



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería de Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Propuesta del uso de una red heterogénea 5G en la
banda 29.1 ghz para optimizar la señal
electromagnética de una red de acceso en el puerto del
Callao**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR

Kevin Rogers TARRILLO SÁNCHEZ

ASESOR

Mg. Luis Ernesto CRUZADO MONTAÑEZ

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Tarrillo, K. (2024). *Propuesta del uso de una red heterogénea 5G en la banda 29.1 ghz para optimizar la señal electromagnética de una red de acceso en el puerto del Callao*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM..

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Kevin Rogers Tarrillo Sánchez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	73759360
URL de ORCID	No Aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Luis Ernesto Cruzado Montañez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	32920395
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-1056-8973
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Oscar Armando Casimiro Pariasca
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06592392
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Manuel Francisco Bermeo Noriega
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08437735
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Jorge Elías Moscoso Sánchez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07206008
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.3.5. Comunicaciones inalámbricas
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Callao Provincia: Callao Distrito: Callao Latitud: -12.0433425903 Longitud: -77.1373214722
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2021-2023
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01 Ingeniería de sistemas y comunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.04 Telecomunicaciones https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 - Lima 1 - Perú



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

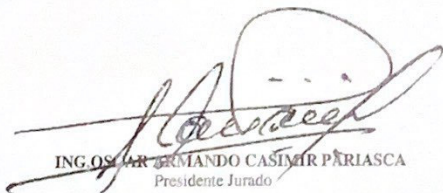
ACTA N°053/FIEE-CTGT/2024

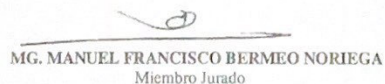
Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 05 de junio del 2024, como presidente de Jurado el **ING. OSCAR ARMANDO CASIMIRO PARIASCA**, integrado por el Miembro de Jurado el **MG. MANUEL FRANCISCO BERMEO NORIEGA**, el Miembro de Jurado **MG. JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ** y Miembro Asesor **MG. LUIS ERNESTO CRUZADO MONTAÑEZ**.

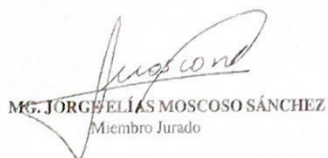
Después de escuchar la Sustentación Presencial de Tesis del Bachiller **KEVIN ROGERS TARRILLO SÁNCHEZ** con código N° 11190114 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico sustentó el Trabajo de Tesis titulado **PROPUESTA DEL USO DE UNA RED HETEROGÉNEA 5G EN LA BANDA 29.1 GHZ PARA OPTIMIZAR LA SEÑAL ELECTROMAGNÉTICA DE UNA RED DE ACCESO EN EL PUERTO DEL CALLAO**.

El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de **...B...E...N... (16)**

Ciudad Universitaria, 05 de junio del 2024


ING. OSCAR ARMANDO CASIMIRO PARIASCA
Presidente Jurado


MG. MANUEL FRANCISCO BERMEO NORIEGA
Miembro Jurado


MG. JORGE ELÍAS MOSCOSO SÁNCHEZ
Miembro Jurado


MG. LUIS ERNESTO CRUZADO MONTAÑEZ
Miembro Asesor



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú, Decana de América

Vicerrectorado de Investigación y Posgrado



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo **Luis Ernesto Cruzado Montañez** mi condición de asesor acreditado con el Acta de Sustentación de Trabajo de Suficiencia Profesional **PROPUESTA DEL USO DE UNA RED HETEROGÉNEA 5G EN LA BANDA 29.1 GHZ PARA OPTIMIZAR LA SEÑAL ELECTROMAGNÉTICA DE UNA RED DE ACCESO EN EL PUERTO DEL CALLAO** presentado por el bachiller **KEVIN ROGERS TARRILLO SÁNCHEZ**, para optar al título profesional de Ingeniero Electrónico. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de 14% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**. Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del grado correspondiente.

Firma del Asesor

DNI: 32920395.

Nombres y apellidos del asesor:

MG. Luis Ernesto Cruzado Montañez



DEDICATORIA

A mis hermanas Jhennifer y Camila, cuyas sonrisas han sido mi luz.

A mis padres Róger y Pilar, mi apoyo inquebrantable. A los abuelos en el cielo Rogerio y Amalia, cuya sabiduría es mi brújula eterna. Gracias por ser mi fuente inagotable de amor y aliento. Con profunda gratitud, Kevin.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la universidad por la enseñanza, así como a la empresa TES América y al grupo ATDI quienes me apoyaron brindando el software HTZ Communications para el desarrollo de la presente tesis.

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo “Propuesta del uso de una Red Heterogénea 5G para optimizar la señal electromagnética de una red de acceso en el puerto del callao”. La investigación se llevará a cabo mediante la realización de una simulación detallada en el software HTZ Communications. La simulación comprenderá la implementación de una red heterogénea 5G, considerando diversos elementos, desde estaciones base hasta dispositivos finales. Este enfoque integral tiene como objetivo no solo abordar los desafíos actuales de la red de acceso, sino también sentar las bases para una conectividad avanzada y resistente en la era 5G, contribuyendo así a la optimización de la infraestructura de comunicaciones en el puerto mencionado. La metodología de investigación fue cuantitativo, experimental, teniendo como enfoque de investigación aplicada. Se usó un software AHTZ Communications, que sirvió para la simulación de trabajo. Entre los resultados, se obtuvo que: Optimizar la cobertura (%), reducir las señales de interferencia (%), ampliar la capacidad de la señal (%). Los resultados obtenidos de la simulación se analizarán minuciosamente para proporcionar una evaluación objetiva del rendimiento de la red con las implementaciones propuestas. Se derivarán conclusiones significativas y se ofrecerán recomendaciones prácticas para la implementación efectiva de las mejoras propuestas.

Palabras clave: propuesta, simulación, red heterogénea 5G, señal electromagnética, optimización.

ABSTRACT

The research aimed at "Proposal for the use of a Heterogeneous 5G Network to optimize the electromagnetic signal of an access network in the port of Callao." The research will be carried out through a detailed simulation in the HTZ Communications software. The simulation will involve the implementation of a heterogeneous 5G network, considering various elements, from base stations to end devices. This comprehensive approach aims not only to address current challenges in the access network but also to lay the groundwork for advanced and resilient connectivity in the 5G era, thus contributing to the optimization of communication infrastructure in the mentioned port. The research methodology was quantitative, experimental, with an applied research focus. AHTZ Communication software was used for the simulation. Among the results, it was obtained that: Optimizing coverage (%), reducing interference signals (%), expanding signal capacity (%). The simulation results will be thoroughly analyzed to provide an objective assessment of the network's performance with the proposed implementations. Significant conclusions will be drawn, and practical recommendations will be offered for the effective implementation of the proposed improvements.

Keywords: proposal, simulation, heterogeneous 5G network, electromagnetic signal, optimization.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ABSTRACT v	
TABLA DE CONTENIDOS.....	vi
LISTA DE TABLAS	ix
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivos de la investigación.....	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos específicos:	3
1.3 Importancia y justificación del proyecto.....	3
1.4 Limitaciones de la investigación	5
CAPÍTULO II: REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	7
2.1 Marco teórico.....	7
2.1.1 Industria 4.0	7
2.1.2 Servicio EMBB	7
2.1.3 Puerto de quinta generación (5G), Puerto 4.0 y Smart Port.....	10
2.1.4 Puerto 5g	10
2.1.5 Puerto Smart.....	10
2.1.6 Espectro radioeléctrico.....	11
2.1.7 Onda milimétrica	11
2.1.8 Atenuación, absorción, refracción, interferencia y reflexión	12
2.1.9 Espectro radioeléctrico para 5g en el Perú	13
2.1.10 Resolución Ministerial N° 523-2019-MTC/01.03.30	13
2.1.11 Resolución Ministerial N° 796-2020-MTC/01.03.31	14
2.1.12 Estado del espectro radioeléctrico en la banda 29.1. GHZ	14
2.1.13 Límites permisibles radiaciones no ionizantes	15
2.1.14 Estructura de una red de transmisión 5G	18

2.1.15	Técnica MIMO	22
2.1.16	Sistemas de antenas activas	23
2.1.17	Antenas integradas.....	24
2.1.18	TDD (Time División Dúplex)	24
2.1.19	FDD (Frequency División Dúplex)	25
2.1.20	Modelos de pérdidas	25
2.1.21	Modelo de perdidas. Método ITU-R- 2001-4 -Modelo de propagación terrenal de gran alcance polivalente en la gama de frecuencias de 30 MHz a 50 GHz.....	26
2.1.22	RSRP	27
2.1.23	SNIR.....	28
2.1.24	Análisis de la potencia de la señal recibida de referencia (Cobertura).....	28
2.1.25	Detalles de la trama – estructura 5G	29
2.1.26	Numerología – subcarrier de la trama	30
2.1.27	Numerología y longitud de las ranuras	31
2.1.28	Cuadrícula de recursos	31
2.1.29	Eficiencia espectral máxima	32
2.1.30	Banda n257	33
2.1.31	Beamforming	34
2.1.32	Lóbulo principal de la antena y ancho del haz de potencia medio. 34	
2.1.33	Diagrama de radiación	35
2.1.34	La capacidad de tráfico del área 5G.....	37
2.1.35	Distancia entre sitios 5G- criterio de protección de interferencia 37	
2.1.36	Software HTZ Communications.....	37
2.2	Antecedentes del estudio.....	39
2.3	Base teórica.....	40
2.3.1	Evolución de la tecnología 5G	40
2.3.2	Capacidades claves de 5G y requisitos de rendimiento técnico .40	
2.3.3	Escenarios de despliegue de la tecnología 5G	42
2.3.4	Arquitectura 5G	42
2.3.5	Redes heterogéneas en 5G (Hetnets)	43
2.3.6	Red de acceso para la 5G	44
2.3.7	Modelado de canal.....	45

2.4	Definición de términos.....	47
CAPÍTULO III. HIPÓTESIS		48
3.1	HipoT	48
3.2	Variables	48
3.2.1	Ubicación de las estaciones base	48
3.3	Operacionalización de las variables	49
CAPITULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS		50
4.1	Área de estudio	55
4.1.2	Elección de la Ubicación del transmisor de la macrocélula.....	55
4.1.3	Elección de la Ubicación del Transmisor de la microcélula:.....	55
4.2	Diseño de la muestra	57
4.3	Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información	57
4.4	Análisis estadístico	58
CAPÍTULO V RESULTADOS		61
5.1	Presentación y análisis de resultados	61
5.1.1	Escenario para transmisor (macrocélula) 15 Watts – antena omnidireccional	67
5.1.2	Escenario 20 watts transmisor – macrocélula-antena omnidireccional	68
5.1.4	Escenario 25 watts transmisor – macrocélula-antena.....	69
5.1.5	Escenario para 15 watts – antena omnidireccional con ganancia 12 dbi 71	
5.2	Análisis de radiaciones no ionizantes	71
CAPITULO VI. DISCUSIÓN.....		74
6.1	Análisis de eficiencia espectral	81
6.2	Análisis económico	82
CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES.....		85
CAPÍTULO VIII RECOMENDACIONES		87
BIBLIOGRAFÍA.....		88
ANEXOS 91		

