las redes 5G. la utilización conjunta del espectro dinámico DSS es especialmente relevante para las configuraciones FDD de banda baja, que típicamente comprende el espectro de 600 a 2600 MHz, en las que el DSS facilita una transición adaptable de LTE a 5G [30].

2.1.6.16. Estructura y elementos clave en DSS

- **Resource Element (RE) y Resource Block (RB):** En el Dynamic Spectrum Sharing (DSS), un RE se define como una subportadora de 15 kHz y un símbolo OFDM, mientras que doce subportadoras forman un Resource Block (RB) de 180 kHz. El número de RB asignados varía en función de cómo se comparte el espectro entre LTE y 5G NR, permitiendo una optimización dinámica de los recursos según la demanda de tráfico [29].
- **Cell Reference Signals (CRS):** En LTE, las CRS son señales fijas que se transmiten en cada subtrama para garantizar la sincronización de los dispositivos con la red. En DSS, estas señales deben coexistir con las de 5G NR, sin interferencias, para asegurar que ambas tecnologías puedan operar de manera simultánea sin afectar la calidad del servicio [29].
- **Demodulation Reference Signals (DMRS):** En 5G NR, las DMRS son fundamentales para la estimación del canal y la demodulación de datos. En un escenario de DSS, las DMRS pueden ajustarse para evitar colisiones con las CRS de LTE, lo que asegura que ambas redes utilicen eficientemente el espectro sin generar interferencias [29].

2.1.6.17. Clasificación y modos de implementación del DSS

- **Subtramas MBSFN (Multicast Broadcast Single Frequency Network):** Se reservan subtramas LTE para las transmisiones 5G NR. Los recursos de tiempo-frecuencia son asignados para evitar colisiones con Cell Reference Signals (CRS) de LTE, garantizando que las señales de control de LTE no se vean afectadas. Las subtramas MBSFN son transparentes para los usuarios de LTE, lo que significa que los dispositivos LTE no perciben ninguna alteración en el servicio [26].
- **Minislot-based DSS:** Permiten programar transmisiones de datos NR en cualquier símbolo que no esté ocupado por CRS de LTE dentro de una ranura. Esto reduce la latencia y es ideal para aplicaciones URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications). Sin embargo, esta opción puede generar un uso ineficiente de los recursos espectrales ya que parte del ancho de banda se reserva para evitar interferencias con las señales de control de LTE [26].
- **Rate Matching y Coincidencia de Señales:** Este enfoque clasifica al DSS por su capacidad de ajustar las posiciones de las Cell Reference Signals (CRS) de LTE y las Demodulation Reference Signals (DMRS) de 5G NR, evitando que ambas colisionen en los mismos bloques de recursos, se puede emplear la técnica de rate matching a nivel de Resource Block (RB), donde las señales de control de LTE y 5G NR se coordinan a nivel de bloque de recursos, mejorando la eficiencia en la asignación de espectro sin comprometer la calidad del servicio para ambas tecnologías [26].

2.1.6.18. Transferencia de señales de control en DSS

La transferencia de señales de control es un aspecto crítico los SSB NR son señales de sincronización que se utilizan para sincronizar los dispositivos con la red, y se transfieren utilizando el espectro LTE. Es fundamental evitar colisiones con las señales de referencia de LTE, como las señales de referencia de celda (CRS), que varían dependiendo de la subtrama LTE y el número de antena ports. Además, el canal de control de enlace descendente (PDCCH) se utiliza para transmitir información de control a los dispositivos NR, y su asignación debe ser cuidadosamente planificada para evitar interferencias con las señales de control de LTE.

2.1.6.19. Utilización de MBSFN para DSS

La implementación de DSS mediante MBSFN permite que la interfaz aérea de 5G transmita bloques de señal de referencia (SSB) y señales de seguimiento como parte de la Información de Estado del Canal (CSI) de 5G. El canal CSI es crucial para que los dispositivos móviles (UE) puedan evaluar la calidad del canal de radio y reportar la información necesaria para facilitar una transición eficiente de servicios 4G a 5G [26].

Cuando se utiliza MBSFN para la tecnología 5G NR en el contexto de DSS, las señales de 5G NR, incluidas las de información pública, se insertan en símbolos OFDM reservados específicamente para este fin. En las subtramas MBSFN de LTE, solo una cantidad mínima de símbolos (1 o 2) se emplea para la transmisión de los canales de control (PDCCH, PCFICH, PHICH) y las señales de referencia (CRS). Los símbolos restantes permanecen inactivos, lo que permite que sean reutilizados por las transmisiones de 5G NR sin interferencias [26].

2.1.6.20. Requisitos técnicos del DSS.

- **Compatibilidad de las estaciones base (eNB y gNB):** Las estaciones base de 4G LTE (eNB) y 5G NR (gNB) deben ser compatibles con DSS, lo que implica que ambas puedan compartir dinámicamente los recursos de espectro. Esta compatibilidad permite que las estaciones base gestionen simultáneamente las transmisiones de datos para LTE y 5G sin generar interferencias, ajustando la asignación de Resource Blocks (RB) en función de la demanda del tráfico [49].
- **Red de núcleo (Core Network):** En redes Non-Standalone (NSA), el núcleo de LTE gestiona la señalización y el control mientras el tráfico de datos se enruta a través de 5G NR. En redes Standalone (SA), el núcleo 5G opera de manera independiente, por lo que la capacidad de coordinar la compartición de espectro entre LTE y 5G es esencial para que el DSS funcione de forma eficiente, garantizando la transmisión simultánea de ambas tecnologías [50].
- **Gestión de recursos de radio (RRM):** Un sistema avanzado de Radio Resource Management (RRM) es fundamental para distribuir de manera dinámica los recursos de

tiempo y frecuencia entre LTE y 5G. RRM emplea algoritmos que monitorean las condiciones de la red y ajustan la asignación de espectro en tiempo real, asegurando la coexistencia de ambas tecnologías sin comprometer el rendimiento [50].

- **Coordinación de señales de control:** La correcta gestión de las Cell Reference Signals (CRS) de LTE y las Demodulation Reference Signals (DMRS) de 5G NR es crucial para evitar interferencias en un entorno de DSS. Estas señales de referencia se utilizan para la sincronización y estimación del canal, por lo que deben estar alineadas de manera eficiente para permitir la coexistencia en el mismo espectro sin degradar la calidad del servicio [50].
- **Dispositivos de usuario (UE) actualizados:** Los User Equipment (UE) deben estar equipados con software y hardware compatibles con DSS, permitiendo que puedan conectarse tanto a redes LTE como a 5G NR de manera eficiente. Esto asegura que los dispositivos puedan cambiar entre ambas tecnologías sin interrupciones, optimizando la experiencia del usuario [50].
- **Algoritmos de mitigación de interferencias:** La implementación de DSS depende de algoritmos avanzados de mitigación de interferencias, como el uso de subtramas MBSFN (Multicast Broadcast Single Frequency Network), que reservan ciertas subtramas para transmisiones de 5G, y la programación de minislots, que permiten a 5G utilizar porciones de tiempo dentro de las ranuras LTE. Estas técnicas optimizan el uso del espectro y minimizan las interferencias entre ambas tecnologías [49].

2.1.7. Interferencia en redes móviles

La interferencia es el primer factor que limita el desarrollo de los sistemas celulares. Las fuentes de interferencias incluyen a otras estaciones móviles dentro de la misma celda, o cualquier sistema no celular de forma inadvertida introduce energía dentro de la banda de frecuencia del sistema celular. Las interferencias en los canales de voz debida a una transmisión no deseada de otro abonado. Las interferencias son más fuertes en las áreas urbanas, debido al mayor ruido de radio frecuencia y al gran número de estaciones base y móviles, y son las responsables de formar un cuello de botella en la capacidad de la red y de la mayoría [51].

2.1.7.1. Causas de la interferencia.

La interferencia en las redes móviles se puede dar por diversos factores, incluyendo la interferencia producida por varias estaciones de base que compartan el mismo canal, también se da el caso en señales de canales cercanos se solapan distorsionando así la señal esperada. Asimismo, los dispositivos externos como microondas y radios pueden verse como un factor de interferencia con la calidad de la señal. Además, factores ambientales como la lluvia, la niebla y la configuración del terreno pueden influir en la propagación de las señales, provocando interferencia [52], [53].

2.1.8. Alta Densidad de tráfico en redes móviles.

Los desafíos provocados por la alta densidad de tráfico en redes móviles son debido al intento de muchos usuarios que acceden al mismo tiempo. Las causas ocurren a gran escala como conciertos y festivales que atraen grandes cantidades de personas, así como áreas urbanas densamente pobladas y el uso intensivo de datos por parte de aplicaciones que utilizan mucho ancho de banda, dando un resultado negativo en la congestión de la red, aumento de la latencia, pérdida de conexiones y disminución así de la calidad del servicio [54].

2.1.8.1. Soluciones y estrategias para manejar alta densidad.

Una solución significativa es el uso de tecnología avanzada, el uso de la tecnología 5G que ofrece velocidades más rápidas y más capacidad, puede sin duda ayudar a mitigar problemas relacionadas con la alta densidad de tráfico. La coexistencia de cuarta generación y quinta generación en el mismo espectro compartido optimiza el uso de los recursos limitados y también asegura que la experiencia del usuario en las redes 4G existentes no se vea comprometida durante el despliegue y expansión de las redes 5G [8], [11].

Entre estas innovaciones, “la principal incluye la reducción de transmisión de señales “always on” de sincronismo y referencia, para lograr obtener las bajas latencias” [55]. En situaciones donde el tráfico es densamente alto, resulta crucial utilizar el espectro de manera eficiente para preservar una calidad de servicio adecuada [11]. La capacidad de DSS para asignar dinámicamente el espectro según la demanda y las condiciones de tráfico puede mejorar

significativamente la experiencia del usuario, reduciendo la latencia, aumentando velocidad de datos y minimizando pérdida de paquetes [10].

La transición de las redes cuarta generación a quinta generación marca un avance considerable en términos de velocidad, capacidad y eficiencia. El 5G promete velocidades hasta cien veces superiores a 4G, con latencias reducidas y capacidad para conectar un número masivo de dispositivos [11]. El Espectro Dinámico Compartido facilita esta transición permitiendo que ambas tecnologías coexistan en la misma banda de frecuencia, optimizando así el uso del espectro y extendiendo la infraestructura 4G existente hacia la mayor capacidad de quinta generación [12].

2.1.9. Métricas de Rendimiento en Redes de Alta Densidad

2.1.9.1. Throughput (Rendimiento)

El throughput mide la cantidad de datos transmitidos exitosamente por unidad de tiempo, expresándose comúnmente en Mbps o Gbps. Esta métrica evalúa la capacidad del sistema para gestionar el tráfico de manera eficiente. Su cálculo se basa en la suma de los bits transmitidos en un intervalo definido, dividido por la duración de dicho intervalo. Según el estudio "Dynamic Spectrum Sharing for LTE-NR Downlink MIMO Systems", el throughput adquiere especial relevancia en el DSS, donde LTE (Evolución a Largo Plazo) y 5G comparten el espectro. Este trabajo destaca que asignar un mayor porcentaje de recursos al 5G puede incrementar significativamente el throughput en esta tecnología, aunque a expensas de degradar el rendimiento de LTE [27]

Adicionalmente, el análisis presentado en "2.1GHz Dynamic Spectrum Sharing Scheme for 4G/5G Mobile Network" enfatiza que la optimización en la asignación de subtramas resulta crucial para maximizar esta métrica, especialmente en aplicaciones de banda ancha móvil mejorado (eMBB) en escenarios urbanos densamente poblados[56]

2.1.9.2. Delay

El retardo mide el tiempo total que tarda un paquete de datos en viajar desde el emisor hasta el receptor, expresándose en milisegundos (ms). Esta métrica se calcula registrando el tiempo de envío y recepción de los paquetes, obteniendo el promedio de sus diferencias. El retardo es

crucial para evaluar el rendimiento de aplicaciones que requieren respuestas inmediatas, como servicios de baja latencia en 5G y transmisión en tiempo real. Según el estudio "Dynamic Spectrum Sharing for 5G NR and 4G LTE Coexistence", en escenarios DSS, la reasignación dinámica del espectro entre LTE y 5G puede generar fluctuaciones en el retardo, impactando la estabilidad del enlace y degradando la experiencia del usuario [38]

Además, "Possibility of Dynamic Spectrum Sharing System by VHF-band Radio Sensor and Machine Learning" detalla que una falta de coordinación entre estas tecnologías puede incrementar notablemente, afectando directamente la experiencia del usuario en aplicaciones críticas[57]

2.1.9.3. Eficiencia Espectral

La eficiencia espectral se mide en bits por segundo por hertz (bps/Hz) y representa la cantidad de datos transmitidos por unidad de ancho de banda disponible. Su cálculo se realiza dividiendo el throughput por el ancho de banda utilizado. En DSS, esta métrica es crucial para maximizar el aprovechamiento de recursos espectrales limitados. El artículo "Dynamic Spectrum Sharing for 5G NR and 4G LTE Coexistence: A Comprehensive Review" destaca que la eficiencia espectral debe optimizarse especialmente en las bandas bajas (<6 GHz) para soportar múltiples aplicaciones simultáneamente, como comunicaciones masivas entre máquinas (mMTC) y eMBB[58].

Asimismo, "Dynamic Spectrum Sharing System Challenges in High Traffic Environments" demuestra que el uso de esquemas de modulación avanzados, como OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) y TDD (Dúplex por División de Tiempo), resulta fundamental para mejorar esta métrica, especialmente en redes con alta densidad de tráfico[59]

2.1.9.4. Pérdida de Paquetes

La pérdida de paquetes, expresada como porcentaje, evalúa la proporción de datos enviados que no llegan a su destino. Se calcula como la diferencia entre el número de paquetes enviados y recibidos, dividido por los enviados. Esta métrica es crítica en DSS, ya que la congestión del espectro compartido puede incrementar significativamente las pérdidas, afectando la calidad de servicios sensibles como videollamadas y transmisiones en tiempo real[60]. Según "Dynamic

Spectrum Sharing for 5G NR and LTE: Performance Metrics in High-Density Scenarios", algoritmos como la retransmisión automática híbrida (HARQ) y la priorización de tráfico pueden mitigar estas pérdidas, asegurando un rendimiento estable incluso en condiciones de alta carga de tráfico.

2.1.9.5. Jitter (*Fluctuación en la Velocidad de Datos*)

El jitter mide la variabilidad en el tiempo de llegada de los paquetes, expresándose en milisegundos (ms). Se calcula como la desviación estándar del retraso de los paquetes en un intervalo definido. Esta métrica es clave para garantizar la estabilidad de servicios sensibles al tiempo, como videoconferencias y juegos en línea. El análisis "Dynamic Spectrum Sharing and QoS in Multi-Technology Environments" señala que en DSS, la asignación dinámica de recursos puede causar fluctuaciones significativas en esta métrica, particularmente en escenarios densamente poblados. Optimizar el jitter asegura que los usuarios experimenten un servicio fluido, incluso en condiciones de alta demanda[39]

2.1.Marco referencial.