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Requisitos técnicos de la Banda Ancha Mejorada (Enhanced Mobile Broadband)	8
Tabla 2 Niveles De Referencia Para Exposición Ocupacional A Campos Eléctricos Y Magnéticos (Valores Rms No Perturbados).....	15
Tabla 3 Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (valores rms no perturbados)	16
Tabla 4 Estaciones Base TDD MIMO Típicas	25
Tabla 5 Calidad de Señal según KPIS	29
Tabla 6 Ubicación del Transmisor- Macro célula.....	49
Tabla 7 Valores de RSRP Y SNIR en el Escenario Beamforming y No Beamforming.....	58
Tabla 8 Prueba F Para La Muestra De Dos Varianzas.....	59
Tabla 9 Parámetros de simulación del gnb (Tx1) – Macro célula	61
Tabla 10 Kpi Encontrados Escenario 1 – Macro célula Transmisor 15 Watts	67
Tabla 11 Kpi Encontrados Escenario 1 - Transmisor 20 Watts	69
Tabla 12 Kpi Encontrados Escenario 1 - Transmisor 25 Watts	70
Tabla 13 KPI Encontrados Escenario 1 -Ganancia 12 dbi- Antena Omnidireccional transmisor 15 WATTS.	71
Tabla 14 Parámetros de Simulación de la (Tx1) – Micro célula.....	74
Tabla 15 Análisis del Criterio de Protección	76
Tabla 16 Costo de Implementación de Radio Bases 5G en función de la Tasa de Bits y Tamaño de Celda.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Frecuencias de las bandas. Fuente:(Gallego Menéndez, 2018)...	12
Figura 2: Patrón de Radiación Antena beamforming. Fuente: (Stuhlfauth, 2020).	17
Figura 3: Densidad de flujo eléctricoFuente: (Stuhlfauth, 2020).	18
Figura 4: Estructura De Una Red De Transmisión – 5g.Fuente: (Vicente, 2021)	21
Figura 5: Topología de una red heterogénea.Fuente: (López-Aguilera & Garcia-Villegas, 2022).	22
Figura 6: Diagrama 3d de la Antena Mimo 8x8 b. Vista Lateral del Diagrama de la Antena Mimo 8x8.Fuente:(Advanced Antenna Systems for 5G - 5G Americas, n.d.).....	23
Figura 7: Combinación de submodelos- Método ITU -2001-4.....	27
Figura 8: Estructura de trama de radio.Fuente: (5G ShareTechnote. (n.d.))	31
Figura 9: Cuadrícula de Recursos.Fuente: (5G ShareTechnote. (n.d.))....	32
Figura 10: Diagrama de radiación para una antena beamforming,. Fuente:(Item 1007/3969 Repositorio CICESE, 2023.)	36
Figura 11: Anchos de Haz en el Diagrama de Radiación Para un Arreglo Lineal de 6 elementos.Fuente:(Item 1007/3969 Repositorio CICESE, 2023.)	36
Figura 12: Tipos de capas de mapa.Fuente: HTZ Communications	38
Figura 13: Mejora la capacidad clave 5G – Capacidad clave 5G.Fuente:(Lei et al., 2019)	41
Figura 14: Diagrama de bloques -Arquitectura 5G.Fuente: (Robitzsch, S., Centenaro, M., di Pietro, N., Cordeiro, L., Gomes, A. S., Sanders, P., & Ishaq, A., 2023).	43
Figura 15: Topología de una red heterogénea.Fuente: (Ai et al., 2021).....	44
Figura 16: Flujo de metodología de la investigación en el software HTZ Communications	50
Figura 17: Mapa de cobertura 5G – Movistar móvil.Fuente: (Cobertura 3G / 4G / 5G - Perú - nPerf.com, s. f.)	52

Figura 18: Mapa de cobertura 5G – Entel móvil.Fuente: (Cobertura 3G / 4G / 5G - Perú - nPerf.com, s. f.).....	52
Figura 19: Mapa de cobertura 5G–Bitel móvil. Fuente: (Cobertura 3G / 4G / 5G - Perú - nPerf.com, s. f.).....	53
Figura 20: Área para implementar 5g – Puerto del Callao.Fuente: Google earth	54
Figura 21: Mapa + capa DEM.Fuente: Google earth	54
Figura 22: Topología de un diseño propuesto.Fuente: elaboración propia-Google earth	57
Figura 23: Parámetros de cobertura.Fuente: HTZ Communications.....	63
Figura 24: Parámetros de configuración del transmisor.Fuente: HTZ Communications	64
Figura 25: Parámetros del receptor 5G.Fuente: HTZ Communications	65
Figura 26: Parámetros de numerología – gnb..Fuente: HTZ Communications	66
Figura 27: Mapa de cobertura 5G – KPI's encontrados para antena omnidireccional 15 watts. Fuente: HTZ Communications	67
Figura 28: Mapa de cobertura 5G – KPI's encontrados para antena omnidireccional 20 watts. Fuente: HTZ Communications.	68
Figura 29: Mapa de cobertura 5G – KPI's encontrados para antena omnidireccional 25 watts.Fuente: Fuente: HTZ Communications.....	70
Figura 30:. Mapa de cobertura 5G – KPI's encontrados para antena omnidireccional 15 watts.Fuente: HTZ Communications.	71
Figura 31: Análisis de C/I.Fuente: HTZ Communications.	76
Figura 32: Cálculo de atenuación Shannon-Bound.Fuente: HTZ Communications.	77
Figura 33. Parámetros de transmisor – capas.Fuente: HTZ Communications.	78
Figura 34. Análisis de throughput.Fuente: HTZ Communications.	80
Figura 35: Cálculo de la eficiencia espectral.Fuente: www.5gtools.com	81
Figura 36: Análisis de Interferencia. Fuente:Software HTZ Communcations	91
Figura 37: Reporte de cobertura de interferencia. Fuente:Software HTZ Communcations	92
Figura 38: Interfaz de trabajo. Fuente:Software HTZ Communcations	93
Figura 39:. Elección del modelo de propagación. Fuente:Software HTZ Communcations	94

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En el siempre cambiante panorama de las comunicaciones inalámbricas, la insaciable demanda de conectividad eficiente y de alta velocidad ha generado la necesidad de explorar tecnologías de vanguardia. En este contexto, la presente investigación se adentra en una propuesta de vanguardia: la implementación de una red heterogénea 5G en la banda de frecuencia de 29.1 GHz. El objetivo primordial de esta propuesta es mejorar significativamente la señal electromagnética en el estratégico Puerto del Callao, un epicentro logístico y comercial que enfrenta desafíos críticos en términos de capacidad y eficiencia en sus redes de acceso inalámbricas (RAN). El Puerto del Callao, con su papel central en el comercio y la logística regional, se encuentra en una encrucijada tecnológica. La creciente demanda de datos y la necesidad imperante de conectividad robusta en tiempo real plantean retos significativos a sus actuales infraestructuras de red. Esta investigación parte de la premisa de que, para impulsar la eficiencia y la competitividad del puerto, es necesario explorar soluciones tecnológicas avanzadas que no solo superen las limitaciones presentes, sino que también sienten las bases para la evolución futura del entorno portuario. La implementación de una red heterogénea 5G en la banda de 29.1 GHz representa una estrategia innovadora y pertinente para mejorar no solo la eficiencia y la velocidad de transmisión de datos, sino también para catalizar el despliegue de tecnologías avanzadas. Entre estas, destacan el Internet de las Cosas (IoT) y la automatización, aspectos cruciales para la transformación digital del Puerto del Callao y la optimización de sus operaciones logísticas. La justificación de esta investigación radica en la urgente necesidad de soluciones prácticas y aplicadas que coadyuven al desarrollo tecnológico y a la eficiencia operativa del puerto en el siglo XXI. Este estudio se propone alcanzar varios objetivos fundamentales. Busca analizar detalladamente las características de la banda de frecuencia, evaluar

el rendimiento y la optimización de la señal electromagnética, determinar el impacto potencial de la propuesta en la eficiencia operativa y calidad de servicio, y, finalmente, identificar los desafíos particulares asociados con la implementación exitosa de una red heterogénea 5G en el Puerto del Callao.

En resumen, esta investigación aspira a contribuir no solo al conocimiento técnico en el ámbito de las comunicaciones inalámbricas, sino también a ofrecer una solución práctica y aplicada que fortalezca el desarrollo tecnológico y mejore la eficiencia operativa del Puerto del Callao, consolidándolo como líder regional en el ámbito portuario.

1.1 Planteamiento del problema

La implementación de una red de acceso en el puerto del Callao mediante tecnología 5G en la banda de 29.1 GHz no solo se enfoca en la mejora de la conectividad, sino que también tiene implicaciones significativas para la seguridad y la gestión ambiental. La capacidad de transmitir datos en tiempo real proporcionada por el 5G facilita la supervisión constante de las operaciones portuarias, lo que contribuye a la detección temprana de posibles problemas de seguridad y a una respuesta más rápida ante situaciones de emergencia. Asimismo, la eficiencia energética inherente a las redes 5G permite una gestión más sostenible de los recursos.

La optimización de la señal electromagnética no solo mejora la eficiencia de la red, sino que también reduce la exposición innecesaria a la radiación electromagnética, cumpliendo con estándares ambientales y de salud. Esta integración responsable de la tecnología no solo beneficia al entorno local, sino que también contribuye al compromiso global con prácticas sostenibles en la infraestructura portuaria.

En conclusión, la creación de una red de acceso 5G en el puerto del Callao no solo resuelve desafíos inmediatos de conectividad, sino que también establece un modelo de desarrollo integral que abarca eficiencia operativa, seguridad y responsabilidad ambiental. Este proyecto representa una inversión estratégica con impactos a largo plazo, posicionando al puerto del

Callao como un líder en la adopción de tecnologías avanzadas para el progreso sostenible.

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo General

OG.: Proponer un diseño de una red heterogénea 5G para optimizar la señal electromagnética de una red de acceso en puerto del Callao.

1.2.2 Objetivos específicos:

OE1. Determinar la propuesta de simulación en una red heterogénea 5G para optimizar la cobertura en una señal electromagnética en el puerto del Callao.

OE2. Determinar la propuesta de simulación en una red heterogénea 5G para reducir las señales de interferencia en una señal electromagnética de una red de acceso en el puerto del Callao.

OE3. Determinar la propuesta de simulación en una red heterogénea 5G para ampliar las capacidades señal electromagnética de una red de acceso en el puerto del Callao.

1.3 Importancia y justificación del proyecto

La importancia y justificación del proyecto para implementar una red heterogénea 5G en la banda de 29.1 GHz con el fin de optimizar la señal electromagnética en el puerto del Callao son múltiples y abarcan aspectos estratégicos, económicos, operativos y tecnológicos.

a) **Eficiencia Operativa:** - Mejorará la eficiencia en las operaciones portuarias al permitir una comunicación más rápida y confiable entre todos los actores involucrados, desde autoridades portuarias hasta navieras y

empresas logísticas. - Facilitará la coordinación en tiempo real, reduciendo los tiempos de espera de los buques y mejorando la planificación logística.

b) **Competitividad Internacional:** - Posicionará al puerto del Callao como un centro logístico de vanguardia, mejorando su competitividad en el ámbito internacional al ofrecer servicios más eficientes y avanzados. - Atraerá inversiones y asociaciones estratégicas al destacarse como un puerto tecnológicamente avanzado. **

c) **Transformación Digital:** - Impulsará la transformación digital del puerto, incorporando tecnologías innovadoras que optimizan la gestión de datos y la toma de decisiones. - Contribuirá a la creación de un ecosistema portuario inteligente, con beneficios a largo plazo en términos de automatización y eficiencia.

d) **Seguridad y Respuesta a Emergencias:** - Mejorará la seguridad mediante la capacidad de supervisar y responder rápidamente a situaciones de emergencia en tiempo real. - Facilitará la coordinación entre las autoridades portuarias, equipos de rescate y personal de seguridad.

e) **Desarrollo Económico Regional:** - Generará empleo directo e indirecto durante la fase de implementación y operación, contribuyendo al desarrollo económico de la región. - Estimulará la innovación y el crecimiento de empresas tecnológicas locales asociadas con el proyecto.

f) **Sostenibilidad y Eficiencia Energética:** - Promoverá prácticas sostenibles al mejorar la eficiencia operativa y reducir tiempos de espera, disminuyendo así las emisiones de gases contaminantes asociadas a la congestión portuaria. - La optimización energética inherente a las redes 5G contribuirá a reducir la huella ambiental del proyecto. En resumen, la implementación de esta red 5G no solo aborda las necesidades inmediatas de conectividad en el puerto del Callao, sino que también sienta las bases para un desarrollo sostenible, competitivo y tecnológicamente avanzado en el ámbito portuario. La justificación del proyecto radica en su capacidad para impulsar una transformación integral con beneficios a corto y largo plazo.

1.4 Limitaciones de la investigación

La delimitación precisa del proyecto se centra en la implementación de una red heterogénea 5G en la banda de 29.1 GHz con el objetivo específico de optimizar la señal electromagnética de una red de acceso en el puerto del Callao. Este proyecto se enfoca en abordar las limitaciones actuales de conectividad y eficiencia en el entorno portuario, siendo su alcance claramente definido en los siguientes aspectos:

- a) **Tecnología 5G Heterogénea:** El proyecto se limita al despliegue de una red que combine estaciones base de diferente capacidad y alcance, aprovechando la flexibilidad y adaptabilidad de la tecnología 5G en el contexto específico del puerto del Callao.
- b) **Banda Específica de Frecuencia:** La propuesta se circunscribe al uso de la banda de 29.1 GHz, destacando la importancia de esta frecuencia específica para la optimización de la señal electromagnética en un entorno portuario donde la transmisión de datos en tiempo real es esencial.
- c) **Puerto del Callao:** El proyecto se enfoca exclusivamente en las necesidades de conectividad y eficiencia de la red de acceso en el puerto del Callao, considerando sus características particulares y desafíos logísticos.
- d) **Optimización de la Señal Electromagnética:** La delimitación se establece en la mejora específica de la calidad de la señal electromagnética, apuntando a reducir interferencias, aumentar la capacidad de transmisión y garantizar una conectividad estable en todo el puerto. Esta delimitación proporciona una claridad crucial para la planificación, implementación y evaluación exitosa de la propuesta, asegurando que el proyecto se enfoque de manera precisa en las necesidades identificadas en el puerto del Callao.

El simulador para evaluar la propuesta de implementar una red 5G en el puerto del Callao. Es importante señalar que, aunque el simulador proporciona información teórica valiosa, la instalación real de la red requerirá una variedad de equipos y materiales, como estaciones base, antenas y dispositivos de usuario. La transición del simulador a la implementación física será esencial para adaptarse a las condiciones reales del puerto y lograr los beneficios deseados en términos de eficiencia y conectividad.

Los componentes usados en la implementación de la red heterogénea 5G en la banda de 29.1 GHz para optimizar la señal electromagnética en el puerto del Callao pueden incluir. Las limitaciones de la tesis podrían incluir la necesidad de acceder a recursos específicos para implementar una red heterogénea 5G en la banda de 29.1 GHz en el Puerto del Callao, así como la posible presencia de interferencias electromagnéticas con otras redes o dispositivos cercanos. Además, podrían existir limitaciones regulatorias o legales relacionadas con el uso de esta tecnología en esa ubicación específica. La simulación realizada para respaldar la propuesta podría verse limitada por la precisión de los datos de entrada y los modelos utilizados, así como por la capacidad de replicar con precisión las condiciones reales del Puerto del Callao, lo que podría afectar la representatividad de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO II : REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Industria 4.0*

La Industria 4.0 se caracteriza por la incorporación de tecnologías digitales avanzadas en los procesos de manufactura e industriales. Esta evolución abarca un conjunto diverso de tecnologías, como redes industriales de IoT, inteligencia artificial, Big Data, robótica y automatización. La meta principal es potenciar la fabricación inteligente y la creación de instalaciones industriales inteligentes, con el propósito de mejorar la productividad, eficiencia y flexibilidad. Se originó en el concepto de la Cuarta Revolución Industrial, que marca una nueva era en la que la tecnología transforma radicalmente la producción y el trabajo desde 1800. (¿Qué es la industria 4? | Definición, tecnologías, beneficios | SAP, s. f.)

2.1.2 *Servicio EMBB*

EMBB se utilizará para usuarios estáticos entornos interiores con requisitos de velocidades altas, por ejemplo, realidad virtual, realidad aumentada, juegos online y contenidos multimedia bajo demanda y para usuarios en movimiento en entornos interiores y exteriores y/o con gran densidad de usuarios alrededor (por ejemplo, noticias e información centros comerciales, estadios,

vehículos aéreos no tripulados, trenes de alta velocidad y servicios en la nube. (Gallego Menéndez, 2018)

En el UIT-R, la velocidad de datos experimentada por el usuario y la capacidad de tráfico del área se identifican como parte de las capacidades clave más relevantes para eMBB. Como se analizó en la sección anterior, las dos capacidades garantizan que el soporte del sistema de un servicio eMBB específico se entregue exitosamente a la mayoría de los usuarios, con un número determinado de usuarios en el sistema (Lei et al., 2019).

Tabla 1

Requisitos técnicos de la Banda Ancha Mejorada (Enhanced Mobile Broadband)

Requisito técnico	Velocidad de bajada	Velocidad de subida	Comparación con IMT-avanzado
Tasa de datos pico	20 Gbit/s	10 Gbit/s	-6x LTE-A (Release-10)
Eficiencia espectral pico	30 bit/s/Hz	15 bit/s/Hz	2* IMT-Advanced
5to percentil del usuario de la eficiencia espectral	3 x IMT-Advanced	3 x IMT-Advanced	3 x IMT-Advanced
Promedio de eficiencia espectral	3 x IMT-Advanced	3 x IMT-Advanced	3 x IMT-Advanced

Requisi- tos de rendimi- ento técnico	Velocidad de bajada	Velocidad de subida	Comparación con IMT- avanzado	Requisito
Capacidad de tráfico de área	10 Mbit/s/m2			
Eficiencia energética				
Clase de movilidad con tráfico de canal para velocidades de datos del enlace		Hacia los 500 km/h con 0.45 bit/s/Hz	1.4 clase de movilidad y 1.8 movilidad de datos del enlace.	
Latencia del plano de Usuario del plano de latencia	4 ms	4 ms		2x Reducción comparado con IMT-Advanced
Control del plano de latencia	20 ms	20 ms		5x reducción comparado con IMT- Avanzado

Fuente: (Lei et al., 2019).

2.1.3 Puerto de quinta generación (5G), Puerto 4.0 y Smart Port

El término 'puerto inteligente' se relaciona con la digitalización para mejorar la coordinación, eficiencia y sostenibilidad, especialmente dentro del contexto de los puertos de quinta generación (5G), equiparándose al concepto de Puerto 4. (Henríquez, R., Xavier Martínez De Osés, F., & Martínez Marín, J. E.,2022).

2.1.4 Puerto 5g

Un puerto de quinta generación (5G) se describe como un "puerto electrónico globalizado", siendo un centro vital en las cadenas de suministro mundiales y destacando por sus avanzados sistemas de Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC). Además, se enfoca en la comunidad y en capacidades orientadas al cliente, siempre esforzándose por generar nuevo valor para todas las partes involucradas. (Henríquez, R., Xavier Martínez De Osés, F., & Martínez Marín, J. E.,2022).

2.1.5 Puerto Smart

Un Puerto 4.0 se define como una extensión del enfoque de la Industria 4.0 adaptado a puertos marítimos y terrestres, enfocado en la innovación impulsada por datos. La integración es un valor fundamental para un puerto 4.0 y debe materializarse en cuatro dimensiones: 1) Integración de terminales, incluyendo la automatización de grúas, procesos sin papel y sonorización; 2) Integración puerto-terminal, que implica el intercambio de datos entre los participantes portuarios; 3) Integración de las partes interesadas del puerto, ampliando la automatización del intercambio de datos a entidades externas como las autoridades de la ciudad; y 4) Integración de red, que contempla el intercambio automático de datos con la cadena de suministro más amplia. (Henríquez, R., Xavier Martínez De Osés, F., & Martínez Marín, J. E.,2022).

2.1.6 Espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico sirve como el medio para la transmisión de ondas electromagnéticas en las comunicaciones móviles inalámbricas. Su gestión y regulación recaen en manos de los gobiernos, quienes, de acuerdo con la UIT, definen las frecuencias utilizadas para servicios como la telefonía móvil y la difusión. Este espectro no es estático; se adapta al progreso tecnológico, ajustándose con el tiempo para incorporar cambios en los rangos de frecuencias utilizados en las comunicaciones (Alexis, 2017)

El espectro radioeléctrico se divide en tres segmentos de frecuencia, asignados a servicios particulares que las ondas electromagnéticas pueden ofrecer a empresas de telecomunicaciones. Estas franjas, respaldadas y resguardadas por organismos especializados, ofrecen una concisa pero esencial perspectiva de las frecuencias destinadas a diversos servicios de comunicación (Alexis, 2017).

2.1.7 Onda milimétrica

Tal y como señala el comunicado de la GSMA, la onda milimétrica 5G ofrece a los usuarios «un mayor ancho de banda, una mayor velocidad de datos y una menor latencia». De tal forma que «beneficia especialmente a las zonas densamente pobladas, como los campus y los lugares de ocio y deporte, ya que es una forma rentable de aumentar la capacidad de la red. (Marketing Insider Review, 2021). Las investigaciones para identificar las bandas de frecuencia de uso de la quinta generación han llegado a las conclusiones de que para alcanzar velocidades de 20 Gbps son necesarias portadoras de al menos 1 Ghz y anchos de banda grandes (utilizando frecuencias superiores a 5Ghz). Por lo que, a parte de las bandas de frecuencia existentes para los sistemas LTE, los investigadores están estudiando las opciones de espectro de frecuencia altas, incluyendo bandas de frecuencia de cmWaves (de 3 Ghz a 30 Ghz) y bandas milimétricas (de 30 Ghz a 300 Ghz), donde se puede disponer de un espectro mucho más amplio que el LTE. Aunque de momento, no hay un espectro de frecuencias estandarizado para el 5G, las bandas propuestas se pueden dividir en tres tramos, banda baja (por debajo de 1 Ghz,

basadas UHF (rango de frecuencias de 300-3000 Mhz), banda media (1 Ghz y 6 Ghz) y banda alta (a partir de 28 Ghz)(Gallego Menéndez, 2018).

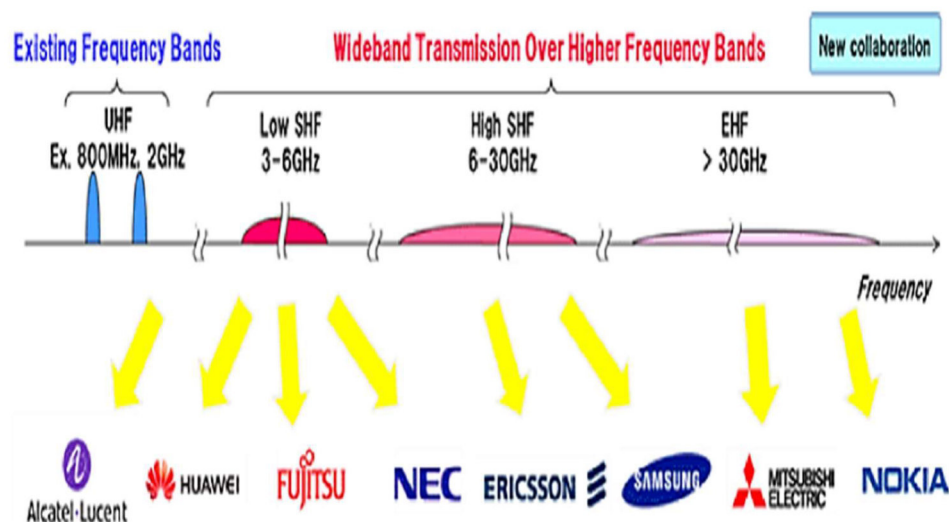


Figura 1: Frecuencias de las bandas. Fuente: (Gallego Menéndez, 2018).

2.1.8 Atenuación, absorción, refracción, interferencia y reflexión

Según Luna (2020), las propiedades características de un movimiento ondulatorio se describen de manera más detallada a continuación:

Atenuación: La reducción de la densidad de potencia en un movimiento ondulatorio, conocida como atenuación, sigue la ley del cuadrado inverso de la radiación. Esta disminución se cuantifica utilizando el logaritmo común de la relación de densidades de potencia, expresado en términos de pérdida en decibelios (dB).

a) **Absorción:** La absorción en un movimiento ondulatorio ocurre cuando las ondas electromagnéticas atraviesan un medio, transfiriendo o siendo absorbidas por él. Materiales como metales y agua, considerados absorbentes ideales, capturan energía de la onda. En el caso específico del agua, la máxima absorción se produce a 22 GHz con vapor de agua.

b) **Refracción:** La refracción se manifiesta cuando una onda viaja de un medio a otro con un índice de refracción diferente, resultando en un cambio de dirección y velocidad. Se toman en cuenta los efectos de la refracción en distancias de trayecto extensas, como aquellas que alcanzan decenas de kilómetros o más. Interferencia: La interferencia en un movimiento ondulatorio se refiere a la colisión entre ondas de la misma frecuencia, pero de fuentes distintas. El resultado de esta colisión puede ser la anulación o amplificación de las señales, dependiendo de las fases relativas de dichas señales.

c) **Reflexión:** La reflexión es el fenómeno donde una onda rebota o cambia de dirección al chocar con un material que reflejará y absorberá partes de la señal. Este proceso se observa en diversas superficies como metales, superficies acuosas y suelos lisos, y puede tener un impacto significativo en la propagación de la onda.

2.1.9 Espectro radioeléctrico para 5g en el Perú

En Perú, la asignación de frecuencias para 5G, es respaldado por resoluciones ministeriales que regulan el uso del espectro. Estas resoluciones, emitidas por el Ministerio correspondiente, delinean las pautas y asignaciones de frecuencias para garantizar una implementación eficiente y armoniosa de la red 5G en el país. Este marco regulatorio es esencial para asegurar una transición fluida hacia la próxima generación de conectividad móvil y optimizar los beneficios para la sociedad peruana.

2.1.10 Resolución Ministerial N° 523-2019-MTC/01.03.30

Norma que dispone la publicación de la modificación del Plan Nacional de Atribución de Frecuencias – PNAF y modifica el Cuadro Nacional de Atribuciones de Bandas de Frecuencia respecto de la banda de frecuencia 3 300 – 3 800 MHz, incluyendo la modificación de la Resolución Ministerial N° 085-2019-MTC/01.03, a efectos de recibir los comentarios de la ciudadanía en general, por un plazo de 15 días, con la finalidad de establecer las condiciones adecuadas en materia de espectro radioeléctrico para la introducción de la Tecnología 5G en el país. Se ropuso la modificación de la

Nota P51A e incorporar las notas P73A y P73B al PENAF, las bandas comprendidas entre 3 300 – 3 400 MHz y entre 3 600 – 3 800 MHz.