2.1.1. *Compartición dinámica del espectro (DSS) para 5G y LTE: generación y análisis de señales.*

En la investigación de [61], confronta al método del archivo de configuración como el método con tiempo más rápido para la configuración inicial, de tal manera brinda una idea de funcionalidad y la configuración en cada paso y el script MATBLAD suministrado proporciona un prototipo para ilustrar la programación de ranuras y el uso compartido dinámico del espectro (DSS) que permite de gran manera el funcionamiento de las redes LTE y 5G en una banda de frecuencia común, lo que potencialmente se reutiliza la infraestructura LTE existente. En esencia obteniendo resultados que el archivo de configuración se puede transferir al instrumento mediante un protocolo de red o una memoria USB dirigiendo de tal manera el software hacia la ubicación del archivo.

2.1.2. *Compartición dinámica del espectro para futuras redes LTE-NR.*

Se identifica que el trabajo de [62], proporciona que la 5G es la próxima generación móvil que ya se está implementando, con lo cual se busca que revolucione nuestra sociedad con requisitos de objetivos extremadamente altos. Donde se denota como una solución eficiente que consiste en el uso de la compartición dinámica del espectro y se evalúa el rendimiento del sistema de comunicación que utiliza la función compartida dinámica del espectro. En lo cual se obtuvieron resultados que integro la compartición dinámica del espectro como un compromiso de pérdida máxima del 25% en el rendimiento. Sin embargo, la reducción no es tan sustancial, ya que el operador de red móvil no necesita comprar 15 MHz adicionales de ancho de banda utilizando el ancho de banda LTE ya existente para ofrecer servicios de 5G, generando de tal manera una reducción de costos y aumento en la eficiencia del espectro.

2.1.3. *Implementación de pequeños transmisores en un esquema de compartición del espectro.*

La investigación de [63], refiere que hoy en día existe mucha desinformación relacionada con el despliegue de antenas para 5G y las bandas de frecuencia, esta clase de investigación surge por la falta de documentos serios que testifiquen enfoques en realidades y no fantasías divulgadas con un lenguaje poco comprensible, con la problemática del despliegue de transmisores o estaciones bases y además, se tiene en cuenta un esquema de compartición de espectro, teniendo resultados que identifican el modelo de propagación que se basa en el modelo de propagación tradicional de Hata y se ha adaptado a funcionar a una frecuencia de 3.5 GHz donde las métricas de capacidad y cobertura dependen de estos modelos con escenarios más precisos para celdas pequeñas.

2.1.4. *Dynamic Spectrum Sharing.*

Samsung [64] indica que el sistema 5G admite una amplia gama de servicios, como banda ancha móvil mejorada, comunicaciones ultra confiables de baja latencia y comunicaciones masivas de tipo máquina, para lo cual se quiere llegar a estos beneficios sin tener interrupciones, los proveedores de servicios deben encontrar una ruta de transición fluida desde la evolución a largo plazo 4G hasta la nueva radio 5G. Sin embargo, las bandas de frecuencia recientemente lanzadas

para su uso e implementaciones 5G son más altas que las bandas de frecuencia 4G actuales que se ubican por debajo de los 3GHz. Por otro lado, un espectro de frecuencia más bajo es favorable para la implementación de 5G. De tal manera se evidencia resultados que, para una transmisión sin problemas, es fundamental implementar 5G en las bandas de frecuencia más bajas, que en su mayoría están ocupadas por frecuencia 4G.

2.1.5. Uso compartido dinámico del espectro y coexistencia con comunicaciones de dispositivo a dispositivo full duplex en redes 5G.

Manifiesta [65] que el acceso al espectro se ha convertido recientemente en la solución más deseable para mejorar en gran medida el rendimiento de los sistemas de telecomunicaciones, lo cual ha demostrado ser una solución viable para hacer frente al difícil problema de la escasez de espectro y también ha explorado ampliamente en las redes 5G de modo que multiplique tecnologías de acceso aleatorio pueda coexistir en una configuración cognitiva. Además, se prevé que la tecnología Full Dúplex desempeñe un papel importante en las redes 5G al permitir que un usuario transmita en las redes 5G al permitir que un usuario transmita y reciba en la misma banda de frecuencia.

2.2. Marco legal.

2.2.1. Ley Orgánica de Telecomunicaciones.

Artículo 5.- Definición de telecomunicaciones.

Las telecomunicaciones constituyen el proceso mediante el cual se lleva cabo la transmisión, emisión o recepción de información a distancia, empleando cualquier medio tecnológico disponible. Dicho proceso implica la conversión de la información en señales que son capaces de ser transmitidas a través de un medio físico, como un cable, una fibra óptica o el aire [66].

Artículo 10.- Redes públicas de telecomunicaciones.

Las redes públicas de telecomunicaciones constituyen sistemas de infraestructura tanto física como lógica que facilitan la transmisión, emisión y recepción de información a distancia, empleando diversos medios físicos o tecnológicos disponibles. Estas redes están diseñadas para

ser accesibles a cualquier individuo o entidad que requiera sus servicios y deben adherirse a los requisitos estipulados por la normativa vigente [66].

Artículo 16.- Telecomunicaciones reservadas a la seguridad nacional.

Para llevar a cabo las actividades de telecomunicaciones necesarias para la seguridad y defensa del Estado, se reservarán frecuencias del espectro radioeléctrico de acuerdo con el Plan Nacional de Frecuencias, cuya competencia recae en la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones [66].

Artículo 18.- Uso y explotación del espectro.

El espectro radioeléctrico es considerado un bien de dominio público y un recurso limitado del Estado, inalienable, imprescriptible e inembargable. Su uso y explotación requieren la obtención previa de una licencia habilitante emitida por la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, conforme a lo dispuesto en la presente ley [66].

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

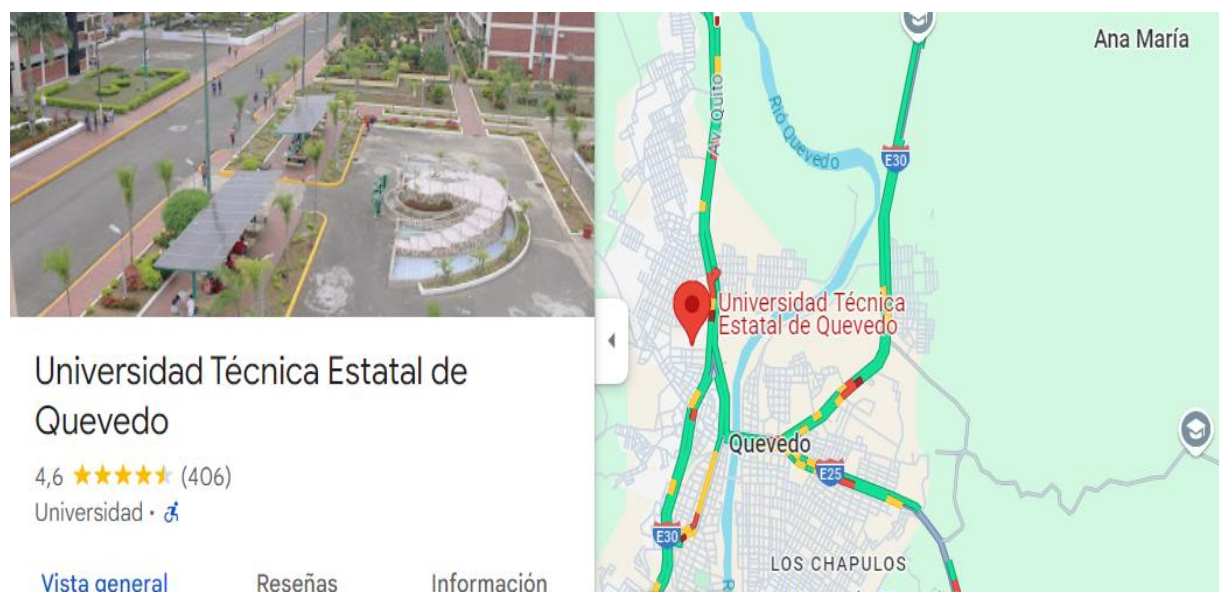
3.1. Localización.

La investigación se llevará a cabo en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo situado en la Av. Quito km. 1 ½ vía a Santo Domingo de los Tsáchilas, Quevedo - Los Ríos – Ecuador.

Latitud: -1.008445267762741

Longitud: -79.46889658523436

Figura 4. Locación de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo



Fuente: <https://maps.app.goo.gl/RRMBkKNTxyCPpjJ3A>

Elaborado: Kiara Intriago Posligua

3.2. Tipo de investigación

3.2.1. Investigación bibliográfica

Se llevó a cabo una recopilación, revisión y análisis crítico de la literatura académica y técnica disponible sobre el Espectro Dinámico Compartido (DSS) en redes 5G, que implicó la identificación y síntesis de estudios científicos, informes técnicos y normativas pertinentes. El propósito de este análisis será construir una base teórica sólida, fundamental para guiar el desarrollo de futuras investigaciones para optimizar la gestión del espectro y mejorar la eficiencia en la coexistencia de las tecnologías 4G y 5G en entornos de alta densidad de tráfico.

3.2.2. *Investigación descriptiva.*

En esta sección se describen las características del Espectro Dinámico Compartido (DSS) aplicado a redes móviles de quinta generación (5G). Se presentan de manera detallada las métricas fundamentales analizadas, con el propósito de evaluar su desempeño en escenarios de alta densidad de tráfico. Este análisis busca proporcionar una comprensión precisa de su comportamiento bajo condiciones operativas exigentes.

3.2.3. *Investigación comparativa.*

En esta investigación se enfoca en el análisis de datos de rendimiento, como las tasas de transmisión y la pérdida de recursos. Este enfoque es esencial para medir y evaluar con precisión los resultados obtenidos, permitiendo una comparación detallada entre diferentes configuraciones. A través de este análisis, es posible identificar las configuraciones más eficientes para optimizar el uso del espectro y garantizar un rendimiento óptimo en entornos de alta densidad de tráfico. De este modo, se fundamenta la toma de decisiones técnicas y estratégicas para el despliegue de redes móviles.

3.3. Diseño Cuasi-Experimental.

Se implementó simulaciones controladas para evaluar el desempeño del Espectro Dinámico Compartido (DSS) en entornos virtuales que replican condiciones reales en redes móviles de quinta generación (5G). Estas simulaciones analizarán escenarios tanto con DSS como sin DSS, ofreciendo una evaluación exhaustiva de su impacto en variables, aunque no se podrán controlar todas las variables externas, este enfoque proporcionará una visión realista y precisa del comportamiento del DSS bajo condiciones dinámicas, capturando así la complejidad y variabilidad de los entornos de alta densidad de tráfico en redes 5G.

3.4. Métodos de investigación.

3.4.1. Método cuantitativo.

Utilizando herramientas de simulación avanzadas, se llevó a cabo la recolección y análisis de datos cuantitativos para evaluar el rendimiento y eficiencia del espectro en redes móviles. Estas herramientas permiten desarrollar modelos que replican diversos escenarios de tráfico, emulando situaciones reales bajo condiciones controladas. Mediante este enfoque, es posible examinar métricas clave como latencia, velocidad de datos y tasa de pérdida de paquetes, ofreciendo una comprensión detallada del comportamiento del sistema en contextos específicos.

3.4.2. Método bibliográfico.

Para la recopilación de información relevante sobre el Espectro Dinámico Compartido (DSS) y tecnologías relacionadas, se emplearán bases de datos especializadas como IEEE Xplore, Google Académico, SpringerLink y ACM Digital Library. Este enfoque facilitará la compilación y análisis de hallazgos de estudios previos, artículos técnicos y normativas, con el objetivo de construir un marco teórico robusto y detectar brechas en la investigación actual, que el presente estudio busca abordar.

3.4.3. Método Cuasi-Experimental.

Este enfoque se orienta a replicar de manera precisa las condiciones operativas reales de las redes móviles. Las pruebas controladas permitirán una evaluación técnica y precisa de las soluciones propuestas, proporcionando una comparación significativa con los resultados obtenidos mediante simulaciones. La validación empírica lograda con este método incrementará la confianza y relevancia de los resultados al capturar las dinámicas complejas y los desafíos específicos que se presentan en los entornos operativos reales.

3.5. Fuentes de recopilación de información.

Las fuentes utilizadas para la recopilación de datos en esta investigación se detallan a continuación.

3.5.1. Fuentes primarias.

En esta investigación se examinaron publicaciones académicas, reportes técnicos y trabajos previos que exploran las tecnologías de comunicación y sus avances.

Las fuentes principales fueron recopiladas a partir de: IEEE Xplore, El motor de búsqueda Google Académico, Web of Science, ACM Digital Library, Scopus.

3.5.2. Fuentes secundarias.

Además, se revisaron tesis, estudios de caso y artículos académicos que abordan el rendimiento y la optimización del espectro dinámico compartido (DSS). Estos recursos secundarios se obtuvieron principalmente de:

- Repositorios universitarios
- Repositorios gubernamentales

3.6. Diseño de investigación.

3.6.1. Estudio e investigación.

Este estudio se centra en el rendimiento del Espectro Dinámico Compartido (DSS) en redes móviles 5G, un componente crucial para la optimización del uso del espectro en entornos de alta densidad. Dada la creciente demanda y las limitaciones actuales en la gestión del espectro, es esencial desarrollar e implementar técnicas avanzadas que mejoren la eficiencia del DSS. La investigación explora la aplicación de métodos de optimización avanzados que han demostrado ser efectivos en problemas complejos, con el objetivo de maximizar la capacidad y la cobertura de las redes 5G mediante una asignación más eficiente del espectro compartido.

3.6.2. Fases del estudio.

Fase 1: Revisión bibliográfica.

Esta fase abarca una revisión de la literatura técnica y científica relacionada con el Espectro Dinámico Compartido (DSS) en redes 5G. Se analizarán estudios previos, artículos de investigación y normativas internacionales para comprender cómo se ha implementado y evaluado el DSS en distintos contextos, especialmente en escenarios de alta densidad de tráfico.

Este análisis permitirá identificar brechas en el conocimiento actual y establecer un marco teórico robusto que sustente el enfoque metodológico del estudio.

Fase 2: Diseño de simulaciones.