2.1.11 Resolución Ministerial N° 796-2020-MTC/01.03.31

Norma que dispone la publicación del Documento de Trabajo denominado “Propuesta de asignación de bandas de frecuencia 3.5 GHz y 26 Ghz e identificación de la banda de frecuencia de 6 GHz para el desarrollo de servicios. y tecnologías digitales 5G y más allá. Con la finalidad de recibir sugerencia y comentarios de la ciudadanía en general en un plazo máximo de 30 días calendario de su publicación. Esta norma plantea dos posibles escenarios que dependerán del grado de ocupación de las bandas de frecuencia que se puedan dar una vez conocida la disposición de las empresas a acogerse a la licitación.

2.1.12 Estado del espectro radioeléctrico en la banda 29.1. GHZ

En el contexto nacional, según la Nota P68 del Plan Nacional de Atribución de Frecuencias (PNAF), las bandas entre 25.25 GHz y 43.5 GHz están atribuidas para servicios públicos de telecomunicaciones mediante sistemas de acceso fijo inalámbrico, según la Resolución Ministerial N° 320-2010-MTC/03. Aunque inicialmente se indicó que el concurso público para la concesión y asignación de espectro sería solo para Lima y el Callao, la Resolución Ministerial N° 687-2018 MTC/01.03 establece que todas las bandas asignadas para servicios públicos de telecomunicaciones requieren concurso público, independientemente de la ubicación geográfica. Las bandas específicas asignadas, sus configuraciones y asignaciones actuales se describen detalladamente en la Nota P68, proporcionando un marco normativo para el despliegue de servicios de telecomunicaciones en estas frecuencias (More & Argandoña, 2019a)

Según (More & Argandoña, 2019a) en relación al espectro disponible para la banda en mención, establece lo siguiente:

“(…)

Banda de 29.1 - 29.25 GHz a 31 - 31.3 GHz: 3 canales en configuración FDD. Aun no se encuentra (...)"

2.1.13 Límites permisibles radiaciones no ionizantes

Diferentes bases científicas fueron usadas en el desarrollo de las restricciones básicas para varios rangos de frecuencias.

Entre 10 y 300 GHz, son proveídas en términos de la densidad de potencia para prevenir el calentamiento excesivo en los tejidos o cerca de la superficie del cuerpo

Las densidades de potencia deben ser promediadas sobre cualquier área expuesta de 20 cm² y sobre cualquier periodo de 68/ f^{1,05} minutos (en GHz) para compensar la profundidad de penetración progresivamente corta conforme se incrementa la frecuencia.

Las densidades de potencia máximos espaciales, promediadas sobre 1 cm² no deberían exceder 20 veces los valores antes mencionados

Tabla 2

Niveles De Referencia Para Exposición Ocupacional A Campos Eléctricos Y Magnéticos (Valores Rms No Perturbados)

Rango de Frecuencias (MHz)	Intensidad de Campo Eléctrico (Vm-1)	Intensidad de Campo Magnético (Am-1)	Densidad de Flujo Magnético (_T)	Densidad de Potencia (Wm-2)
Hasta 1 Hz	–	1,63 x 10 ⁵	2 x 10 ⁵	–
1 – 8 Hz	20 000	$1,63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	–
8 – 25 Hz	20 000	$2 \times 10^4 / f$	$2,5 \times 10^4 / f$	–
0,025 – 0,82 kHz	500 / f	20 / f	25 / f	–
0,82 – 65 kHz	610	24,4	30,7	–

Rango de Frecuencias (MHz)	Intensidad de Campo Eléctrico (Vm-1)	Intensidad de Campo Magnético (Am-1)	Densidad de Flujo Magnético (_T)	Densidad de Potencia (Wm-2)
0,065 – 1 MHz	610	1,6 / f	2 / f	–
1 – 10 MHz	610 / f	1,6 / f	2 / f	–
10 – 400 MHz	61	0,16	0,2	10
400 – 2000 MHz	$3 f^{0,5}$	$0,008 f^{0,5}$	$0,01 f^{0,5}$	$f / 40$
2 - 300 GHz	137	0.36	0.45	50

Fuente:(International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection ICNIRP, 2020)

Tabla 3

Niveles de referencia para exposición poblacional a campos eléctricos y magnéticos (Valores Rms No Perturbados)

Rango de Frecuencias	Intensidad de Campo Eléctrico (Vm-1)	Intensidad de Campo Magnético (Am-1)	Densidad de Flujo Magnético (_T)	Densidad de Potencia (Wm-2)
Hasta 1 Hz	–	$3,2 \times 10^4$	4×10^4	–
1 – 8 Hz	10 000	$3,2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	–
8 – 25 Hz	10 000	$4000 / f$	$5000 / f$	–
0,025 – 0,8 kHz	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	–
0,8 – 3 kHz	$250 / f$	5	6,25	–
3 – 150 kHz	87	5	6,25	–
0,15– 1 MHz	87	$0,73 / f$	$0,92 / f$	–

1 – 10 MHz	$87/f^{0,5}$	$0,73/f$	$0,92/f$	–
10 – 400 MHz	28	0,073	0,092	2
400 – 2000 MHz	$1,375 f^{0,5}$	$0,0037 f^{0,5}$	$0,0046 f^{0,5}$	$f/200$
2 - 300 GHz	61	0.16	0.20	10

Fuente: (International commission on non-ionizing radiation protection ICNIRP,2020)

Se proporciona pruebas de que la exposición a campos electromagnéticos está por debajo de un cierto umbral establecido por ley o los reguladores. Se recopilaron pruebas para respaldar esta afirmación, asegurando el cumplimiento de las normativas y protección de los trabajadores portuarios y de la comunidad.

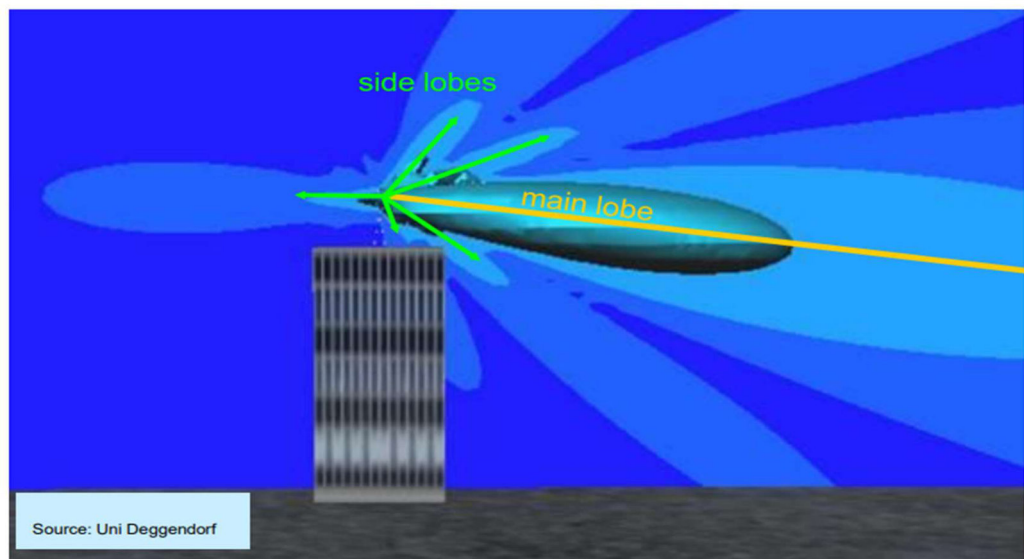


Figura 2: Patrón de Radiación Antena beamforming. Fuente: (Stuhlfauth, 2020).

Según (Stuhlfauth, 2020). Es posible evaluar el flujo de potencia al analizar el patrón de radiación en la configuración menos favorable o sea para el lóbulo principal.

Además, nos muestra las s fórmulas para el cálculo de los parámetros. Antena TX con ganancia g y potencia. P_t genera flujo de potencia S

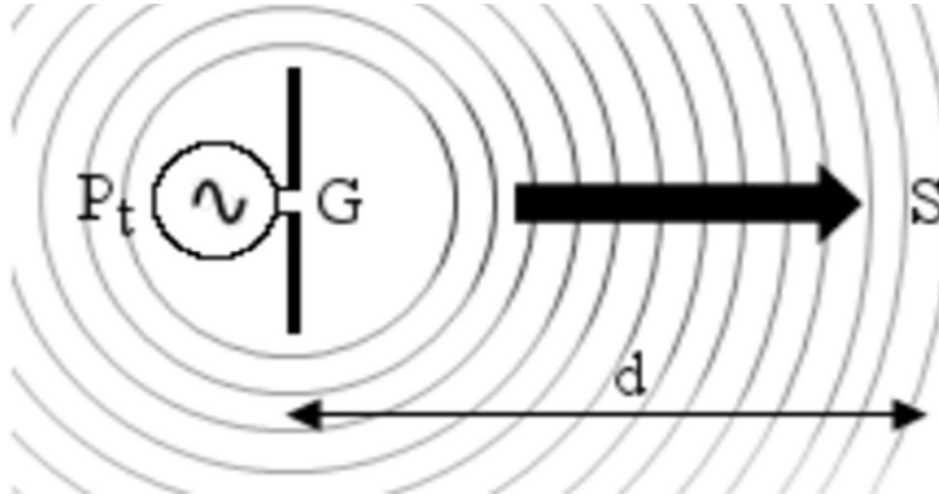


Figura 3: Densidad de flujo eléctricoFuente: (Stuhlfauth, 2020).

Donde S =flujo de potencia

$$S = \frac{gP_t}{4\pi d^2}$$

$$s = \frac{E^2}{Z_0} = Z_0 \cdot H^2$$

$$Z_0 = 377 \, \Omega$$

Z_0 es la impedancia característica

cuando P = potencia RX, S = densidad de flujo y G = ganancia de antena

$$S = \frac{V}{m}; S = \frac{W}{m^2}$$

dBm puede ser convertido de W a W/m^2 y a V/m

2.1.14 Estructura de una red de transmisión 5G

Fronthaul Midhaul y Backhaul son términos que describen distintas secciones de la infraestructura de red. Utilizando el concepto de (López-Aguilera & García-Villegas, 2022), podemos entenderlo de la siguiente manera:

2.1.14.1 Fronthaul 5G

Fronthaul se refiere a la porción de la red que conecta la red con la interfaz de radio. Según (López-Aguilera & García-Villegas, 2022) en el paradigma CRAN, se opta por la centralización de la mayoría de las funcionalidades RAN en la unidad BBU, dando lugar a la denominada conexión fronthaul (FH). Este término engloba los enlaces entre la BBU y la RRH, así como los vínculos interconectando las RRH entre sí. Además, la conexión de enlaces entre eNB y los SC que cumplen funciones de RRH, bajo la premisa de que pocas funciones de los SC están centralizadas en el centro de procesamiento junto con eNB, también podría ser considerada como FrontHaul. Alternativas populares para implementar FrontHaul incluyen interfaces como la Radio Pública Común (CPRI), la Arquitectura de Estación Base Abierta (OBSAI) y la Interfaz de Equipo de Radio Abierta (ORI), permitiendo conexiones tanto cableadas como inalámbricas. La justificación de FrontHaul como elemento clave en las futuras redes, con requisitos rigurosos, ya está respaldada. Además, se están explorando interfaces innovadoras, como fronthaul-lite, la Interfaz Fronthaul de Próxima Generación (NGFI) y xHaul.

2.1.14.2 Midhaul 5G

El Midhaul, según (López-Aguilera & García-Villegas, 2022) se sitúa entre el fronthaul y backhaul, desempeñando un papel crucial en el transporte de datos entre las estaciones base y el núcleo de la red. En la terminología del Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP), la interfaz entre eNB basada en X2 se llama medio recorrido. Sin embargo, con respecto a las futuras redes móviles basadas en 5G, este término se usa de manera diferente. Según Rony Rkibuk Islam, el vínculo entre el fronthaul agregado punto y BBU se llama mitad de recorrido. La idea es lograr la ganancia de multiplexación alojando

algunas funcionalidades, por ejemplo, algunas técnicas de compresión de datos para relajar los requisitos de la red de transporte posterior, dentro del agregador. Los enlaces de mitad de recorrido pueden ser cableados o enlaces inalámbricos según los requisitos y disponibilidad de la red.

2.1.14.3 *Backhaul 5g.*

Conforme a (López-Aguilera & Garcia-Villegas, 2022), el Backhaul representa la conexión esencial entre el núcleo de la red y las estaciones base. Tradicionalmente, se ha utilizado el término “enlaces de retorno” (BH) para referirse a los enlaces que conectan BS/eNB (encargados del procesamiento RAN) a la red central, siendo este un término popular. En este contexto, también se considera BH a los enlaces que conectan un BS/eNB con otro. Por otro lado, en el enfoque centralizado, como CRAN, se designa como BH al enlace que conecta la BBU con la red central.

En el contexto de las redes 5G, donde coexisten tanto DRAN (procesamiento RAN distribuido en BS) como CRAN, todos los cuales transportan una gran cantidad de tráfico hacia/desde la red central, se plantea una implementación rentable donde todas las BS se conectan directamente a la red central. Sin embargo, esta configuración introduce latencia al conectar las BS entre sí a través de la red central.

Para casos en los que aún no se ha instalado fibra óptica, se pueden utilizar tanto enlaces por cable como inalámbricos como enlaces BH. Diferentes enfoques tecnológicos, como Resilient Packet Ring (RPR), Optical Add Drop Multiplexer (OADM), y la multiplexación por división de longitud de onda (WDM), pueden emplearse para mejorar el rendimiento de BH y reducir la latencia.

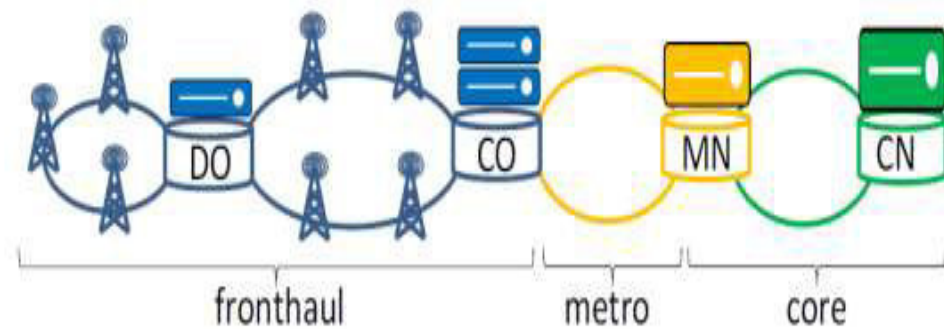


Figura 4: Estructura De Una Red De Transmisión – 5g.Fuente: (Vicente, 2021)

La colocación de nodos de procesamiento centralizado puede ocurrir en la Metro Red (MN) y la Red de Núcleo Central (CN). En contraste con las redes de comunicación de datos convencionales, donde el tráfico tiende a aumentar hacia las redes de capa superior, en el caso de la red 5G, se puede observar un considerable flujo de tráfico en la red fronthaul, mientras que en el metro y, en algunos casos, incluso en la red central, el tráfico es menor. Este fenómeno se atribuye a las divisiones de funciones en las redes radio, introducidas previamente en las redes 4G existentes. (Vicente, 2021)

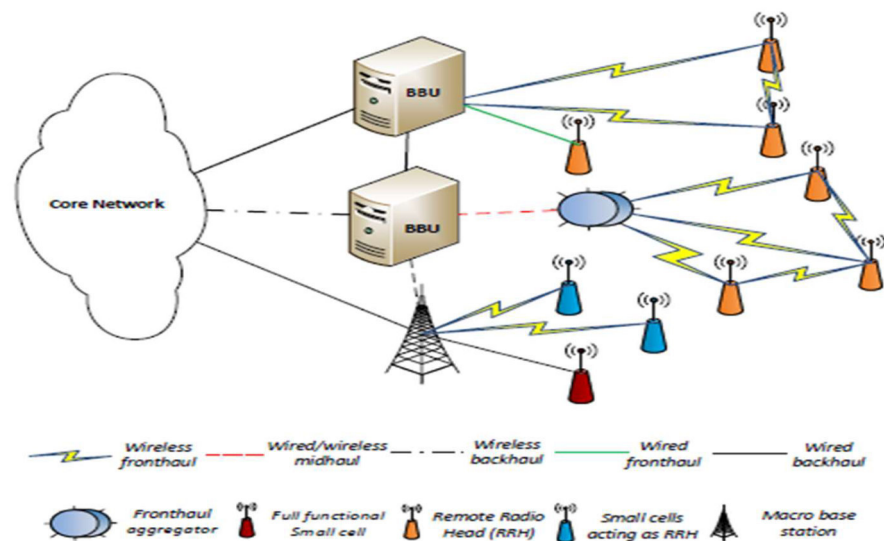


Figura 5: Topología de una red heterogénea. Fuente: (López-Aguilera & García-Villegas, 2022).

2.1.15 Técnica MIMO

A la hora de caracterizar tipos de antenas también se tienen en cuenta estos dos conceptos. En primer lugar, el termino MIMO (Multiple Input Multiple Output) consiste en un sistema de comunicaciones formado como mínimo por 2 antenas transmisoras y 2 receptoras. (Superior & Moreno Sánchez, 2021) Las antenas MIMO logran la optimización de la red debido a que presenta las siguientes ventajas

- a) **Tasa de bits:** Al posibilitar la transmisión al mismo tiempo de varias secuencias de datos, la tecnología MIMO incrementa la velocidad de transmisión sin requerir un mayor ancho de banda.
- b) **Eficiencia espectral:** La tecnología MIMO destaca como el único sistema que eleva la eficiencia espectral al duplicar, como mínimo, la cantidad de bits transmitidos por cada Hertz. a nuestra red utilizando el mismo canal de frecuencia.
- c) **Cobertura:** Con técnicas de diversidad, alcanzamos distancias mayores sin incrementar la potencia.
- d) **Fiabilidad:** La presencia de MIMO reduce la probabilidad de error en la comunicación.
- e) **Coste:** Un solo punto de acceso admite más usuarios, ampliando su alcance con la misma potencia, lo que reduce la necesidad de dispositivos y disminuye los costos de la red.

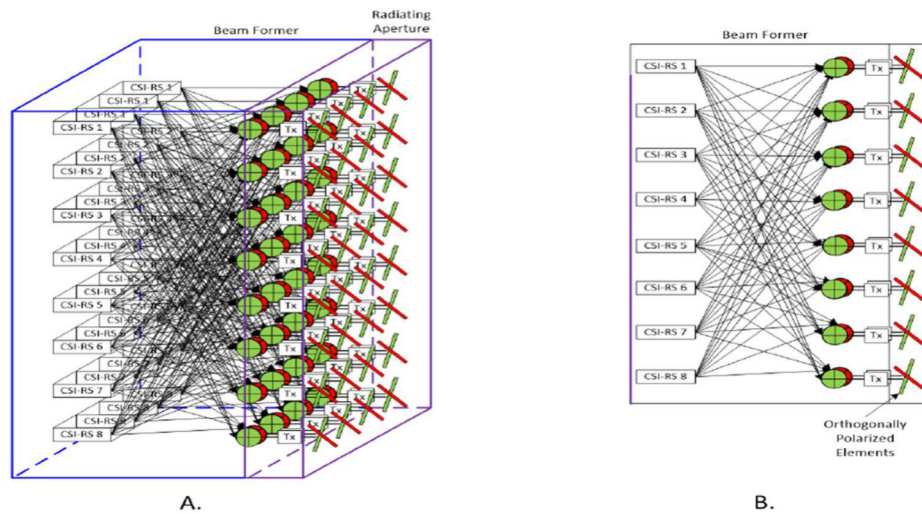


Figura 6: Diagrama 3d de la Antena Mimo 8x8 b. Vista Lateral del Diagrama de la Antena Mimo 8x8. Fuente: (Advanced Antenna Systems for 5G - 5G Americas, n.d.)

2.1.16 Sistemas de antenas activas

El sistema de antenas activas con conjuntos lineales y planos basados en múltiples elementos se han convertido en los facilitadores clave, junto con las técnicas MIMO, para cumplir los requisitos de las IMT-2020. 10. La transmisión de antenas múltiples permite la creación de diversidad espacial o de trayectorias múltiples en el canal, conocido como canal MIMO. La dimensión espacial de las múltiples antenas introduce grados de libertad de señalización que se aprovechan mediante el diseño de esquemas de transmisión. Dicha transmisión para el sistema de antenas activos se puede aprovechar en antenas no correlacionadas y condiciones de rango de canal completo, por lo tanto, la capacidad de resolver el mismo número de rutas de transmisión que los grados mínimos de libertad del sistema de antenas activas de transmisión y recepción. Los tres mecanismos básicos que se explotan: Ganancia de diversidad: se logra principalmente a través de la diversidad de transmisión, lo que generalmente crea señales que no están correlacionadas a través de antenas separadas en el espacio o polarizadas ortogonalmente.

Multiplexación espacial: transmisión de flujos de datos separados en paralelo utilizando los mismos recursos de tiempo/frecuencia. El lado del receptor también requiere múltiples antenas al mismo nivel (grados de libertad) que el número de flujos o capas para descorrelacionar, demodular y decodificar espacialmente. Para un sistema MIMO 2 x 2, la multiplexación espacial se puede realizar utilizando el dominio de polarización. Para sistemas más grandes, el canal debe ser lo suficientemente rico con suficiente dispersión y propagación por trayectos múltiples.

Ganancia de matriz (ganancia de formación de haz): la ganancia de matriz se logra mediante la combinación coherente de las señales de múltiples antenas para enfocar un haz en una ubicación específica del usuario final. Esta combinación coherente se realiza ajustando la fase y la amplitud de cada elemento o subconjunto de antena. Este mecanismo también reduce la interferencia dentro del área de cobertura general, mejorando así la eficiencia espectral en general. (Advanced Antenna Systems for 5G - 5G Americas, 2019.)

2.1.17 Antenas integradas

A medida que se construyen sistemas MIMO de orden superior, la capa adicional de complejidad a medida que aumenta el orden hace que sea aún más importante tener un diseño integrado, un sistema de antena avanzado. Debido a la mayor cantidad de módulos de radio activos en el sistema, no se deben considerar radios y antenas separadas desde el punto de vista de la instalación.

En la banda mmWave, esta integración se vuelve aún más importante debido a mayores restricciones de frecuencia. La eficiencia del amplificador y las pérdidas de RF son más críticas en el espectro de ondas milimétricas. Con un sistema de antena activa, el integrado a funcionalidad del diseño conduce a más funciones y, por lo tanto, a una formación de haces mejorada. (Advanced Antenna Systems for 5G - 5G Americas, 2019).

2.1.18 TDD (Time División Dúplex)

En TDD, la sobrecarga asociada con la estimación del canal de enlace ascendente es proporcional al número de UE, pero independiente del número de cadenas de RF de la antena de transmisión, lo que hace que el protocolo sea completamente escalable con respecto a los grados de libertad de AAS. La sobrecarga aumenta linealmente con el número de usuarios activos en una celda. (Advanced Antenna Systems for 5G - 5G Americas, 2019).

2.1.19 FDD (Frequency División Dúplex)

La mayoría de las redes actuales en bandas inferiores a 6 GHz funcionan en modo dúplex por división de frecuencia (FDD), donde el enlace ascendente y el enlace descendente utilizan diferentes bandas de frecuencia y no se puede utilizar la reciprocidad de canales.

Dadas las dependencias de la sobrecarga tanto del número de puertos de antena como de los usuarios en FDD, existen relativamente más restricciones y sobrecarga adicional en comparación con las mediciones de canales directos basadas en la reciprocidad. (Advanced Antenna Systems for 5G - 5G Americas, 2019.)

Tabla 4

Estaciones Base TDD MIMO Típicas

TxRx	Elementos de antena	Tx/Rx	Máximo número de capas
64T64R	128 (8x8x2)	64	16
	196 (12x8x2)		
32T32R	64 (8x4x2)	32	8
16T16R	32 (4x4x2)	16	8
	96 (12x4x2)		

Fuente: (Advanced Antenna Systems for 5G - 5G Americas, 2019).

2.1.20 Modelos de pérdidas

Las pérdidas de propagación se calculan mediante la ecuación (Ventura, P. T. (2019).):

$$L_{propagación} = L_{fsd} + L_d + L_{clutter} + L_{propagación}$$

L_d = Pérdida por difracción (dB)

L_{fsd} = Pérdida por espacio libre (dB)

$L_{clutter}$ = Atenuación por obstáculos topográficos (dB)

$L_{propagación}$ = Pérdida según el modelo de propagación seleccionado (dB)

2.1.21 Modelo de pérdidas. Método ITU-R- 2001-4 -Modelo de propagación terrenal de gran alcance polivalente en la gama de frecuencias de 30 MHz a 50 GHz

El método de pérdida de propagación descrito en tu texto se basa en un modelo amplio y polivalente que abarca frecuencias de 30 MHz a 50 GHz y distancias desde 3 km hasta al menos 1 000 km. Este modelo se utiliza para predecir pérdidas básicas de transmisión debido al incremento y desvanecimiento de la señal en un año medio.

El modelo combina siete submodelos que representan diferentes mecanismos de propagación, como difracción, conductos, dispersión troposférica, capa E esporádica, absorción gaseosa, atenuación debida a las precipitaciones y trayectos múltiples/enfoque. Estos submodelos se combinan para establecer trayectos de extremo a extremo del transmisor al receptor.

La combinación de los siete modelos no es trivial debido a su carácter estadístico variable con respecto al tiempo. Las correlaciones entre los submodelos son esenciales en el método, y se han definido a partir de datos meteorológicos mundiales a largo plazo.

El método utiliza combinadores para representar propiedades de correlación como correlación completa, exclusión recíproca y no correlación. Se proporcionan fórmulas básicas para combinar distribuciones con diferentes propiedades de correlación.

En resumen, este método ofrece un enfoque integral y estadístico para prever pérdidas de propagación en entornos terrenales, considerando diversos mecanismos y propiedades de correlación.