En esta etapa, se diseñó simulaciones detalladas utilizando herramientas especializadas para modelar escenarios de alta densidad de tráfico que se centrarán en evaluar el comportamiento del DSS, especialmente en términos de su capacidad para mitigar la interferencia entre celdas y mejorar la eficiencia espectral, lo cual proporcionarán datos críticos sobre métricas como la pérdida de paquetes, latencia, fluctuación de la velocidad de datos y eficiencia espectral permitiendo una evaluación precisa del rendimiento del DSS en condiciones operativas realistas.

Fase 3: Análisis de datos:

Los datos recolectados durante las simulaciones serán sometidos a un análisis estadístico riguroso para determinar la efectividad del DSS en mejorar la coexistencia entre redes 4G y 5G. Este análisis incluirá la comparación de diferentes configuraciones de red y la evaluación de su impacto en la calidad del servicio. Se emplearán métodos avanzados para interpretar los resultados y extraer conclusiones que reflejen las implicaciones prácticas de la implementación del DSS en escenarios de alta densidad de tráfico. Además, se explorará cómo las variaciones en la configuración del DSS afectan las métricas de rendimiento, proporcionando una visión integral del potencial y las limitaciones de esta tecnología.

Fase 4: Evaluación de resultados:

Los resultados del análisis son evaluados en el contexto de la literatura existente, considerando tanto los aspectos técnicos como las necesidades prácticas de las redes de telecomunicaciones modernas. Se discutirán las implicaciones de los hallazgos para el diseño y la optimización de redes, y se formularán recomendaciones específicas para operadores de redes y reguladores. Esta evaluación no solo identificará posibles mejoras en las técnicas de DSS, sino que también proporcionará una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en la gestión del espectro en redes 5G.

3.7. Instrumentos de investigación.

En la investigación sobre el Espectro Dinámico Compartido (DSS), los instrumentos de investigación son las herramientas y técnicas utilizadas para recopilar y analizar datos relevantes para los objetivos del estudio. A continuación, se mencionan los instrumentos específicos que podrían ser útiles:

- **Software de simulación:**

Un componente esencial en este estudio será el uso de software avanzado de simulación, como OMNeT++, MATLAB o GNS3. Estos programas permiten modelar entornos de red complejos y simular el comportamiento del espectro dinámico compartido bajo diversas condiciones de tráfico y configuraciones de red. Te permitirán observar cómo el DSS gestiona la coexistencia de 4G y 5G y evaluar la eficiencia del espectro y la calidad del servicio.

- **Herramientas de análisis de datos:**

Para el análisis de los datos obtenidos de las simulaciones, podrías utilizar herramientas estadísticas como SPSS, o R, Python con librerías como Pandas y SciP. Estas herramientas ayudarán a realizar análisis estadísticos, generar gráficos y realizar pruebas para validar la significancia de los hallazgos.

3.8. Tratamiento de los datos.

- **Procesamiento y análisis de datos de simulación:**

Los datos generados por simulaciones de software serán procesados inicialmente para limpieza y transformación. Esto incluye la eliminación de datos atípicos, la corrección de errores y la normalización de los conjuntos de datos para garantizar consistencia en las comparativas. Posteriormente, se aplicarán técnicas estadísticas para analizar estos datos, incluyendo pruebas de hipótesis, análisis de varianza (ANOVA), y modelos de regresión si es aplicable, para determinar el impacto del DSS en las métricas de rendimiento como la latencia, velocidad de datos y pérdida de paquetes.

- **Visualización de datos.**

Para facilitar la interpretación de los resultados y la comunicación de los hallazgos, utilizará herramientas de visualización de datos como gráficos de líneas, histogramas y mapas de calor. Estas visualizaciones ayudarán a identificar patrones, tendencias y correlaciones en los datos de rendimiento del DSS.

3.9. Recursos humanos y materiales.

3.9.1. Talento humano.

En este proyecto, se pone énfasis en la organización, coordinación y desarrollo de las actividades realizadas por el equipo involucrado en la investigación sobre el rendimiento del Espectro Dinámico Compartido (DSS) en redes 5G, para garantizar una colaboración efectiva y un trabajo en equipo eficiente, facilitando así el logro de los objetivos del proyecto tanto a nivel individual como colectivo. Se fomenta un ambiente de cooperación y comunicación abierta para asegurar que todas las tareas se lleven a cabo de manera óptima.

3.9.2. Equipo de investigación.

La estructura de esta investigación se organizó en torno a dos roles principales: el director y la Autora del Proyecto de Investigación, cada uno de estos Autores desempeñan funciones en la gestión y ejecución del proyecto, cuya colaboración es fundamental para garantizar la eficiencia y el cumplimiento de los objetivos planteados.

Director del proyecto de investigación: Se encargó de la gestión integral del proyecto, liderando la planificación, organización y supervisión de las actividades. Este rol implicó la distribución de tareas y preparación de reportes periódicos sobre el progreso del estudio asegurando de que la calidad de los resultados fuera consistente con los estándares requeridos y de que los plazos establecidos se cumplieran adecuadamente.

Autora del proyecto de investigación: Responsable de desarrollar los escenarios de simulación necesarios para evaluar el DSS en entornos de alta densidad de tráfico. Este incluyó la identificación y análisis de métricas y garantizó que los resultados obtenidos fueran precisos y relevantes para la validación de los objetivos de la investigación.

Tabla 2. Recuso Humano

Personal	Descripción
Autor	Kiara Julissa Intriago Posligua
Director del proyecto de investigación	Ing. Angel Ivan Torres Quijije

Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

3.9.3. Selección de la herramienta de simulación

Se realizó un análisis comparativo entre tres plataformas de simulación: MATLAB, GNS3 y OMNeT++, evaluando sus características y capacidades en la simulación de redes móviles 5G. Este estudio permitió identificar las ventajas de cada herramienta en el modelado de escenarios complejos, como la implementación de DSS, y determinar su idoneidad para el rendimiento de las redes móviles.

Tabla 3. Comparación de simuladores

Característica	MATLAB	GNS3	OMNeT++
Uso Principal	Modelado matemático y simulación de algoritmos	Emulación de redes complejas con hardware real	Simulación detallada de redes móviles y distribuidas
Enfoque	Investigación y desarrollo en matemáticas aplicadas	Educación y pruebas en entornos reales	Investigación académica y desarrollo en redes
Soporte para 5G	Toolbox específico para simulaciones 5G	Integración con dispositivos físicos y virtuales	Módulo Simu5G para modelar redes 5G y LTE
Flexibilidad	Alta personalización a través de código	Permite integrar múltiples herramientas	Modularidad que facilita la adaptación a diferentes escenarios

Característica	MATLAB	GNS3	OMNeT++
Escalabilidad	Limitada por el hardware disponible	Alta, capaz de simular grandes topologías	Muy alta, ideal para simulaciones extensas
Interoperabilidad	Integración con software		
	Compatible con otras herramientas MATLAB	como Wireshark, VirtualBox	Soporta extensiones y módulos externos
Ventajas	Potente en cálculos matemáticos	Capacidad de emular entornos reales	Ideal para modelar escenarios complejos
Desventajas	Costoso, curva de aprendizaje empinada	Complejidad en configuraciones avanzadas	Requiere tiempo para configuraciones iniciales

Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

3.9.4. Recurso del Software.

Se optó por utilizar Omnet++, simulador de eventos discretos orientado a objetos desarrollado sobre la plataforma Eclipse, compatible con código fuente en C++. Este entorno posibilita definir y configurar modelos de red mediante (archivos .ned y .ini), lo que permite capturar secuencias de transmisión y analizar resultados a través de diversos diagramas. Su arquitectura modular y extensible facilita la integración de plugins y módulos personalizados, impulsando tanto la experimentación como el desarrollo de simulaciones complejas en ámbitos de investigación y aplicaciones académicas. Asimismo, Omnet++ se destaca como una herramienta especialmente apta para la simulación y estudio de redes móviles, brindando soporte robusto para el análisis de escenarios dinámicos.

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En la presente sección se ha expuesto en detalle el cumplimiento de los objetivos inicialmente establecidos. Se ha centrado particularmente en el análisis, el desarrollo y los resultados obtenidos para cada objetivo específico. Asimismo, se han descrito los parámetros y métricas empleados en la simulación de los escenarios, garantizando así una estructura lógica que facilite la comprensión del lector.

4.1. Primer resultado.

Luego de una revisión exhaustiva de la literatura, que incluyó documentos de tesis doctorales, artículos científicos y reportes técnicos de instituciones reconocidas, se identificaron seis métricas fundamentales para la evaluación del DSS. Estas métricas fueron seleccionadas con base en su relevancia y capacidad para abordar los desafíos inherentes a la coexistencia de tecnologías LTE y 5G en escenarios de alta densidad.

Cada una de ellas, respaldada por investigaciones, permite analizar aspectos críticos como el rendimiento, la eficiencia y la estabilidad de la red, garantizando así un enfoque integral en la evaluación del DSS. Este proceso de selección asegura que las métricas no solo sean técnicamente relevantes, sino también aplicables a condiciones reales, proporcionando una base sólida para optimizar el uso del espectro y mejorar la experiencia del usuario en entornos complejos.

4.1.1. Identificación de Métricas

Las siguientes métricas fueron seleccionadas como indicadores fundamentales para evaluar la eficacia del DSS:

Tabla 4 Tabla comparativa de metricas

Métrica	Justificación	Contribución al DSS	Limitaciones Observadas
Throughput	El throughput permite evaluar la capacidad de transferencia de datos, crítico en escenarios	Permite optimizar la asignación dinámica del espectro y maximizar la capacidad total del	Sensible a la congestión y asignación ineficiente de recursos.

	densos donde LTE y 5G comparten espectro. Según Yan et al. (2020), esta métrica permite gestionar grandes volúmenes de tráfico y optimizar la asignación del espectro [27].	sistema, asegurando la calidad del servicio en aplicaciones como el streaming de video UHD.	
Delay	Asegura tiempos de respuesta rápidos en aplicaciones sensibles al tiempo. Wang y Li (2019) destacan que su análisis en DSS evita interrupciones en servicios críticos, como telemedicina y URLLC [57]	Asegura una coexistencia tecnológica que no comprometa la calidad del servicio en aplicaciones en tiempo real.	Es difícil de optimizar en redes dinámicas debido a la variabilidad de las condiciones del espectro y la interferencia entre LTE y 5G.
Calidad de Canal	La calidad de canal determina la fiabilidad de la transmisión de datos en condiciones de interferencia o condiciones del espectro variables. Según MediaTek (2022), mejorar la calidad de canal es esencial para la eficiencia de DSS [39].	Optimiza el uso del espectro compartido, ajustando la potencia de transmisión y la asignación de recursos, lo que mejora la experiencia de usuario en entornos densos de tráfico.	Depende de la variabilidad del canal, que puede ser impredecible en escenarios de alta densidad o interferencia.

Señal a Interferencia más Ruido (SINR)	Permite determinar la calidad del enlace de comunicación en redes de espectro compartido. Un SINR elevado indica una mejor capacidad de transmisión de datos, mientras que valores bajos reflejan una degradación del rendimiento debido a interferencias. Según Zhou et al. (2021), en escenarios DSS, la interferencia generada por LTE CRS en subtramas compartidas puede afectar significativamente la calidad del enlace en 5G NR [67].	Permite optimizar la asignación de espectro mediante algoritmos de gestión de interferencias, mejorando la coexistencia entre LTE y 5G sin afectar la calidad del servicio. La implementación de técnicas como la perforación CRS y la gestión adaptativa de potencia ayuda a minimizar la degradación del SINR en DSS.	Sus fluctuaciones dependen de la variabilidad del tráfico y la densidad de usuarios, lo que puede generar inconsistencias en el rendimiento de la red. Además, en entornos con alta interferencia, la mejora del SINR requiere estrategias avanzadas de cancelación de interferencias y optimización de potencia.
Pérdida de Paquetes	Identifica problemas de congestión y enlaces no confiables en redes de alta densidad. Zhang y Chen (2018) resaltan su capacidad para mejorar la calidad del enlace en DSS [60].	Permite ajustar dinámicamente el uso del espectro para reducir errores de transmisión y mejorar la fiabilidad del servicio.	Limitada para reflejar estabilidad global de la red.

Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

4.2. Segundo resultado

4.2.1. Simulación de escenarios y parámetros

Se eligieron las librerías Simu5G e INET 3.5 debido a que ambas herramientas ofrecen capacidades complementarias para la simulación de entornos avanzados de comunicación. Simu5G se destaca por su enfoque en escenarios 5G New Radio, permitiendo evaluar el comportamiento de redes móviles en situaciones de alta densidad de tráfico y facilitando la implementación de nuevos algoritmos y protocolos. Por otro lado, INET 3.5 aporta modelos robustos para reproducir de manera realista el funcionamiento de protocolos y dispositivos en entornos cableados e inalámbricos. La integración de estas dos librerías crea un entorno de simulación integral que posibilita un análisis detallado del rendimiento del espectro dinámico compartido.

4.2.2. Código de configuración en OMNeT++

En el anexo 1, la simulación incluye la configuración de parámetros esenciales para evaluar el rendimiento del DSS, se establecen 25 bloques de recursos y niveles de potencia de transmisión de 26 dBm para los dispositivos usuario y 40 dBm para el eNodeB. Además, se fija un target BLER de 0.01 y un desplazamiento de BLER de 5, optimizando la calidad de transmisión, la configuración de SCTP desactiva el algoritmo de Nagle y los latidos para evitar retrasos en la transmisión de paquetes pequeños, finalmente el archivo de configuración IPv4 se define a través de un XML externo, asegurando una gestión estructurada de la red.

En el anexo 2, se define un tiempo límite de 20 segundos y se posicionan las estaciones base en coordenadas específicas, ubicando los eNB en (300m, 300m) y los gNB en (600m, 300m). Además, se habilita la interferencia en enlaces ascendentes y descendentes para un análisis más realista del entorno, la capa NR PDCP se integra de forma predeterminada en el gNodeB, y se asigna un identificador maestro, junto con la configuración de interfaz de red y tipo de control RRC.

En el anexo 3, se implementa agregación de portadoras con dos componentes en la banda de 2.1 GHz, cada uno con 25 bloques de recursos y numerología indexada en 0, Se asignan índices de portadora a las interfaces de radio de las estaciones base y los dispositivos usuario para optimizar la distribución del espectro, Asimismo se establece la conexión X2 con un único x2App por nodo de emparejamiento definiendo puertos de comunicación y direcciones de conexión entre eNB y gNB, lo que facilita la coordinación en la red.

En el anexo 4, se consideró escenarios con 100, 150 y 200 para ello se asignan identificadores específicos a cada dispositivo, diferenciando entre celdas LTE y NR, lo que permite una gestión adecuada de los recursos, se habilitaron la asociación dinámica de celdas y el traspaso entre estaciones base, garantizando continuidad en la conexión. La asignación de recursos se basa en la disciplina de planificación Proportional Fair, optimizando el uso del espectro. Por último, la movilidad de los usuarios se modela mediante Random Waypoint Mobility definiendo su posición inicial en un rango aleatorio y estableciendo una velocidad de desplazamiento de 13.8 mps.