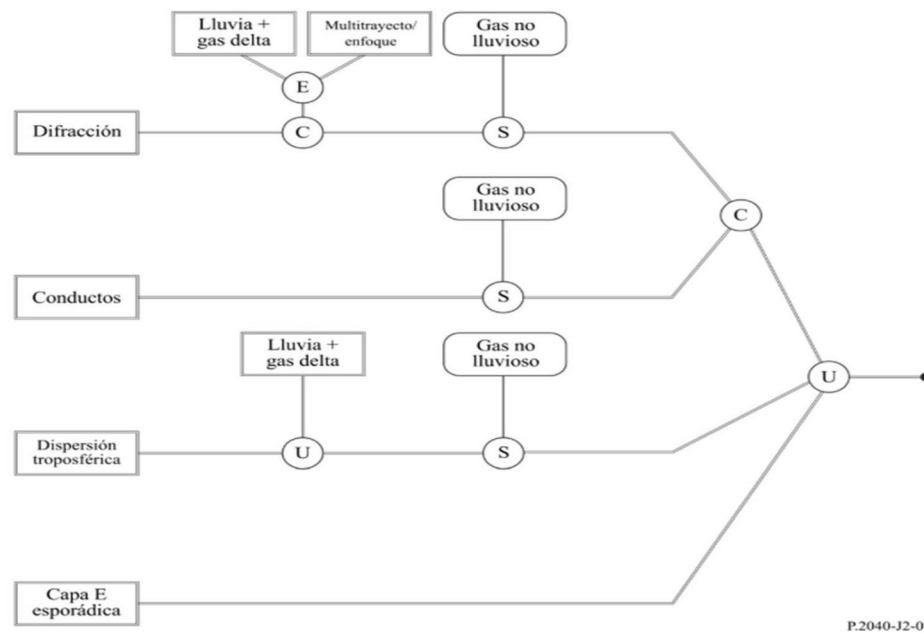


Figura 7: Combinación de submodelos- Método ITU -2001-4

2.1.22 RSRP

RSRP (potencia recibida de la señal de referencia): la potencia promedio de las señales piloto recibidas (señal de referencia) o el nivel de la señal recibida de la estación base. El valor RSRP se mide en decibeles mili vatios (dBm). El nivel máximo corresponde a los tres indicadores de encendido. Si no se enciende ningún indicador, la intensidad de la señal es insuficiente para conectarse a la red. Con RSRP = -120 dBm e inferior, la conexión puede ser inestable o no estar instalada en absoluto. (Boiarynov, 2023)

Según (Sousa, 2021). La señal de referencia de potencia (RSRP) , conceptualiza de la siguiente manera:

$$RSRP = P_{RS} + G_{BS} - A_{TX} + G_{UE} - PL$$

En sus afirmaciones posteriores, (Sousa, 2021). detalla y expone los aspectos específicos relacionados con esta definición.

Dónde P_{RS} es la señal de referencia transmitida por potencia en dbm, GBS es la ganancia de la antena en dBi, ATx es la pérdida del cable (2 db), GUE es la ganancia de la antena y PL es el path loss , en db desde el respectivo Path Loss model.

Donde $P_{TX,MAX}$ es la estación base que transmite mayor potencia en dbm, $N_{PRB}^{BW,u}$ el número de recursos bloques físicos para ancho de banda (BW) y numerología (u) y 12 es el número de subcarriers en un PRB.

El porcentaje de área de cobertura es obtenida comparando el RSRP con el receptor sensibilidad. $P_{Rx,sens}$, después de añadir el shadow fading (SF) margin, MF (in db) y la atenuación marginal de lluvia Mr (in db) para después. La sensibilidad del receptor fue calculada acorde a.

$$P_{Rx,sens} = -174 + 10\log_{10}(SCS) + N_F + SNR.$$

Donde -174 es el ruido constante en dBm/Hz, SC es el espacio de subcarrier, N_F es la figura de ruido (9 db) y SNR es la señal – ruido radio (SNR) en db , calculando la fórmula de Shannon , con un rendimiento objetivo de 100 Mbps. De este modo, para frecuencias en la banda de 3,5 GHz, para un ancho de banda máximo de 100 MHz, la SNR respectiva fue de 0 dB, mientras que para la banda de 28 GHz (ancho de banda máximo de 400 Mhz)

2.1.23 SNIR

SINR (Signal Interference + Noise Ratio) también llamado CINR (Carrier to Interference + Noise Ratio) es la relación entre el nivel de señal y el nivel de ruido (o simplemente la relación señal/ruido). El valor SINR se mide en dB (decibelios). Es sencillo: cuanto mayor sea el valor, mejor será la calidad de la señal. Con valores de SINR inferiores a 0, la velocidad de conexión será muy baja, ya que significa que hay más ruido en la señal recibida que parte útil, y también existe la probabilidad de perder la conexión. (Boiarynov, 2023)

2.1.24 Análisis de la potencia de la señal recibida de referencia (Cobertura)

Para realizar el análisis de la potencia de la señal recibida se requiere tener los parámetros con que se analizan las señales electromagnéticas: muy mala señal, pobre señal, buena señal y muy buena señal: (Boiarynov, 2023)

Tabla 5

Calidad de Señal según KPIS

Parámetros de potencia	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Excelente	≥ -80	≥ -10	≥ 20
Bueno	-80 to -90	-10 to -15	13 to 20
Pobre	-90 to -100	-15 to -20	0 to 13
Muy mala	≤ -100	≤ -20	≤ 0

Fuente: (Boiarynov, 2023)

2.1.25 Detalles de la trama – estructura 5G

Se ha llegado a consensos definidos sobre la apariencia de una trama de radio NR (5G), y se detallará la estructura conforme a la especificación 3GPP (38.211).

La estructura de trama 5G destaca por su flexibilidad, adaptándose a aplicaciones como vehículos autónomos e IoT. Su asignación de recursos eficiente, ajuste dinámico de ranuras y concepto de mini-ranuras ofrecen conectividad rápida y respuesta instantánea, mientras que las subtramas autocontenidas y no autocontenidas brindan opciones flexibles de transmisión. Este diseño innovador impulsa un rendimiento superior para las diversas necesidades de nuestra sociedad interconectada. (5G | ShareTechnote. (n.d.), 2023)

La estructura de trama 5G destaca por su flexibilidad, adaptándose a aplicaciones como vehículos autónomos e IoT. Su asignación de recursos eficiente, ajuste dinámico de ranuras y concepto de mini-ranuras ofrecen

conectividad rápida y respuesta instantánea, mientras que las subtramas autocontenidas y no autocontenidas brindan opciones flexibles de transmisión. Este diseño innovador impulsa un rendimiento superior para las diversas necesidades de nuestra sociedad interconectada. (5G | ShareTechnote. (n.d.), 2023)

2.1.26 Numerología – subcarrier de la trama

Numerología en NR define la estructura física, destacando por admitir varios espaciados de subportadoras, a diferencia de LTE. Los tipos de numerología (u) se resumen en 38.211, donde (u=0) representa 15 kHz, similar a LTE, y otros se derivan escalando en potencias de 2. (5G ShareTechnote. (n.d.), 2023)

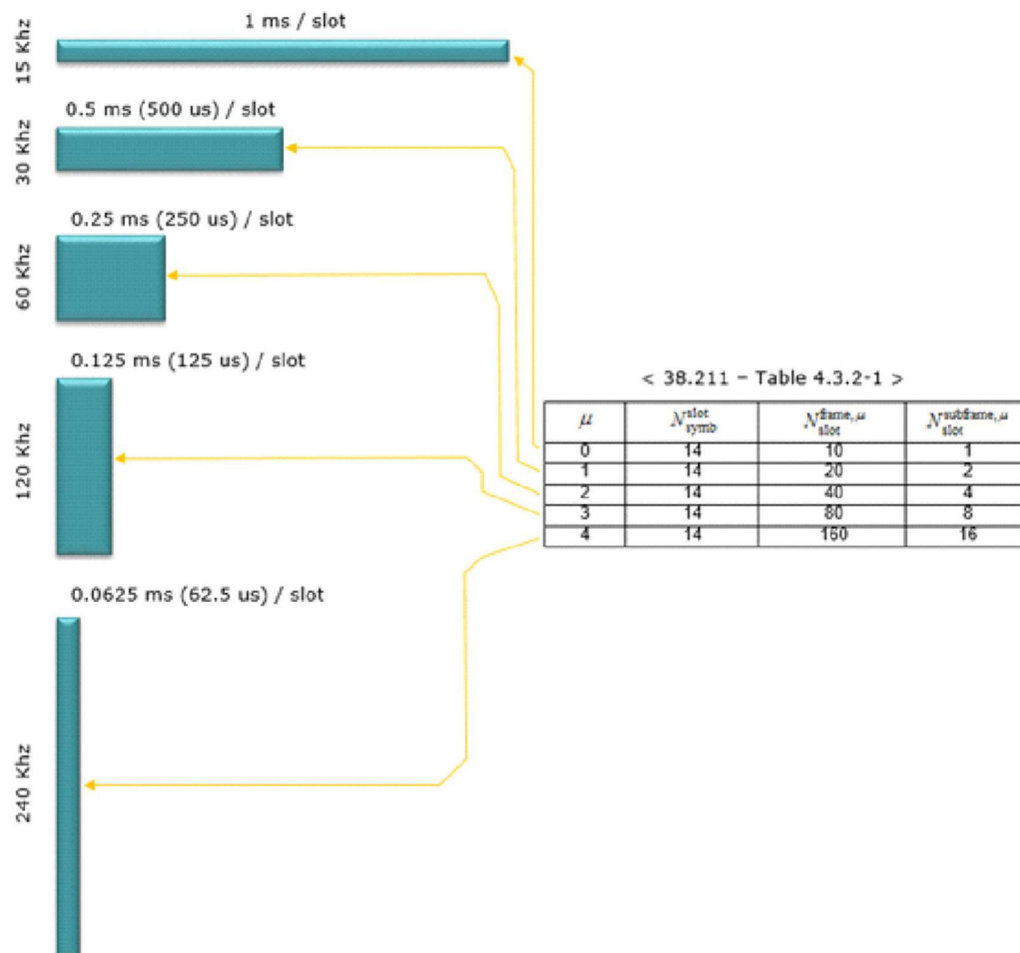


Figura 8: Estructura de trama de radio. Fuente: (5G | ShareTechnote. (n.d.))

2.1.27 Numerología y longitud de las ranuras

Como se indica en la ilustración, la longitud de la ranura varía en función de la numerología. En términos generales, se observa que la longitud de la ranura disminuye a medida que se amplía el espaciado entre subportadoras. Esta tendencia se atribuye a la naturaleza de OFDM. Para obtener información detallada sobre la derivación de la longitud de la ranura, se recomienda revisar la sección de Estructura del Marco de Radio. (5G | ShareTechnote. (n.d.), 2023)

2.1.28 Cuadrícula de recursos

La disposición de recursos en NR se describe de la siguiente manera. A primera vista, al observar la imagen, podrías pensar que es muy similar a la disposición de recursos en LTE. Sin embargo, en NR, las dimensiones físicas, como el espaciado entre subportadoras y el número de símbolos en un

marco de radio, varían según la numerología. . (5G | ShareTechnote. (n.d.), 2023)

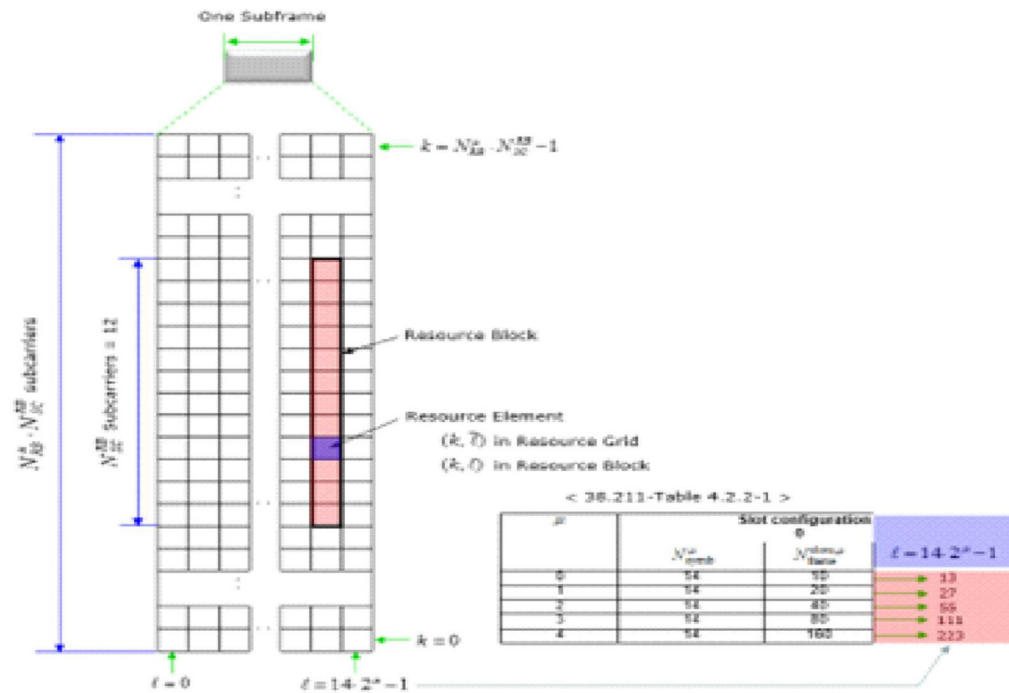


Figura 9: Cuadrícula de Recursos. Fuente: (5G | ShareTechnote. (n.d.))