En el anexo 5, la configuración de DSS para el enlace de descarga asigna una aplicación UDP por usuario y un número equivalente en el servidor, los usuarios actúan como receptores con puerto 3000, mientras que el servidor opera como transmisor, enviando paquetes de 2000 bytes con un tiempo de muestreo de 0.05 segundo, la transmisión inicia aleatoriamente entre 0.02 y 0.05 segundos, finalizando a los 39.9 segundos y se asigna un ToS de 10 para priorización del tráfico.

A continuación, se presenta el pseudocódigo correspondiente a la simulación de una red celular heterogénea que integra tecnologías LTE y 5G utilizando conectividad dual y compartición dinámica del espectro (DSS). Este esquema contempla la creación de nodos de acceso (eNodeB/gNodeB), generación de usuarios móviles con movilidad aleatoria, configuración de tráfico constante (CBR), y el modelado de interferencia mediante celdas de fondo

```
INICIO SimulaciónRedCelular
  DEFINIR ÁreaSimulación = (1000m x 800m)
  DEFINIR TiempoMáximoSimulación = 20s
  CREAR eNodeB EN (300m, 300m) CON:
    PotenciaTransmisión: 40 dBm
    TipoNIC: LteNicEnbD2D
```

```

    ProtocoloPDCP: NRPdcpRrcEnb
    CREAR gNodeB EN (600m, 300m) CON:
        PotenciaTransmisión: 20 dBm
        IDMaestro: 1
    CONFIGURAR AgregaciónPortadoras:
        NúmeroPortadoras: 2
        Frecuencia: 2.1 GHz (ambas)
        BandasDisponibles: 25
    PARA i = 1 HASTA ${usuarios} HACER
        CREAR UE EN (X_aleatorio, Y_aleatorio) CON:
            Movilidad: RandomWaypoint (velocidad 13.89m/s)
            PotenciaTransmisión: 26 dBm
            AsociaciónDual: [LTE: cellId=1, 5G: cellId=2]
        FIN PARA
    ESTABLECER EnlaceX2 ENTRE eNodeB Y gNodeB:
        PuertoLocal: 5000 + index
        HabilitarHandover: true
        ConectividadDual: true
    SI Modo = "LTE-5G-DSS" ENTONCES
        TOS = 10 // Calidad de servicio para DSS
    SINO
        TOS = -1 // LTE estándar
    FIN SI
    CONFIGURAR AplicacionesCBR:
        Clientes (UEs): CbrReceiver (puerto 3000)
        Servidor: CbrSender (paquetes 2000B, intervalo 0.05s)
        Duración: [0.02s-0.05s → 39.9s]
    PARA j = 1 HASTA 3 HACER
        CREAR CeldaFondo EN (posX[j], posY[j]) CON:
            UEsFondo: 25
            ConfigNR: true (25 bandas, numerología 0)
        FIN PARA
    INICIAR Simulación CON:
        InterferenciaUL/DL: true
        AsociaciónCeldaDinámica: true
        SchedulingDL: "Proportional Fair"
        LímiteTiempo: TiempoMáximoSimulación
    FIN SimulaciónRedCelular

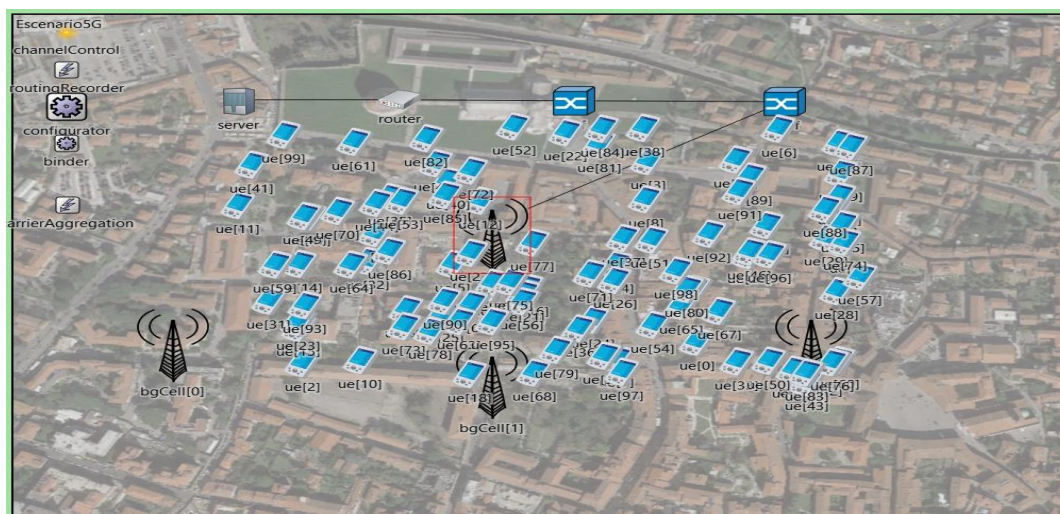
```

Ilustración 1 Pseudocódigo de la lógica central de simulación LTE-5G DSS

4.2.3. Demostración de la simulación en escenario de 5G y DSS.

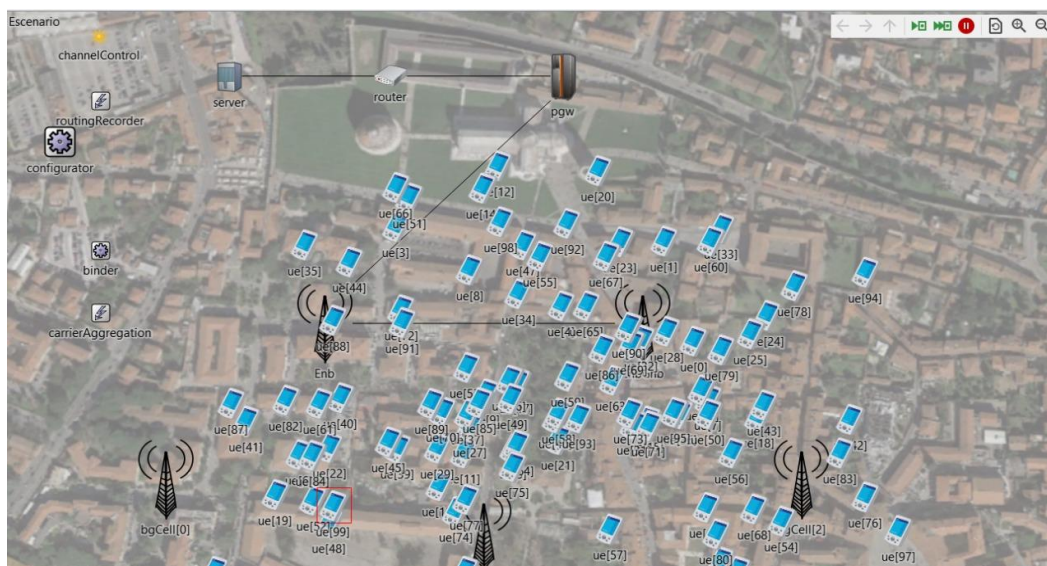
En la figura 5, el despliegue es totalmente 5G, donde las estaciones base gNB (gNodeB) son las encargadas de gestionar la conexión de los dispositivos a la red, estas estaciones operan con una infraestructura dedicada exclusivamente a 5G, permitiendo mayor velocidad de transmisión y

Figura 5. Escenario5G con 100 usuarios



Autor: Kiara Intriago Posligua

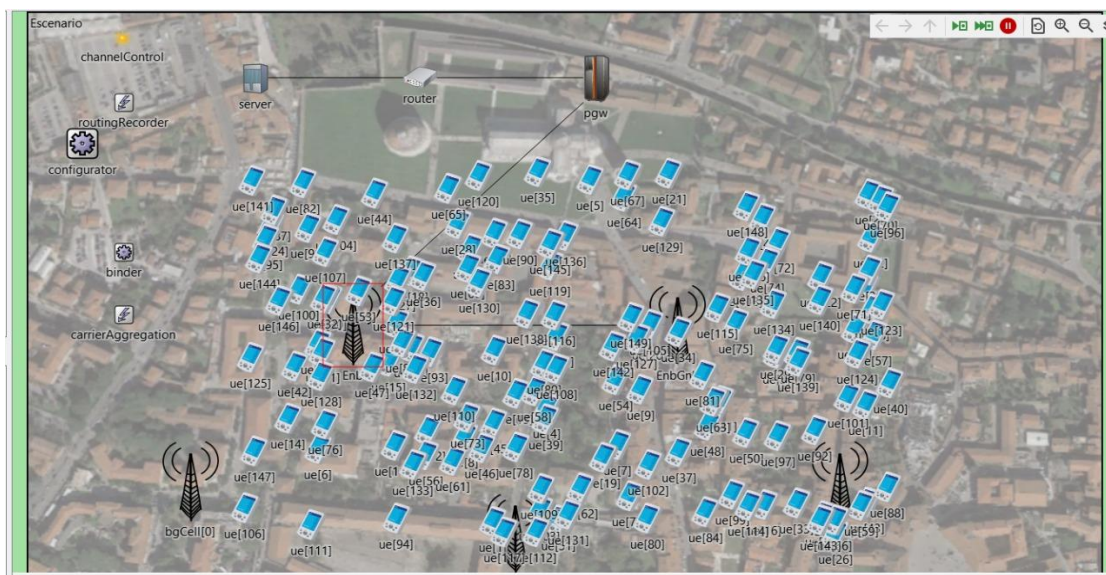
Figura 6. Escenario DSS con 100 usuarios



Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

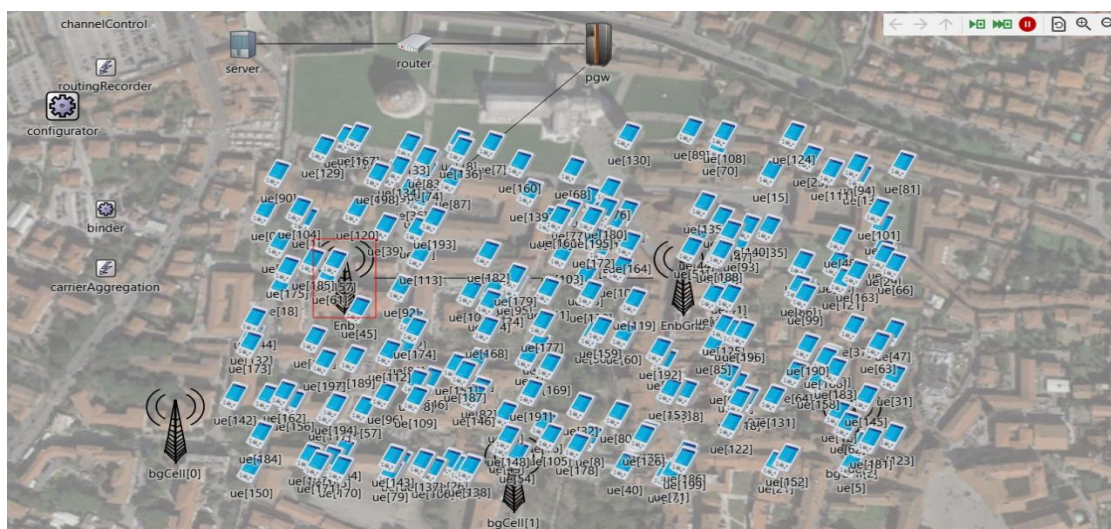
Figura 7. Escenario DSS con 150 usuarios



Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

Figura 8. Escenario DSS con 200 usuarios



Fuente: Investigadora

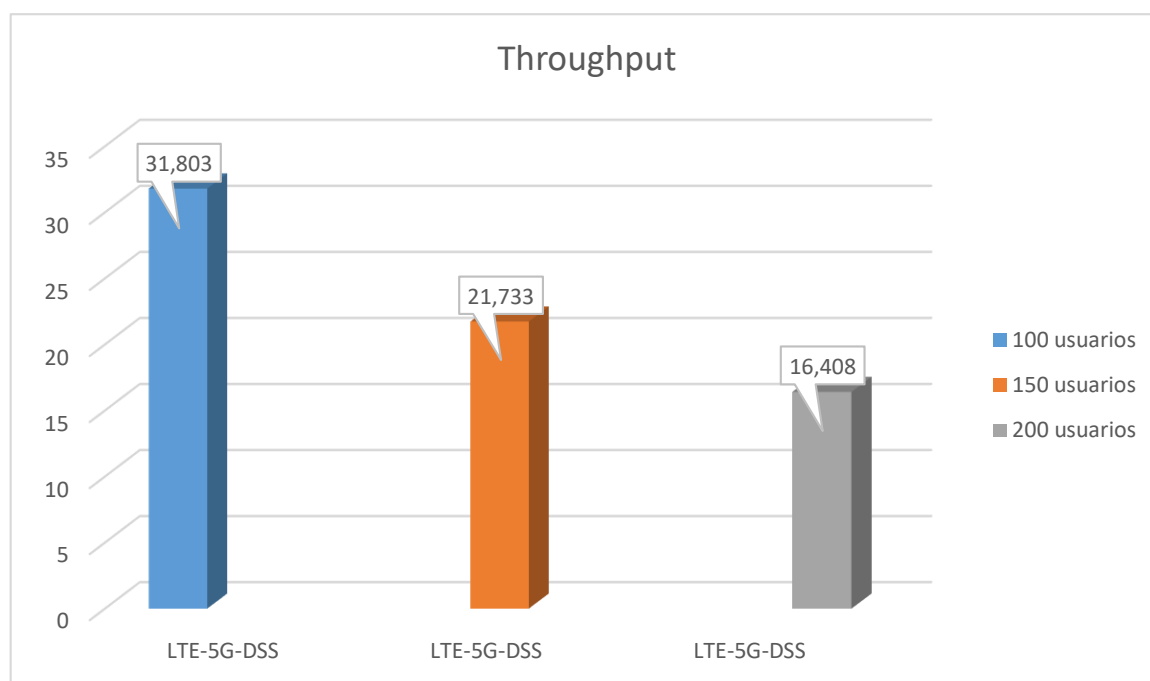
Autor: Kiara Intriago Posligua

4.2.4. Throughput promedio de LTE-5G-DSS.

En la figura 9, el sistema alcanza un throughput al tener 100 usuarios cercano a 31,803 kbps, reflejando un escenario con menor saturación, con 150 usuarios se observa una reducción a 21,733 kbps lo que indica un mayor uso de los recursos disponibles, en el caso de 200 usuarios el valor desciende a aproximadamente 16,408 kbps mostrando una pérdida de capacidad debido al incremento de la demanda en la red.

Estos resultados evidencian que, aunque DSS facilita la compartición de espectro entre LTE y 5G, el rendimiento del sistema se ve afectado a medida que la carga crece. La reducción del throughput sugiere que, en condiciones de tráfico elevado se fundamente la optimización de la gestión de recursos para evitar una degradación significativa en la calidad del servicio.

Figura 9. Throughput promedio de LTE-5G-DSS.



Fuente: Investigadora

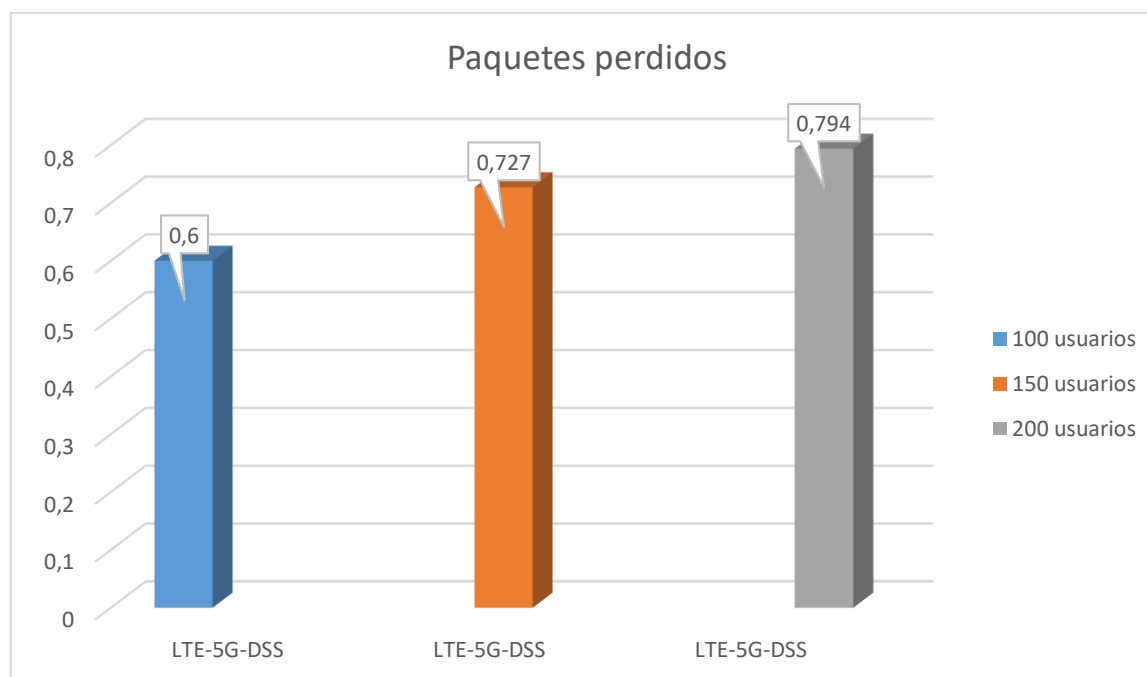
Autor: Kiara Intriago Posligua

4.2.5. Paquetes perdidos en LTE-5G DSS.

En la figura 10, la tasa de paquetes perdidos en los 100 usuarios es de aproximadamente 0.600, conforme la carga incrementa a 150 usuarios la pérdida aumenta a 0.727, lo que indica una mayor saturación del canal, Finalmente con 200 usuarios el valor alcanza cerca de 0.794, reflejando una mayor degradación en el rendimiento debido a la creciente demanda de recursos.

Estos resultados evidencian que, si bien DSS permite la coexistencia de LTE y 5G en el mismo espectro, su desempeño se ve afectado por la densidad de tráfico mostrando un incremento en la tasa de paquetes perdidos a medida que la cantidad de usuarios crece.

Figura 10. Promedio de paquetes perdidos en LTE-5G DSS.



Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

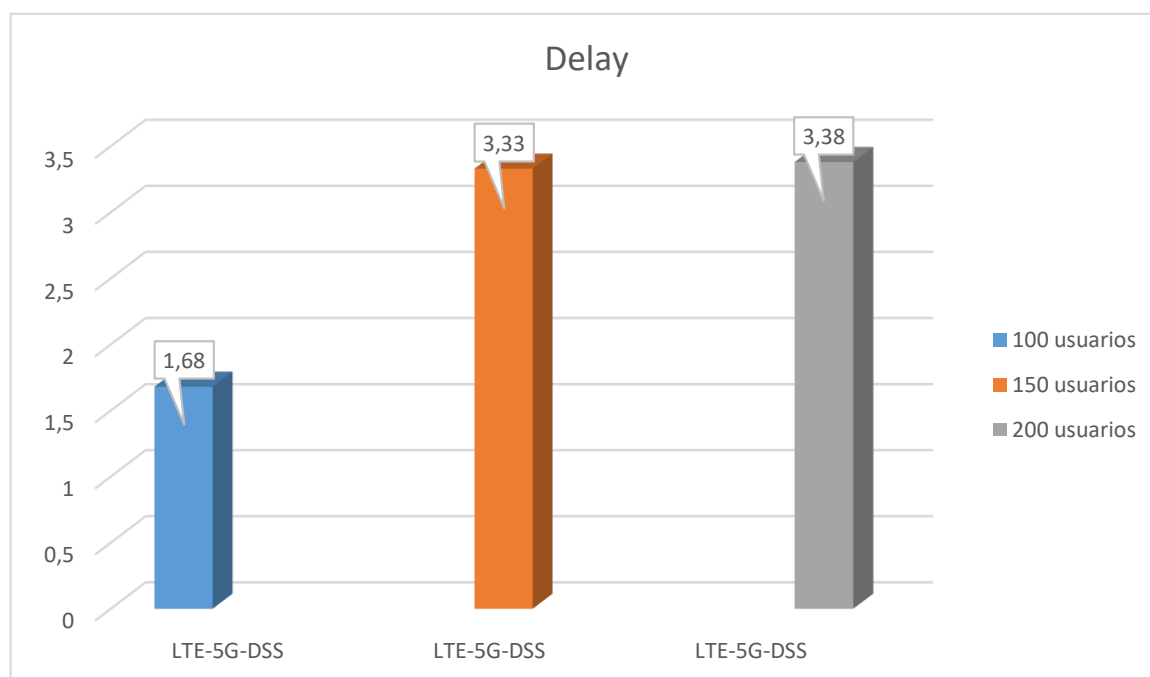
4.2.6. Delay en LTE-5G DSS.

En la figura 11, el retardo de 100 usuarios se mantiene en aproximadamente 1.68 segundos, reflejando una red con menor congestión, con 150 usuarios el delay se incrementa a 3.33

segundos, debido a la mayor competencia por los recursos compartido finalmente con 200 usuarios el retardo alcanza cerca de 3.38 segundos, lo que sugiere que el sistema sigue operando de manera estable a pesar del aumento de la carga.

Estos resultados demuestran que DSS optimiza el uso del espectro al distribuir dinámicamente los recursos entre LTE y 5G, logrando un rendimiento superior al de una red LTE convencional. Aunque el delay crece con la densidad de usuarios, la gestión del espectro compartido permite una mejor distribución de los recursos, lo que contribuye a mantener la calidad del servicio en escenarios de alta demanda.

Figura 11. Promedio de Delay en LTE-5G DSS.



Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

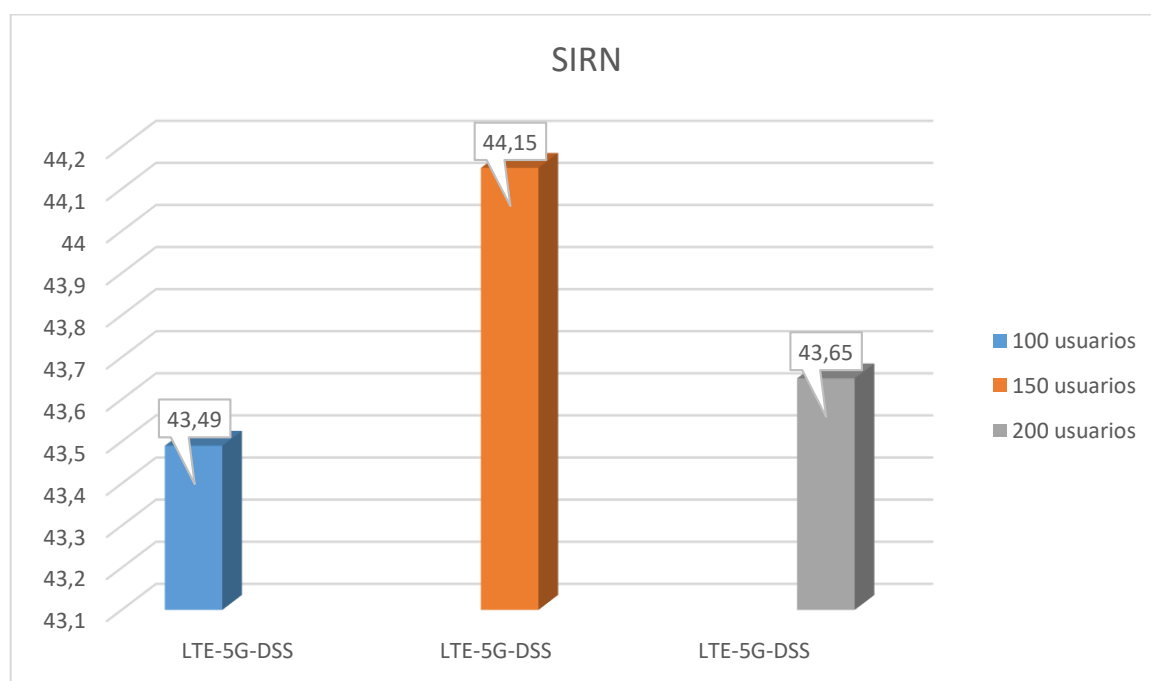
4.2.7. SIRS en LTE-5G DSS.

En la figura 12, el valor de los 100 usuarios se encuentra cercano a 43.49 dB, lo que refleja condiciones óptimas para la transmisión de datos, con 150 usuarios y 200 usuarios, el SINR se mantiene prácticamente constante en torno a 44.15 – 43.65 dB, lo que sugiere que el mecanismo

de compartición dinámica del espectro no introduce interferencias significativas que degraden la calidad de la señal.

Estos resultados destacan la eficiencia de DSS para gestionar el espectro sin afectar la relación señal-ruido, permitiendo que LTE y 5G operen de manera conjunta sin comprometer la estabilidad del enlace. Esto garantiza que, incluso en escenarios de alta densidad de usuarios, la calidad de la señal se mantenga dentro de parámetros óptimos para una transmisión confiable.

Figura 12. Promedio de SIRS en LTE-5G DSS.



Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

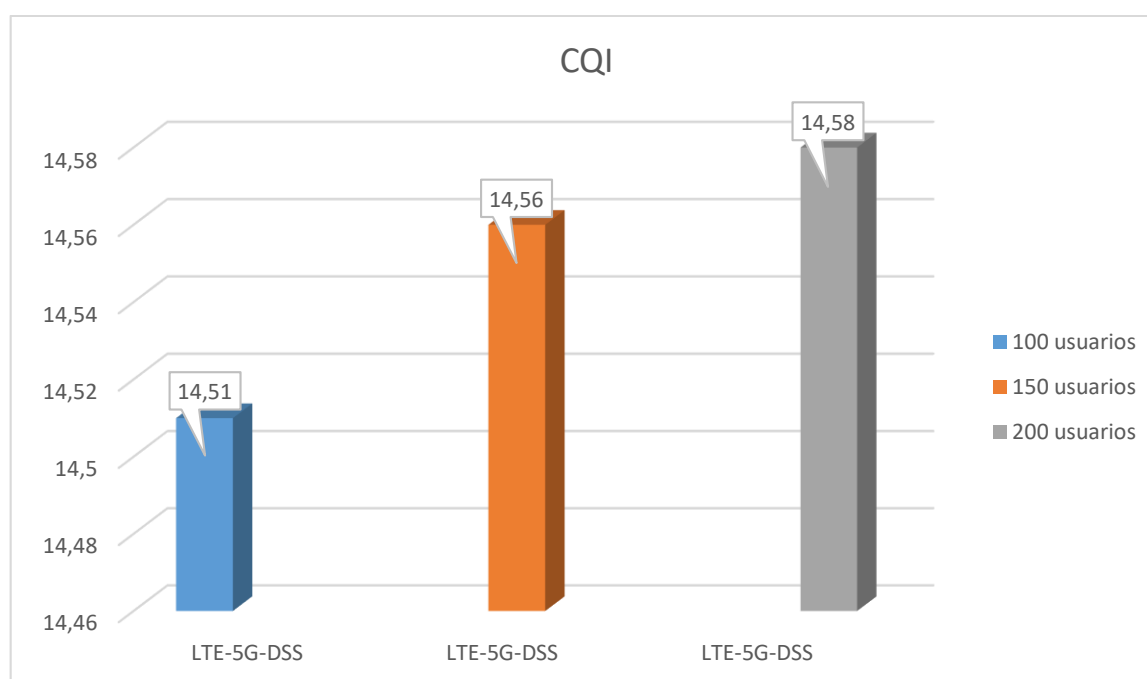
4.2.8. CQI en LTE-5G DSS.

En la figura 13, En el enlace descendente para un escenario con 100 usuarios se mantiene en torno a 14, mientras que, para configuraciones con 150 y 240 usuarios, dicho valor oscila entre 14.2 y 13.8, evidenciando una estabilidad en la calidad del canal a pesar del incremento en la carga de usuarios. Este comportamiento indica que el mecanismo de compartición dinámica del

espectro (DSS) logra una asignación eficiente de los recursos sin afectar negativamente el desempeño del canal.

Los resultados obtenidos destacan la eficiencia del DSS en la gestión del espectro compartido entre LTE y 5G, asegurando un rendimiento uniforme incluso en escenarios de alta densidad de usuarios. La estabilidad del CQI sugiere que la distribución del espectro se mantiene dentro de parámetros óptimos, permitiendo la coexistencia de ambas tecnologías sin comprometer la calidad del enlace descendente y garantizando una transmisión de datos confiable y sostenida.