La cantidad máxima de bloques de recursos para enlace descendente y enlace ascendente se define de la siguiente manera (esto difiere de LTE). En términos de frecuencia de radio (RF), es posible que se necesite un ancho de banda ligeramente mayor que esto debido a la consideración del margen de guarda. Puedes consultar esta página para estimar el espectro de frecuencia de radio (ancho de banda de RF). . (5G | ShareTechnote. (n.d.), 2023)

2.1.29 Eficiencia espectral máxima

Según (Lei et al., 2019) define como la eficiencia espectral máxima (máxima velocidad en condiciones ideales normalizada) por el ancho de banda del

canal (en bit/s/ Hz). La fórmula en la eficiencia espectral máxima para FDD y TDD para un componente portador, es:

$$SE_{pj} = \frac{v_{layers}^{(j)} * Q_m^{(j)} * R_{max} * \frac{N_{PRB}^{BW(j)} * 12}{T_s^\mu} * (1 - OH^{(j)})}{BW^{(j)}}$$

Dónde Rmax = 948/1024 es la tasa de codificación máxima admitida por el canal de datos 5G.

Para el j-ésimo CC:

Es el número máximo de capas.

Es el máximo orden de modulación.

Es la numerología, que se encuentra relacionada al espaciado de la subportadora como se define en 3GPP TS38.211, es decir, la separación entre subportadoras viene dada por $15 \times 2^\mu$ kHz; por ejemplo, $\mu = 0$, si la separación entre subportadoras es de 15 kHz, y $\mu = 1, 2$, si la separación entre subportadoras es de 30 kHz, 60kHz, es la duración media del símbolo OFDM en una subtrama para numerología, es decir, que tenga en cuenta que se asume un prefijo cíclico normal.

Es la asignación máxima de RB en ancho de banda con numerología, como se indica en 3GPP TR 38.817-01 secc. 4.5.1, ¿dónde está el ancho de banda máximo admitido por el UE?, en la banda o combinación de bandas dada.

Es la sobrecarga calculada como la relación promedio del número de RE ocupados por control L1/L2, señal de sincronización, PBCH, señales de referencia y período de guarda (para TDD), etc., respecto del total de RE vigentes producto de tiempo de ancho de banda dado por $\alpha^{(j)} \cdot BW^{(j)} \cdot (14 \times T_s^\mu)$, donde $\alpha^{(j)}$ es el escalar normalizado considerando la relación enlace descendente/enlace ascendente; por FDD $\alpha^{(j)} = 1$ para DL y UL; y para TDD y otras duplicaciones $\alpha^{(j)}$ para DL y UL se calcula en base a la configuración DL/UL.

Para el período de guarda (GP), el 50 % de los símbolos de GP se consideran enlaces descendentes la sobrecarga y el 50 % de los símbolos GP se consideran sobrecarga del enlace ascendente.

2.1.30 Banda n257

La banda n257, perteneciente a la frecuencia FR2 de 5G-NR, opera en el modo Time Division Duplexing (TDD), lo que implica el uso de una única banda de frecuencia para ambas direcciones de comunicación, ascendente y descendente. Con un rango de frecuencia de 26,5 a 29,5 GHz y un ancho de banda de 3 GHz, esta banda facilita la transmisión y recepción de datos en intervalos de tiempo separados para optimizar la eficiencia en las comunicaciones 5G. (Band N257 | 5G-NR Frequency Band - Everything RF, s. f.)

2.1.31 Beamforming

El Beamforming, también conocido como conformado de haces, destaca como una característica vital en las modernas antenas 5G, siendo el pilar fundamental de este estudio. A diferencia de las antenas en generaciones pasadas (2G, 3G y 4G), que emitían señales en un patrón fijo con la máxima potencia permitida por la regulación nacional, las antenas 5G adoptan una perspectiva innovadora. Estas nuevas antenas emplean la tecnología de beamforming para establecer una conexión más eficiente entre los dispositivos móviles y la antena receptora. Este enfoque revolucionario permite a las antenas 5G rastrear la ubicación del dispositivo, incluso cuando está en movimiento, dirigiendo su máxima radiación hacia él. Además, demuestran una capacidad inteligente para ajustar la potencia, optimizando el consumo de energía. Asimismo, implementan estratégicamente nulos para prevenir interferencias con celdas vecinas, estaciones base (BTS) y usuarios circundantes. Este avance tecnológico marca un cambio significativo en la eficiencia y la capacidad de adaptación de las antenas en entornos 5G. (Miguel Aliende García director Gerson Villalba Arana Ponente Arturo Mediano Heredia, 2020)

2.1.32 Lóbulo principal de la antena y ancho del haz de potencia medio.

Las diferentes partes de un patrón de antena tienen distintas formas y magnitudes en relación con otras. partes del patrón. Se les conoce como

lóbulos y hay múltiples tipos de lóbulos; Dos tipos de lóbulos son el lóbulo principal y el lóbulo lateral. (Lutnaes, 2020)

2.1.33 Diagrama de radiación

El diagrama de radiación se define como una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales o de manera menos común, en coordenadas cartesianas. En cambio, cuando se habla de patrón de radiación, se refiere a una representación matemática de las propiedades de radiación de la antena. En la mayoría de los casos, el patrón de radiación se determina en la región de campo lejano. (Balanis, 2005). El lóbulo principal de un diagrama de radiación es el margen angular donde se encuentra la máxima radiación, mientras que los lóbulos secundarios son aquellos con máximos relativos, siempre con valores inferiores al lóbulo principal como se muestra en la figura. (Item 1007/3969 | Repositorio CICESE, 2023.)

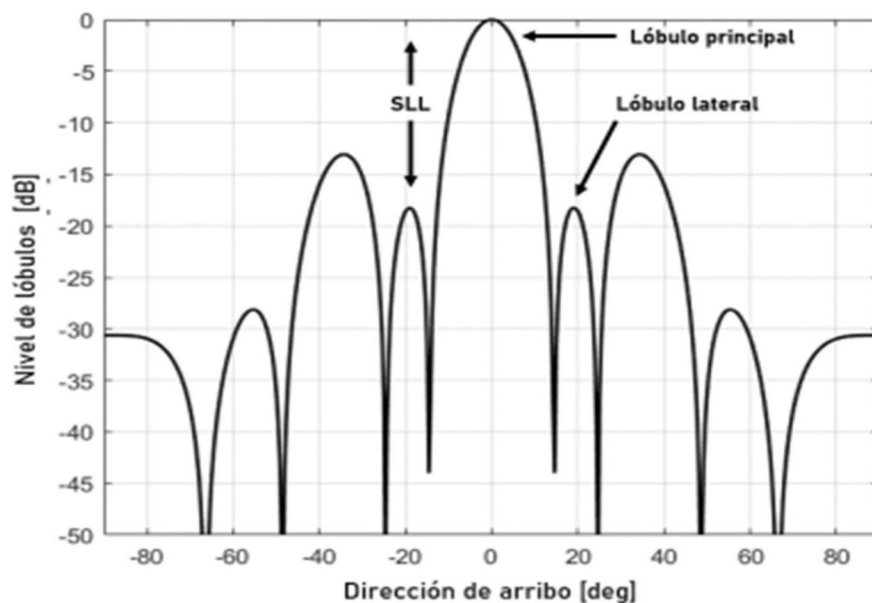


Figura 10: Diagrama de radiación para una antena beamforming,.
Fuente:(Item 1007/3969 | Repositorio CICESE, 2023.)

Otro parámetro asociado con el diagrama de radiación es el ancho de haz, el cual se define como la separación angular entre dos puntos idénticos en el perímetro del lóbulo principal que representan la misma magnitud. Generalmente suelen emplearse dos tipos de ancho de haz, los cuales son, el ancho de haz de media potencia (HPBW) y el ancho de haz de primeros nulos (FNBW)(Balanis, 2005.) El HPBW es la separación angular medida entre los puntos donde el perímetro del haz principal presenta una magnitud de -3 dB. Mientras que el FNBW es la separación angular medida entre los puntos donde el perímetro del haz principal presenta una magnitud que tiende a $-\infty$ dB. En la figura 4 se muestra en un diagrama de radiación en coordenadas cartesianas los dos tipos de ancho de haz previamente mencionados.(Item 1007/3969 | Repositorio CICESE, 2023)

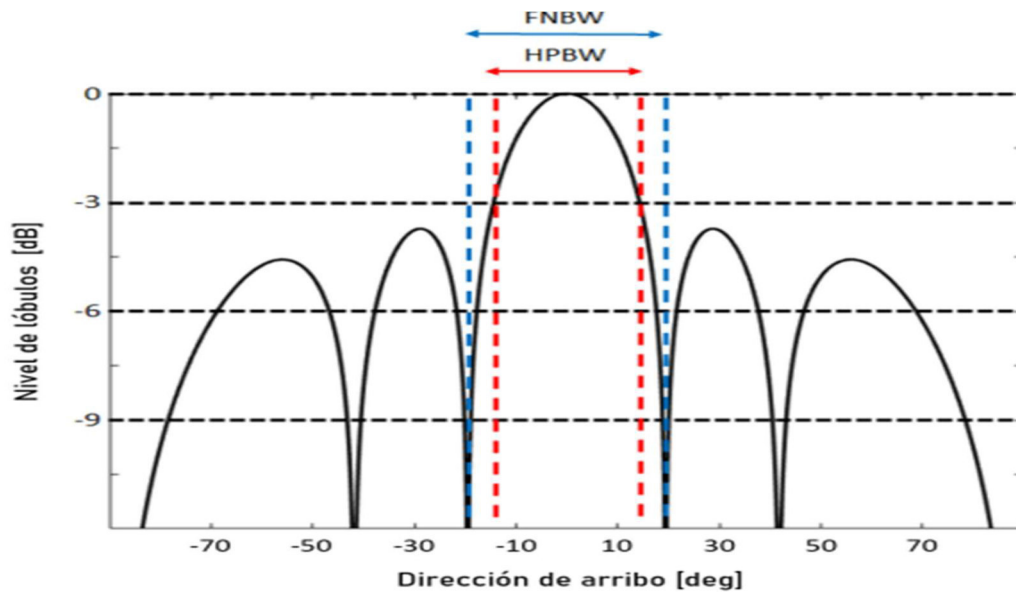


Figura 11: Anchos de Haz en el Diagrama de Radiación Para un Arreglo Lineal de 6 elementos.Fuente:(Item 1007/3969 | Repositorio CICESE, 2023.)

2.1.34 La capacidad de tráfico del área 5G

La capacidad de tráfico del área es la cantidad del tráfico total en el área dada. El total es la cantidad de tráfico está relacionada con la cantidad de usuarios simultáneos con un servicio específico requisito. Proporciona el requisito de capacidad sobre el número de soportes usuarios con una tasa de datos de usuario promedio garantizada. Por ejemplo, para ambiente interior, si asumimos que 20 usuarios por 1000 m² son transmitiendo datos simultáneamente con una velocidad de datos requerida por el servicio de 500 Mbps, luego el requisito de capacidad de tráfico de área sería de $20 \times 500 \text{ Mbps} / 1000 \text{ m}^2 = 10 \text{ Mbps/m}^2$. (Lei et al., 2019).

2.1.35 Distancia entre sitios 5G- criterio de protección de interferencia

Según (Qualcomm Technologies, 2017). La puesta en marcha de las implementaciones móviles 5G NR mmWave se verá influenciada por la necesidad de configuraciones de red más densas, con distancias entre sitios (ISD) que oscilan entre aproximadamente 150 y 200 metros. Esta situación introduce un desafío adicional en el despliegue comercial del 5G NR mmWave, ya que se percibe la necesidad de numerosos sitios de celdas pequeñas adicionales. Este requisito potencial podría tener repercusiones en la demora de las implementaciones a gran escala y podría exigir inversiones significativas. Por ende, se identifica como un aspecto crítico a considerar en el desarrollo de 5G NR.