Figura 13. Promedio de QCI en LTE-5G-DSS



Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

4.3. Tercer Resultado

4.3.1. Comparación Troughput promedio en escenarios LTE, NR, DSS.

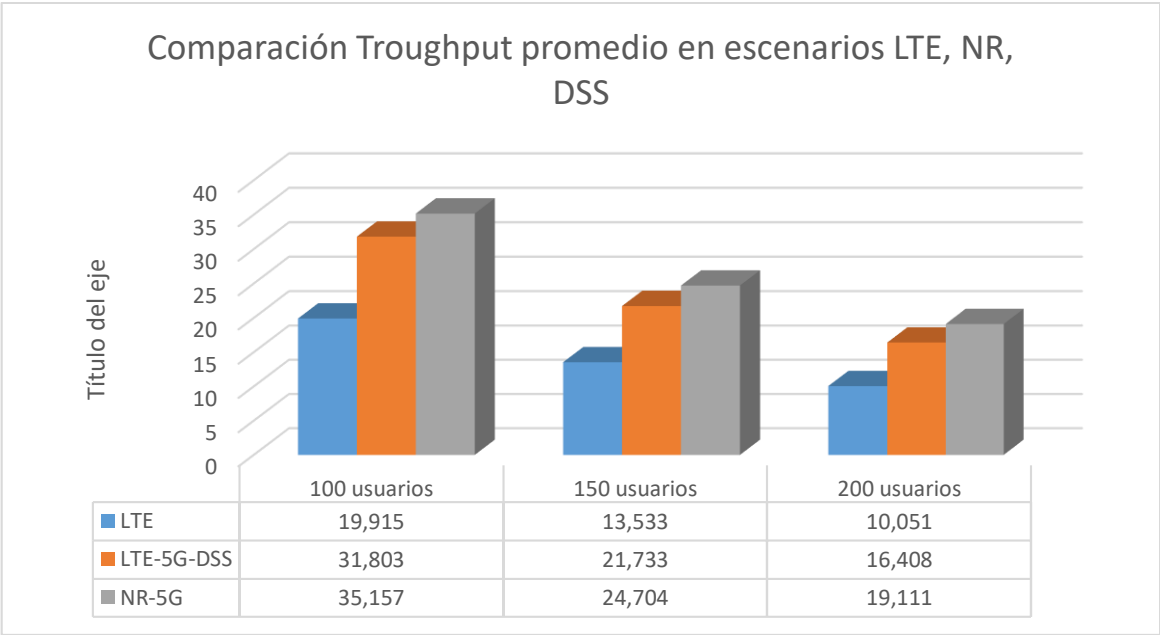
Los resultados indican que LTE alcanza la menor tasa de transmisión de datos en todos los casos analizados, con una tendencia decreciente a medida que aumenta la cantidad de usuarios. Esto

se debe a la asignación rígida de recursos y a una menor capacidad de adaptación en condiciones de alta demanda, lo que provoca congestión y reduce la eficiencia en la transmisión de datos.

En cambio, en la red 5G se obtuvo el mejor rendimiento en términos de throughput, manteniendo valores superiores en comparación con LTE y LTE-5G DSS. Su ventaja radica en la gestión avanzada del espectro y el uso de tecnologías como multiplexación flexible, formación de haces direccionales y antenas masivas, que optimizan la utilización de los recursos de radio y mejoran la tasa de transferencia, incluso en escenarios con alta densidad de usuarios.

Y en las estrategias de DSS se permitió una mejora significativa respecto a LTE, proporcionando una distribución más dinámica de los recursos espectrales entre ambas tecnologías. Sin embargo, su desempeño sigue por debajo de una implementación 5G dedicada, ya que la coexistencia con LTE introduce ciertos compromisos en la eficiencia de la asignación del espectro, limitando su capacidad máxima de transmisión.

Figura 14. Promedio de Troughput en escenarios LTE, NR, DSS.



Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

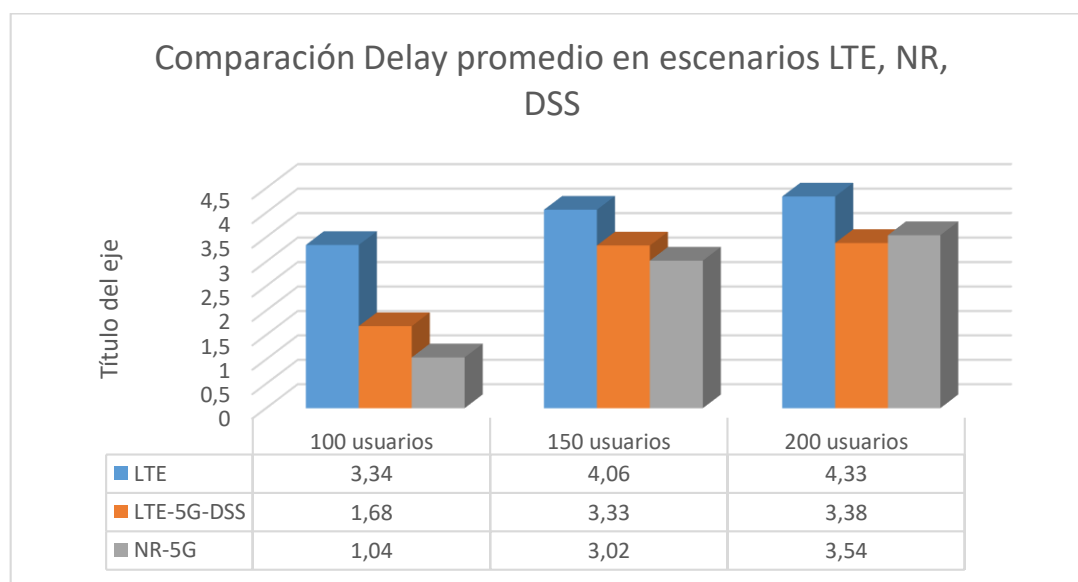
4.3.2. Comparación Delay promedio en escenarios LTE, NR, DSS.

Los resultados muestran que LTE presenta el mayor delay en todos los casos, con una tendencia creciente a medida que aumenta el número de usuarios. Esto se debe a la asignación fija de recursos, una menor eficiencia espectral y mayores tiempos de retransmisión debido a la congestión de la red. A medida que la cantidad de usuarios incrementa, la capacidad de respuesta de LTE se ve limitada, lo que provoca un aumento considerable en el retardo de transmisión.

Por lo tanto, la red 5G se obtiene el mejor desempeño en términos de delay, presentando valores significativamente menores en comparación con LTE y LTE-5G DSS. Esta mejora se debe a su baja latencia inherente, esquemas de acceso más eficientes y el uso de tecnologías avanzadas como beamforming y numerologías escalables. Gracias a estas optimizaciones, NR-5G logra mantener tiempos de transmisión reducidos incluso en escenarios con alta densidad de usuarios.

Por ultimo, el esquema DSS mejora el rendimiento respecto a LTE, reduciendo el delay promedio en todos los casos analizados. Sin embargo, su desempeño sigue estando por debajo de NR-5G debido a la necesidad de compartir recursos espectrales con LTE, lo que introduce cierta variabilidad en la asignación de ancho de banda y afecta los tiempos de transmisión. A pesar de esto, DSS representa una solución eficiente para ofrecer mejoras en latencia sin requerir una infraestructura completamente dedicada a 5G.

Figura 15. Promedio de Delay en escenarios LTE, NR, DSS.



Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

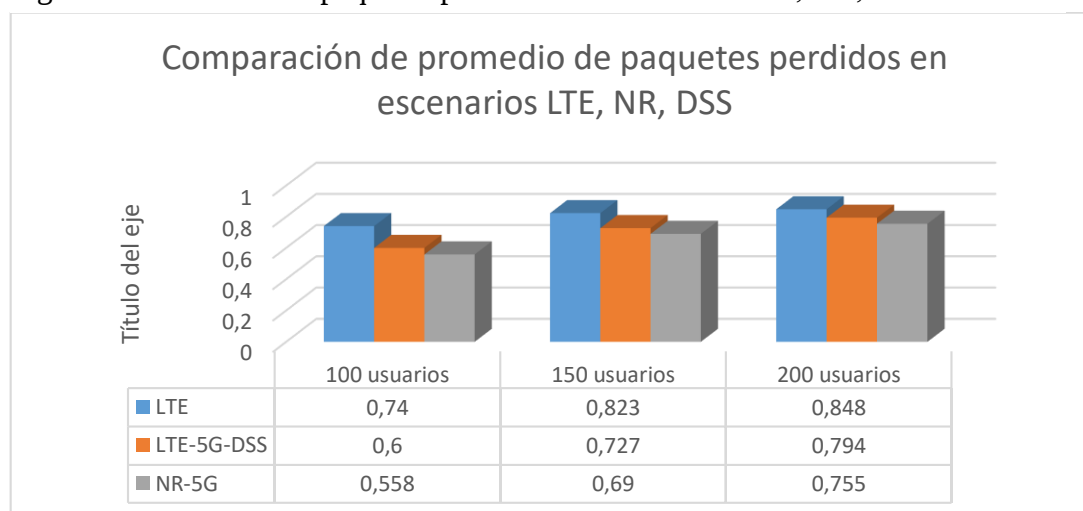
4.3.3. Comparación de promedio de paquetes perdidos en escenarios LTE, NR, DSS.

Los resultados en la figura 16, muestran que LTE presenta la mayor pérdida de paquetes en todos los escenarios evaluados, con un aumento significativo a medida que crece el número de usuarios. Esto se debe a su gestión estática del espectro, que no permite una asignación dinámica eficiente de los recursos, lo que genera congestión y colisiones a medida que la red se satura.

Por el contrario, la tecnología NR-5G mostró el mejor desempeño en términos de pérdida de paquetes, con valores consistentemente inferiores a LTE y LTE-5G DSS. Esto se debe a su capacidad para gestionar de manera eficiente el espectro mediante técnicas avanzadas, su capacidad de adaptación dinámica a la carga de tráfico le permiten mantener una transmisión más confiable, reduciendo significativamente la pérdida de paquetes incluso en escenarios con un alto número de usuarios.

Finalmente, el DSS permitió una reducción en la pérdida de paquetes en comparación con LTE, aunque sin alcanzar el rendimiento de NR-5G. Esto se debe a que DSS optimiza el uso del espectro al permitir la coexistencia de LTE y 5G en la misma banda, mitigando la congestión de LTE en escenarios de alta carga. Sin embargo, la eficiencia del sistema sigue limitada por el overhead asociado a la compartición del espectro y la necesidad de mantener compatibilidad con ambas tecnologías.

Figura 16. Promedio de paquetes perdidos en escenarios LTE, NR, DSS.



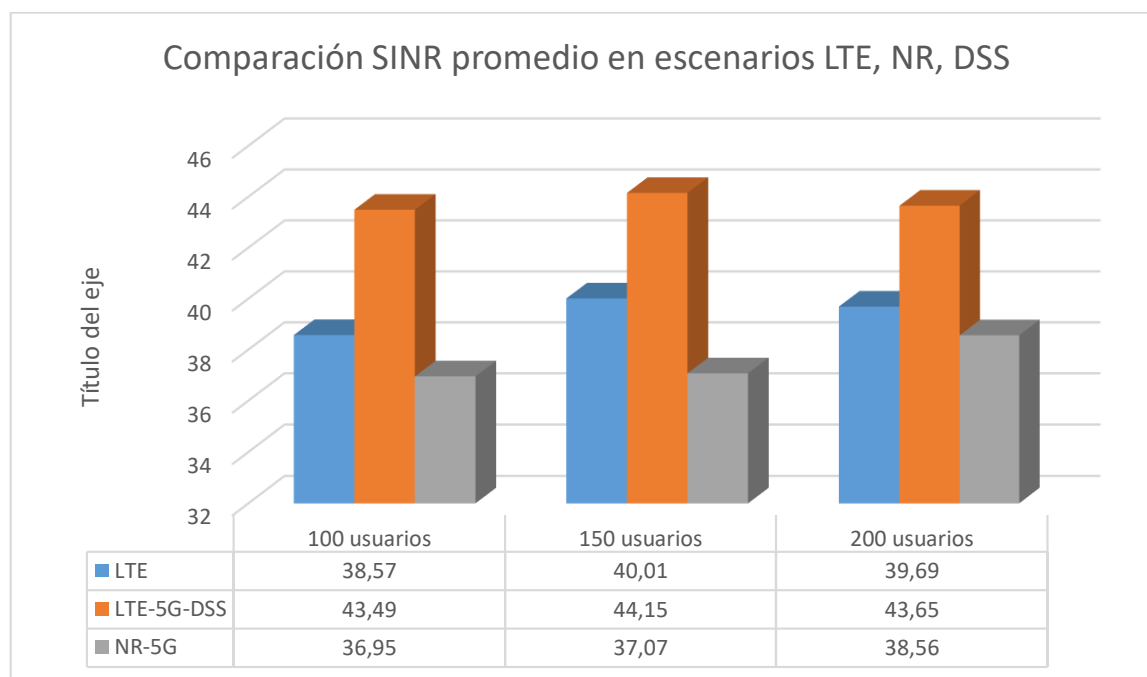
Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

4.3.4. Comparación SINR promedio en escenarios LTE, NR, DSS.

En la figura 17, muestra como la asignación del espectro impacta el rendimiento de la red. Una red 5G presenta el menor SINR debido al uso de frecuencias más altas, mayor atenuación y mayor interferencia en entornos densos. Por otro lado, al usar DSS logra el mejor SINR gracias a la compartición dinámica del espectro, optimizando los recursos y reduciendo la interferencia en comparación con el espectro exclusivo de 5G. LTE mantiene un SINR intermedio debido a su operación en bandas más bajas, lo que mejora la cobertura, pero sin la flexibilidad del DSS. Estos resultados destacan que Dynamic Spectrum Sharing (DSS) es una estrategia eficiente para maximizar el rendimiento del espectro compartido entre LTE y 5G, mejorando la coexistencia y la calidad de la señal en escenarios de alta densidad de tráfico.

Figura 17. Promedio de SINR en escenario de LTE, NR, DSS



Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

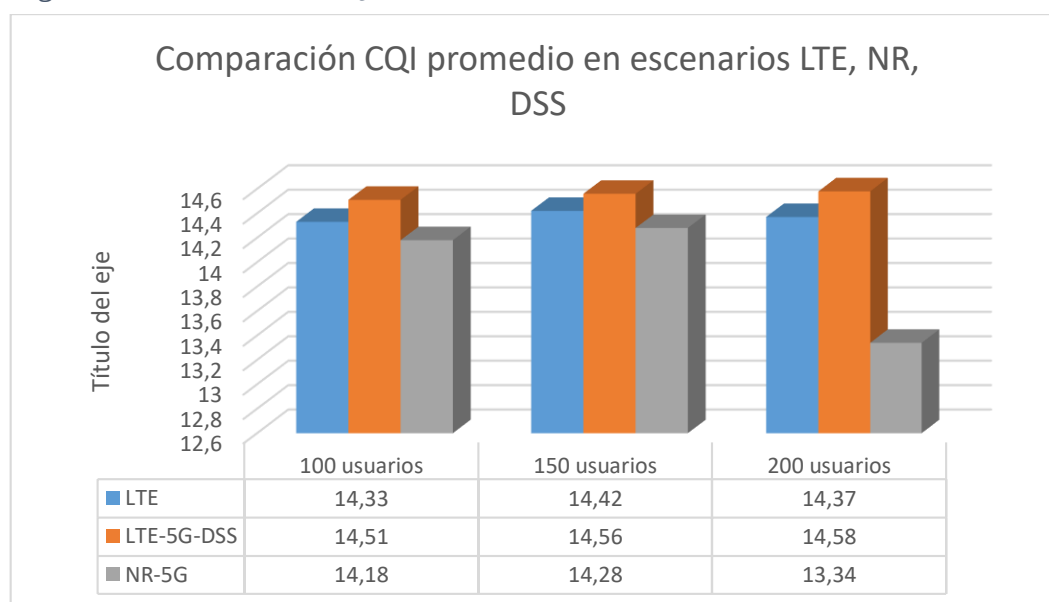
4.3.5. Comparación CQI promedio en escenarios LTE, NR, DSS.

En la figura presentada, NR-5G presenta los valores más bajos de CQI promedio en todos los escenarios evaluados (100, 150 y 200 usuarios), mientras que LTE y LTE-5G DSS exhiben valores de CQI ligeramente superiores. Se observa además que, para 100 y 200 usuarios, el mejor desempeño en términos de CQI recae en LTE-5G DSS, mientras que para 150 usuarios es LTE quien logra el valor promedio más alto.

Este comportamiento puede explicarse debido a que NR-5G, al operar con configuraciones y bandas de frecuencia más avanzadas (o más altas), puede verse afectado por mayores atenuaciones o overhead de control en ciertas condiciones, reduciendo la percepción de la calidad del canal (CQI). Por el contrario LTE, al ser una tecnología madura y optimizada para bandas de frecuencia específicas, mantiene valores de CQI promedio más estables incluso a medida que aumenta el número de usuarios.

Finalmente, la capacidad de DSS para compartir espectro entre LTE y 5G favorece una asignación de recursos algo más dinámica que la de LTE puro, logrando un CQI promedio competitivo en la mayoría de los escenarios. No obstante, el potencial de NR-5G para alcanzar una calidad de canal superior se ve limitado en la práctica por la coexistencia con LTE y el overhead necesario para garantizar compatibilidad entre ambas tecnologías.

Figura 18. Promedio de CQI en escenario de LTE, NR, DSS



Fuente: Investigadora

Autor: Kiara Intriago Posligua

4.4. Discusión de resultados

La simulación reveló que, aunque DSS es una solución flexible, su desempeño no es homogéneo en todas las condiciones de red, como señala el Libro Blanco Técnico de DSS (2021), la capacidad de DSS para ajustar dinámicamente la asignación de espectro entre LTE y 5G puede generar ineficiencias debido a la sobrecarga de señalización y la necesidad de coordinación constante Dynamic-Spectrum-Sharing. Lin et al. (2023) demostraron que en una red de 40 MHz en 2.1 GHz, DSS puede reducir la tasa de transmisión en 5-11%, lo cual es similar a la degradación observada en los resultados de esta investigación.

Estos hallazgos resaltan la importancia de desarrollar algoritmos más eficientes de gestión de espectro para optimizar el desempeño de DSS en condiciones de tráfico elevado, relevante sería el desarrollo de algoritmos adaptativos que ajusten dinámicamente la asignación de recursos en función de la carga de tráfico en tiempo real.

Se observó que DSS proporciona una mejora respecto a LTE en términos de estabilidad del enlace y gestión del tráfico, aunque no alcanza los niveles de desempeño de un despliegue 5G puro. La reducción de la latencia en DSS coincide con los estudios de Morocho Cayamcela y Lim, quienes resaltan la importancia de la inteligencia artificial y la gestión avanzada del espectro para minimizar los tiempos de transmisión en redes de nueva generación. Sin embargo, se identificó un aumento en la pérdida de paquetes con el incremento de usuarios, lo que concuerda con los hallazgos de Zhou et al., quienes advierten que la reasignación dinámica del espectro puede generar fluctuaciones en la calidad del servicio. A pesar de estas limitaciones, la estabilidad del SINR sugiere que la coexistencia de LTE y 5G bajo DSS puede gestionarse eficientemente sin comprometer la calidad del enlace, lo que refuerza las conclusiones de Kim et al. sobre la viabilidad de esta tecnología para maximizar el rendimiento en entornos de alta densidad de tráfico.

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- ✓ Se identificaron seis métricas fundamentales que proporcionaron una evaluación precisa y profunda del rendimiento del DSS, permitiendo un análisis integral del impacto que diferentes condiciones operativas ejercen sobre su eficiencia, esta selección estratégica facilitó una comprensión detallada de los principales desafíos técnicos derivados de la coexistencia entre las tecnologías LTE y 5G, destacando aspectos críticos como la interferencia, la gestión dinámica del espectro y la estabilidad en condiciones exigentes, el análisis de estas métricas resultó esencial para evidenciar las oportunidades y limitaciones técnicas del DSS.
- ✓ Mediante simulaciones detalladas en OMNeT++, se diseñaron escenarios precisos que permitieron evaluar el desempeño del DSS bajo condiciones realistas de alta densidad de tráfico, estos escenarios revelaron cómo el DSS gestiona eficientemente recursos espectrales compartidos, manteniendo niveles adecuados de throughput, latencia y pérdida de paquetes, los resultados confirmaron que aunque la congestión creciente afecta el rendimiento DSS mantiene una capacidad significativa para adaptarse dinámicamente, garantizando una optimización efectiva y estable del espectro radioeléctrico en condiciones de alta exigencia operativa.
- ✓ La evaluación comparativa de los escenarios simulados demostró que DSS representa una solución intermedia efectiva, ofreciendo mejoras sustanciales en rendimiento respecto a LTE aunque con ligeras desventajas frente a una infraestructura exclusivamente dedicada a 5G NR. DSS logró reducir significativamente las pérdidas de paquetes y latencia, optimizando el uso del espectro disponible y demostrando una mejora considerable en la calidad de servicio respecto a LTE. No obstante, su desempeño aún presenta margen para mejoras adicionales mediante técnicas avanzadas de optimización espectral, convirtiéndolo en una solución técnica viable y recomendable para escenarios de alta densidad de tráfico.

5.2. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda realizar una identificación y análisis profundo de métricas avanzadas adicionales como la eficiencia energética, evaluando cómo el DSS influye en el consumo energético total de la red, considerando especialmente dispositivos IoT de baja potencia. Adicionalmente, incluir métricas sofisticadas como la tasa de error de paquetes (Packet Error Rate - PER) y eficiencia espectral mediante técnicas avanzadas de modulación adaptativa (AMC), codificación robusta, y gestión dinámica del espectro, para obtener una evaluación más exhaustiva y precisa del rendimiento en condiciones críticas.
- ✓ Realizar simulaciones avanzadas que involucren despliegues híbridos complejos, combinando macro-celdas con celdas pequeñas (small cells), equipadas con tecnología Massive MIMO y técnicas sofisticadas de beamforming adaptativo, para analizar cómo estos elementos tecnológicos optimizan la gestión dinámica del espectro, aumentan la capacidad del sistema, mejoran la cobertura y reducen sustancialmente la interferencia en entornos densos y altamente congestionados.
- ✓ Implementar algoritmos complejos de optimización basados en aprendizaje profundo por refuerzo (Deep Reinforcement Learning), integrados con tecnologías complementarias como Edge Computing para optimizar la latencia, gestión de recursos y distribución del tráfico en tiempo real. Evaluar estos algoritmos comparativamente frente a métodos convencionales en diferentes escenarios simulados, prestando especial atención al throughput, eficiencia espectral, pérdida de paquetes y latencia, demostrando así una mejora integral y significativa en el rendimiento global del DSS.

CAPÍTULO VI
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] X. Wang, Y. Teraki, M. Umehira, H. Zhou, and Y. Ji, "A Usage Aware Dynamic Spectrum Access Scheme for Interweave Cognitive Radio Network by Exploiting Deep Reinforcement Learning," *Sensors*, vol. 22, no. 18, p. 6949, Sep. 2022, doi: 10.3390/s22186949.
- [2] S. K. Sharma, T. E. Bogale, L. B. Le, S. Chatzinotas, X. Wang, and B. Ottersten, "Dynamic Spectrum Sharing in 5G Wireless Networks With Full-Duplex Technology: Recent Advances and Research Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 674–707, Sep. 2018, doi: 10.1109/COMST.2017.2773628.
- [3] Nidhi, A. Mihovska, and R. Prasad, "Spectrum Sharing and Dynamic Spectrum Management Techniques in 5G and Beyond Networks: A Survey," *Journal of Mobile Multimedia*, Feb. 2021, doi: 10.13052/jmm1550-4646.17133.
- [4] R. Dangi, P. Lalwani, G. Choudhary, I. You, and G. Pau, "Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review," *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 26, Dec. 2021, doi: 10.3390/s22010026.
- [5] I. Jabandžić *et al.*, "The CODYSUN Approach: A Novel Distributed Paradigm for Dynamic Spectrum Sharing in Satellite Communications," *Sensors*, vol. 21, no. 23, p. 8052, Dec. 2021, doi: 10.3390/s21238052.
- [6] W. S. H. M. W. Ahmad *et al.*, "5G Technology: Towards Dynamic Spectrum Sharing Using Cognitive Radio Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 14460–14488, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966271.
- [7] C. Calenga Pataca, "Tecnologías 6g: requisitos, desafíos y aplicaciones," *Revista Telemática*, vol. 21, no. 3, pp. 56–69, 2022, [Online]. Available: <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>
- [8] X. Liu, M. Jia, X. Zhang, and W. Lu, "A Novel Multichannel Internet of Things Based on Dynamic Spectrum Sharing in 5G Communication," *IEEE Internet Things J*, vol. 6, no. 4, pp. 5962–5970, Aug. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2847731.
- [9] J. Jeon, R. D. Ford, V. V. Ratnam, J. Cho, and J. Zhang, "Coordinated Dynamic Spectrum Sharing for 5G and Beyond Cellular Networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 111592–111604, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2934385.

- [10] G. Barb, F. Alexa, and M. Otesteanu, "Dynamic Spectrum Sharing for Future LTE-NR Networks," *Sensors*, vol. 21, no. 12, p. 4215, Jun. 2021, doi: 10.3390/s21124215.
- [11] S. Kim, "4G/5G coexistent dynamic spectrum sharing scheme based on dual bargaining game approach," *Comput Commun*, vol. 181, pp. 215–223, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.comcom.2021.10.025.
- [12] R. K. Saha and J. M. Cioffi, "Dynamic Spectrum Sharing for 5G NR and 4G LTE Coexistence - A Comprehensive Review," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 795–835, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3351528.
- [13] Narvaez Ortiz Edwin Esteban, "Estudio de la calidad del servicio de redes móviles en el sector de la Troncal," Trabajo de titulación, Universidad de Guayaquil, Guayaquil-Ecuador, 2018.
- [14] J. Hernando Rabanos, L. Mendo, and J. Riera Salis, *Comunicaciones móviles*, 3rd ed. Editorial Univesitaria Ramon Areces, 2015.
- [15] J. I. Wilfrido Anchundia-Morales, J. I. Carlos Anchundia-Morales, and B. Fernando Chere-Quíñonez III, "La tecnología 5G en el Ecuador. Un análisis desde los requerimientos 5G Technology in Ecuador. An analysis from the requirements Technologic 5G Tecnologia 5G no Equador. Uma análise dos requisitos 5G," *Ciencias de Tecnicas y Aplicadas*, vol. 5, pp. 805–822, 2020, doi: 10.23857/pc.v5i2.1313.
- [16] R. García Revilla, O. Martínez Moure, and C. Sarah Einsle, "La conectividad y la digitalización como estrategias para la puesta en valor de recursos abandonados con posibilidad de uso turístico. Un análisis de caso de la provincia de Pontevedra," *Revista de Marketing y Publicidad*, pp. 7–40, Nov. 2023, doi: 10.51302/marketing.2023.18851.
- [17] J. R. Brito Gomez, "Evolución de las redes móviles hasta hoy en día y el impacto de la red móvil de quinta generación," *Revista ReDTiS*, vol. 3, no. 1, 2019.
- [18] B. Quizhpe Vasquez, "Análisis de la seguridad en redes 5g y propuesta de mejoras," Maestría en Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Loja, Loja-Ecuador, 2023.

- [19] A. I. Sebastián Calvache-Castillo and J. I. Alexander Bravo-León, “Tecnología 5G y su monetización empresarial 5G technology and its business monetization Tecnologia 5G e sua monetização de negócios Ciencias técnicas y aplicadas Artículo de investigación,” *Ciencias Tecnicas y Aplicadas*, vol. 5, no. 1, pp. 482–502, 2020, doi: 10.23857/pc.v5i1.1951.
- [20] E. Delgado Torres, “Del Pie de Rey a la tecnología 5G: consideraciones sobre el concepto de escala, arquitectura y ciudad desde las transformaciones del cuerpo ampliado From Pie de Rey to 5G technology: considerations about the notions of scale, architecture and cities from transformations of the enlarged body,” *Revista de Facultad de Arquitectura*, vol. 15, no. 23, 2021.
- [21] B. F. Chere-Quiñónez, R. C. Ulloa-De Souza, and L. J. Reyna-Tenorio, “Optimization of the use of the radio spectrum in Ecuador,” *Sapienza*, vol. 3, no. 3, pp. 238–249, 2022, doi: 10.51798/sijis.v3i3.524.
- [22] P. Lin, Z. Zhang, and X. Li, “2.1GHz Dynamic Spectrum Sharing Scheme for 4G/5G Mobile Network,” in *2023 International Wireless Communications and Mobile Computing, IWCMC 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 681–686. doi: 10.1109/IWCMC58020.2023.10182743.
- [23] L. Rolando, R. Iviricu, J. M. Díaz Hernández, and R. P. Portales, “La radio cognitiva: desafíos futuros en el uso del espectro radioeléctrico Cognitive radio its challenge on the use of radio spectrum,” *Avances*, vol. 22, no. 1, pp. 139–167, 2020, [Online]. Available: <http://orcid.org/0000-0002-9996-5093><http://orcid.org/0000-0003-4395-3285><http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/514/1599>
- [24] Espectro 5G, “Espectro 5G Posición de política pública de la GSMA,” 2019.
- [25] M. Cabana, “Medida y caracterizacion de los niveles de EMF en estaciones 5G,” Proyecto fin de grado, Escuela Tecnica Superior de Ingenieria y Sistemas de Telecomunicacion, Ecuador, 2021.
- [26] V. Tikhvinskiy, E. Deviatkin, A. Aitmagambetov, and A. Kulakaeva, “Provision of IoT Services for CO-Located 4G/5G Networks Utilisation with Dynamic

- Frequency Sharing,” pp. 1–4, Apr. 2021, doi: 10.1109/emctech49634.2020.9261551.
- [27] G. Barb, M. Otesteanu, and M. Roman, “Dynamic Spectrum Sharing for LTE-NR Downlink MIMO Systems,” *2020 14th International Symposium on Electronics and Telecommunications, ISETC 2020 - Conference Proceedings*, Nov. 2020, doi: 10.1109/ISETC50328.2020.9301037.
- [28] G. K. Papageorgiou *et al.*, “Advanced Dynamic Spectrum 5G Mobile Networks Employing Licensed Shared Access,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 7, 2020, doi: 10.1109/MCOM.001.1900742.
- [29] P. Lin, Z. Zhang, and X. Li, “2.1GHz Dynamic Spectrum Sharing Scheme for 4G/5G Mobile Network,” *2023 International Wireless Communications and Mobile Computing, IWCMC 2023*, pp. 681–686, 2023, doi: 10.1109/IWCMC58020.2023.10182743.
- [30] R. Saha and J. Cioffi, “Uso compartido dinámico del espectro para 5G NR y 4G LTE Coexistencia: una revisión exhaustiva Rony K. Saha^{1,2} JOHN M. CIOFFI²(Miembro vitalicio del IEEE),” 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2023.3351528.
- [31] Y. Zhou, X. H. Xu, N. Lu, and W. L. Xie, “Research on Technical Scheme and Overhead Calculation of Dynamic Spectrum Sharing,” in *2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communications, ICC3 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020, pp. 473–480. doi: 10.1109/ICC351575.2020.9345099.
- [32] J. Ochoa, “Hacia B5G y 6G: Vislumbrar el Horizonte de las Próximas Tecnologías,” Proyecto de Grado 6G-Proyecto de Grado , Universidad de los Andes , Colombia, 2023.
- [33] M. Baron Herra, “Evaluación de las prestaciones de un entorno 5G para la Internet táctil (Performance evaluation of a 5G framework for Tactile Internet),” Barron Herr, Miguel, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros, Cantabria, 2022.
- [34] A. Narayanan *et al.*, “A variegated look at 5G in the wild: Performance, power, and QoE implications,” *SIGCOMM 2021 - Proceedings of the ACM SIGCOMM 2021 Conference*, pp. 610–625, Aug. 2021, doi: 10.1145/3452296.3472923.

- [35] E. Mantilla Lopez, “Análisis de la tecnología 5G y su factibilidad en la ciudad de Quito,” Trabajo de Titulación, Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, Guayaquil-Quito, 2022.
- [36] P. Lin, J. Yu, and Y. Zhou, “Research on Spectrum Sharing Technology,” in *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, BMSB*, IEEE Computer Society, 2023. doi: 10.1109/BMSB58369.2023.10211171.
- [37] R. Galindo Mier, “Progresos en la clasificación automática de modulación para radios cognitivos,” *Revista Telemática*, vol. 18, no. 2, pp. 96–115, 2019, [Online]. Available: <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>
- [38] S. K. Sharma, T. E. Bogale, L. B. Le, S. Chatzinotas, X. Wang, and B. Ottersten, “Dynamic Spectrum Sharing in 5G Wireless Networks with Full-Duplex Technology: Recent Advances and Research Challenges,” in *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Jan. 2018, pp. 674–707. doi: 10.1109/COMST.2017.2773628.
- [39] M. Parvini *et al.*, “A Comprehensive Survey of Spectrum Sharing Schemes from a Standardization and Implementation Perspective,” Mar. 2022, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2203.11125>
- [40] M. E. Alonso, “Gestión de Recursos Radio en Sistemas Móviles Avanzados de Banda Ancha con Soluciones de Extensión de Cobertura y Capacidad Basados en Despliegues de Red Heterogénea / Miguel Eguizabal Alonso,” Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2021. [Online]. Available: <http://zaguan.unizar.es>
- [41] C. A. Anzaldo Navarrete, “Coordinación de potencia consciente de la Interferencia para redes 5G Ultra-Densas (UDN),” Tesis de Maestría, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, Mexicali, 2019.
- [42] H. Amjad, T. Sufyan, and A.-J. Faraj, “Edge Computing: Review and Future Directions,” *Revista AU5*, vol. 25, no. 2, 2019.
- [43] J. C. Chavez Hermoso, “Implementación de sistema de monitoreo del espectro mediante radio definido por software,” Tesis de Maestría, Unidad Zacatenco, Ciudad de Mexico, 2022.

- [44] J. C. Ospina-Cuervo and H. F. Vargas Montoya, "Sistemas interfaces cerebro-computador (BCI): amenazas y ataques cibernéticos," *Ingeniare*, no. 33, pp. 41–52, Aug. 2022, doi: 10.18041/1909-2458/ingeniare.33.9733.
- [45] J. Mora, V. Miama, and O. Erazo, "Asignación de espectro basado en inteligencia de enjambre empleando un algoritmo metaheurístico híbrido bioinspirado," *Mundo Fesc*, vol. 10, no. 19, pp. 20–39, 2020.
- [46] C. Casero Esteve, "Diseño radio orientado a la implementación de LNR700 y análisis de las degradaciones más comunes.," Escuela Politecnica Superior de Gandia, VALÈNCIA , 2023.
- [47] J. Luis and C. Ruíz, "Análisis y evaluación de las alternativas para gestionar de manera eficiente el espectro utilizado en el marco de las redes de 5G en México," 2022.
- [48] A. Camilo, O. Hurtado, and J. Sierra Bohórquez, "Ventajas y Desventajas de la conectividad 5G y protocolos existentes en IoT," 2020.
- [49] M. Wei, X. Li, W. Xie, and C. Hu, "Practical Performance Analysis of Interference in DSS System," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/app13031233.
- [50] J. Pierre, "Coexistencia NR LTE: uso compartido dinamico del espectro (DSS)," Noticias de tecnologia.
- [51] A. Franco, "Análisis y aplicación de procesos para la disminución de llamadas caídas en el sistema de telefonía celular para la red urbana de la ciudad de Guayaquil," Escuela Politecnica Nacional, Guayaquil, 2021.
- [52] M. E. Casado García and F. Camazón Rodríguez, "Redes VSAT (Terminal de Apertura Muy Pequeña)," *Sistemas de Telecomunicacion*, pp. 1–12, 2020.
- [53] O. De León, "Redes 5G en América Latina Desarrollo y potencialidades," *Documentos de Proyectos*, vol. 1, 2023, [Online]. Available: www.issuu.com/publicacionescepal/stacks
- [54] I. Guillermina, T. Ferrer, E. De La Cruz Gámez, M. J. Carranza Gómez, M. C. Francisco, and J. G. Mata, "Un modelo educativo virtual para simular entornos de red móvil," *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Académica Journals Celaya*, vol. 9, no. 6, 2017.

- [55] C. Manuel, “Medida y caracterización de los niveles de EMF en estaciones 5G,” Proyecto Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, 2021.
- [56] P. Lin, Z. Zhang, and X. Li, “2.1GHz Dynamic Spectrum Sharing Scheme for 4G/5G Mobile Network,” in *2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, IEEE, Jun. 2023, pp. 681–686. doi: 10.1109/IWCMC58020.2023.10182743.
- [57] T. Hayashida, R. Okumura, K. Mizutani, and H. Harada, “Possibility of Dynamic Spectrum Sharing System by VHF-band Radio Sensor and Machine Learning,” in *2019 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, IEEE, Nov. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/DySPAN.2019.8935871.
- [58] R. K. Saha and J. M. Cioffi, “Dynamic Spectrum Sharing for 5G NR and 4G LTE Coexistence - A Comprehensive Review,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 795–835, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3351528.
- [59] C. Lakouismi, H. Ouamna, Z. Madini, and Y. Zouine, “Review of Dynamic Spectrum Sharing: Techniques and Challenges,” in *2024 10th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*, IEEE, Oct. 2024, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICOA62581.2024.10754225.
- [60] Y. Zhou, X. Xu, C. Hu, J. Hou, and W. Xie, “Performance Analysis and Experimental Verification of 20MHz Dynamic Spectrum Sharing Network,” in *2021 2nd Information Communication Technologies Conference (ICTC)*, IEEE, May 2021, pp. 102–106. doi: 10.1109/ICTC51749.2021.9441557.
- [61] G. Barb, F. Alexa, and M. Otesteanu, “Dynamic spectrum sharing for future lte-nr networks,” *Sensors*, vol. 21, no. 12, Jun. 2021, doi: 10.3390/s21124215.
- [62] Rohde, “Dynamic Spectrum Sharing (DSS) for 5G & LTE: Signal Generation and Analysis,” Columbia, 2020. [Online]. Available: <http://www.rohde-schwarz.com/appnote/GFM337>
- [63] J. G. Torres, R. Bustamante, and C. E. Caicedo, “Literature review of deploying small transmitters on a spectrum sharing scheme,” *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 103, pp. 116–129, 2022, doi: 10.17533/udea.redin.20210426.

- [64] Samsung, “Dynamic Spectrum Sharing,” Jun. 2021.
- [65] N. Haider, “Dynamic Spectrum Sharing and Coexistence with Full-Duplex Device-To-Device Communications in 5G Networks,” University Of Technology Sydney, Sydney, 2019.
- [66] Asamblea Nacional, *Ley Organica de Telecomunicaciones*. Quito, 2015, pp. 1–40.
- [67] Y.-F. Li and C. Jia, “An overview of the reliability metrics for power grids and telecommunication networks,” *Frontiers of Engineering Management*, vol. 8, no. 4, pp. 531–544, Dec. 2021, doi: 10.1007/s42524-021-0167-z.

CAPÍTULO VII
ANEXOS

Anexo 1. Código de configuración de parámetros

```
21
28 ##### Numero de Bloques de recursos #####
29 **numBands = 25
30
31 ##### Poder de transmision #####
32 **ueTxPower = 26
33 **eNodeBTxPower = 40
34 **targetBler = 0.01
35 **blerShift = 5
36
37 ##### SCTP configuration #####
38 **sctp.nagleEnabled = false      # if true, transmission of small packets will be delayed
39 **sctp.enableHeartbeats = false
40
41 ##### IPv4 configurator config #####
42 *.configurator.config = xmldoc("./demo.xml")
43
```

Autor: Kiara Intriago Posligua

Anexo 2. Código de un tiempo limite

```
51 [Config Base]
52 network = prueba.simulations.Red.Escenario
53 sim-time-limit=20s
54 description = "Configuración base, no ejecute esto!"
55
56 ##### posicion de las radio bases #####
57 *.Enb.mobility.initialX = 300m
58 *.Enb.mobility.initialY = 300m
59 *.EnbGnb.mobility.initialX = 600m
60 *.EnbGnb.mobility.initialY = 300m
61
62 # Configuracion de interferencias
63 **.downlink_interference = true
64 **.uplink_interference = true
65
66 # El gNodeB NR viene con la capa NR PDCP de forma predeterminada
67 *.Enb.nicType = "LteNicEnbD2D"
68 *.Enb.cellularNic.LtePdcprRrcType = "NRPdcprRrcEnb"
69 *.EnbGnb.masterId = 1
```

Autor: Kiara Intriago Posligua

Anexo 3. Código de agregación de portadoras

```
82 ##### Agregacion de portadoras #####
83 *.carrierAggregation.numComponentCarriers = 2
84 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].carrierFrequency = 2.1GHz
85 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].numBands = 25
86 *.carrierAggregation.componentCarrier[0].numerologyIndex = 0
87 *.carrierAggregation.componentCarrier[1].carrierFrequency = 2.1GHz
88 *.carrierAggregation.componentCarrier[1].numBands = 25
89 *.carrierAggregation.componentCarrier[1].numerologyIndex = 0
90
91 *.Gnb.cellularNic.numCarriers = 1
92 *.Gnb.cellularNic.channelModel[0].componentCarrierIndex = 0
93 *.EnbGnb.cellularNic.numCarriers = 1
94 *.EnbGnb.cellularNic.channelModel[1].componentCarrierIndex = 1
95
96 *.ue[*].cellularNic.numCarriers = 1
97 *.ue[*].cellularNic.numNRCarriers = 1
98 *.ue[*].cellularNic.channelModel[0].componentCarrierIndex = 0
99 *.ue[*].cellularNic.nrChannelModel[0].componentCarrierIndex = 1
100
101
102 ##### configuracion X2 #####
103 *.nb.numX2Apps = 1 # one x2App per peering node
104 *.nb.x2App[*].server.localPort = 5000 + ancestorIndex(1) # Server ports (x2App[0]=5000, x2App[1]=5001)
105 *.Enb.x2App[0].client.connectAddress = "EnbGnb%x2ppp0"
```

Autor: Kiara Intriago Posligua

Anexo 4. Código para los escenarios 100, 150 y 200

```
108 ##### numero de usuarios #####
109 *.numUe = ${usuarios=100,150,200}
110
111 # Id para tipos de usuarios
112 *.ue[*].macCellId = 1
113 *.ue[*].masterId = 1
114 *.ue[*].nrMacCellId = 2
115 *.ue[*].nrMasterId = 2
116
117 **.dynamicSpectrumSharing = true
118 **.dynamicCellAssociation = true
119 **.enableHandover = true
120 **.schedulingDisciplineDl = "PF"
121
122 # posicion de los usuarios
123 *.ue[*].mobility.typename = "RandomWaypointMobility"
124 *.ue[*].mobility.initialX = uniform(200m,800m)
125 *.ue[*].mobility.initialY = uniform(150m,500m)
126 *.ue[*].mobility.speed = 13.89mps
127 #-----#
128
```

Autor: Kiara Intriago Posligua

Anexo 5. Código de la configuración de DSS

```
172 description = "Configuracion de DSS para enlace de descarga!"
173
174 # one UDP application for each user
175 *.ue[*].numApps = 1
176
177 # the amount of UDP applications on server should be equal to (numUEs)*(ue[*].numApps)
178 *.server.numApps = ${usuarios}
179
180 #===== Application Setup =====
181 *.ue[*].app[*].typename = "CbrReceiver"
182 *.ue[*].app[*].localPort = 3000
183
184 *.server.app[*].typename = "CbrSender"
185 *.server.app[*].destAddress = "ue[" + string(ancestorIndex(0)) + "]" # obtain the address of the
186 *.server.app[*].localPort = 3088+ancestorIndex(0)
187 *.server.app[*].destPort = 3000
188 *.server.app[*].PacketSize = 2000
189 *.server.app[*].sampling_time = 0.05s
190 *.server.app[*].startTime = uniform(0.02s, 0.05s)
191 *.server.app[*].finishTime = 39.9s
192 *.server.app[*].tos = 10
193 #-----#
```

Autor: Kiara Intriago Posligua