En la investigación, se empleará con énfasis el Criterio de Protección de Interferencia (IPC) de la NTIA como una pauta clave para evaluar la interferencia aceptable. Es fundamental, especialmente en servicios móviles, mantener la relación portadora a interferencia (C/I) en valores de 9 dB o superiores. Esto garantizará que los resultados reflejen un porcentaje de interferencia que esté significativamente por debajo de los niveles recomendados, asegurando así un rendimiento robusto y eficaz en la red. (Abdulrazak, L. F., 2018)

2.1.36 Software HTZ Communications

El software HTZ communications trabaja en cinco capas diferentes, lo que permite ofrecer una solución integral para una variedad de necesidades de comunicación. Esto amplía su versatilidad y capacidad para adaptarse a diversos escenarios y requisitos específicos, garantizando una cobertura integral y eficiente en todas las etapas del proceso de comunicación, cumpliendo con los estándares más exigentes de la industria.

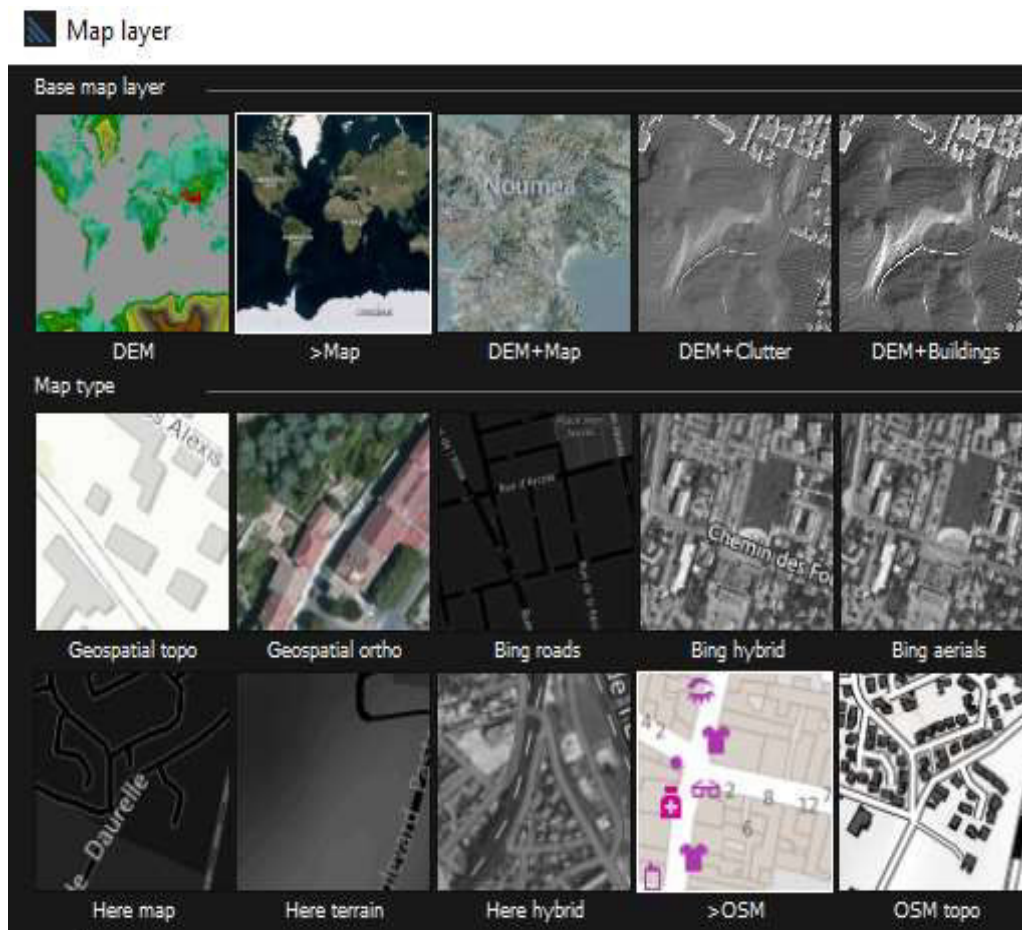


Figura 12:Tipos de capas de mapa.Fuente: HTZ Communications

Las capas de cartografía con las que el software puede trabajar son DEM, MAP, DEM+MAP, DEM+ CLUTTER, DEM+ BUILDING.

Este software destaca por su capacidad para calcular las pérdidas de propagación. Lo sobresaliente radica en su capacidad para evaluar pérdidas

por difracción, troposcattering, reflexiones 3D, atenuaciones de subruta, absorción, atenuaciones de la atmósfera debidas a gases y lluvia. Además, ofrece la flexibilidad de seleccionar métodos de propagación recomendados por ITU o 3GPP, permitiendo la configuración de parámetros globales como pérdidas por indoor, clutter, y conductividad. En esta instancia, hemos adaptado la configuración, como se ilustra en la figura, destacando especialmente el método de propagación ITU R-2001-4

La contabilidad de las ganancias y pérdidas de potencia de la señal permite a los ingenieros evaluar la atenuación de propagación, antena y otras pérdidas. Considera el porcentaje de confiabilidad en el borde de la celda y admite el análisis compuesto, de mejor servidor y superpuestos y de cobertura.

El modelado del tráfico de red genera confiabilidad y solidez en la red. La herramienta utiliza el tráfico mapas para garantizar que la red satisfaga las demandas de tráfico y de suscriptores. Los mapas de tráfico son dimensionados automáticamente y la congestión de la red es analizada e informada.

La realización de análisis de interferencia para canales cocanal y adyacentes permite los ingenieros para minimizar los riesgos al reducir el impacto en la capacidad y la calidad del enlace. El análisis de interferencia puede reducir la relación señal-ruido (SNR) del receptor interferido.

2.2 Antecedentes del estudio.

Gonzáles Ambris en el año 2018, del Centro de Investigación del Instituto Politécnico Nacional de México, diseñó, implementó y evaluó un algoritmo de control de topología y acceso al medio enfocado a las redes heterogéneas 5G.

Fombedilla Gobantes, Álvaro de la Universidad de Cantabria en el año 2019, realizaron un trabajo de fin de grado sobre Modelado y Simulación de Tecnologías MMWW en escenarios 5G en la que implementa y analiza los modelos que incluyan comunicaciones en estas bandas, que puedan ser posteriormente utilizados para el desarrollo de técnicas de gestión de recursos.

Esquivel Mendiola Edgar Adrián en el año 2021 Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional de la Unidad Cinvestav Tamaulipas, propone un marco de gestión de recursos que permita modelar y diseñar esquemas distribuidos para resolver el problema de asignación de estaciones base de forma eficiente en escenarios celulares multicelda, satisfaciendo los requerimientos de QoS de los dispositivos móviles celulares y del IoT, así como las restricciones de recursos de las estaciones bases en escenarios de 5G además propone un enfoque de agrupamiento de dispositivos móviles que permita la estimación del número adecuado de grupos que maximiza la capacidad del sistema, y que mediante el uso de una función de similitud asociada al desempeño del canal inalámbrico realiza el agrupamiento de los dispositivos representados de manera abstracta como datos.

2.3 Base teórica

2.3.1 Evolución de la tecnología 5G

Cada paso adelante en la tecnología ha dado lugar a una nueva fase en la telefonía móvil, generando cambios significativos en las comunicaciones. Estos avances han sido notables de la siguiente manera (Anzola, 2020): la primera generación, 1G, surgió en los años ochenta, siendo analógica y limitada. La evolución a la segunda generación, 2G, en los años noventa, introdujo sistemas digitales, mejorando la calidad y seguridad de las comunicaciones. (SMS) La tercera generación, 3G, llegó en el 2000, ofreciendo velocidades de banda ancha y acceso a Internet móvil. La cuarta generación, 4G, comenzó en 2010, brindando velocidades superiores y respaldando servicios multimedia. La quinta generación, 5G, está en proceso de estandarización y se enfoca en conectar personas y objetos (IoT) con baja latencia y altas velocidades. Este avance transformará la cantidad de dispositivos conectados. Además, se integra con aplicaciones y servicios en la nube.

2.3.2 Capacidades claves de 5G y requisitos de rendimiento técnico

Los servicios 5G forman una base sólida para la definición de la capacidad clave 5G y los requisitos técnicos relacionados. En el UIT-R se definen las capacidades clave para 5G junto con los escenarios de uso previstos para 5G. Los requisitos técnicos de rendimiento se definen en función de la visión 5G y las capacidades clave. (Lei et al., 2019)

Se muestran las capacidades clave para 5G (también conocido como IMT-2020 en el contexto del UIT-R). En la figura se muestra los objetivos de las capacidades clave de 5G como así como la mejora respecto al 4G (también conocido como IMT-Advanced).(Lei et al., 2019). La Figura 1.4(b) muestra la importancia de cada capacidad clave en los tres escenarios de uso.

Según las capacidades clave y la visión de las IMT-2020, el rendimiento técnico. Los requisitos se definen en el Informe UIT-R M.2410. Los requisitos de rendimiento técnico se resumen en la tabla. La definición detallada de los requisitos técnicos de rendimiento se puede encontrar en ITU-R, "ITU-R Report M.2410: Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). Para alcanzar la visión 5G definida por el UIT-R, el 3GPP estudió más a fondo el despliegue escenarios y los requisitos relacionados asociados con los tres escenarios de uso como documentado en 3GPP TR 38.913 -Estos requisitos suelen ser mayores que el requisito de rendimiento técnico de la UIT, lo que demuestra la ambición del 3GPP de proporcionar una capacidad superior a la requerida por la UIT. (Lei et al., 2019)

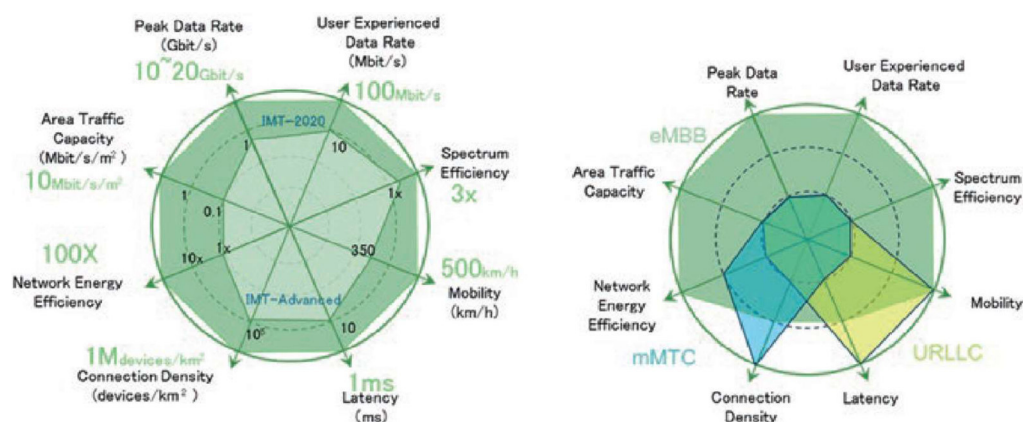


Figura 13: Mejora la capacidad clave 5G – Capacidad clave 5G. Fuente: (Lei et al., 2019)

2.3.3 Escenarios de despliegue de la tecnología 5G

El documento ITU-RM.2412-0 caracteriza un escenario de prueba como una combinación de situaciones de uso y contextos geográficos. En dicho informe, se describieron cinco entornos de prueba específicos, identificados para las IMT-2020, y se detallan a continuación (Imam-Fulani et al., 2023):

- a) **Punto de Acceso Interior-eMBB:** Un espacio cerrado y específico, diseñado para usuarios que se encuentran tanto estacionarios como en movimiento, con un alto nivel de actividad en entornos como oficinas y centros comerciales.
- b) **Área Urbana Densa-eMBB:** Una región urbana con una gran concentración de usuarios y tráfico, destacando tanto a peatones como a usuarios de vehículos.
- c) **Área Rural-eMBB:** Una comunidad rural que brinda soporte a peatones, usuarios de trenes y vehículos de alta velocidad, anticipando una cobertura más amplia y uniforme.
- d) **Macroentorno Urbano MTC:** Un ecosistema urbano a gran escala que se enfoca en una amplia variedad de dispositivos con cable, buscando lograr una cobertura continua.
- e) **Macroentorno Urbano URLLC:** Un entorno urbano de gran escala con el objetivo de proporcionar comunicaciones ultra confiables y de baja latencia.

2.3.4 Arquitectura 5G

El avance hacia funciones virtuales se destaca, incluyendo la adopción de Virtual Network Functions (VNFs) y la implementación de una arquitectura Service-Based Architecture (SBA) para la red 5G Core Network (5GC). La representación gráfica de los elementos de la arquitectura 5G ilustra funciones modulares e interfaces, (Robitzsch, S., Centenaro, M., di Pietro, N., Cordeiro, L., Gomes, A. S., Sanders, P., & Ishaq, A., 2023), considerando implementaciones Standalone. En 5G, el User Equipment (UE), como

uniformemente, generalmente en una rejilla hexagonal, y el área de servicio corresponde al hexágono de la cuadrícula. En 5G red celular heterogénea, la estación base de celda pequeña está irregularmente distribuida, y su área de servicio también es desigual. En general, las estaciones base de células pequeñas están dispersas o agrupadas en la macro red celular para complementar y soportar los servicios de comunicación en el área de borde o área de punto caliente. (Ai et al., 2021)

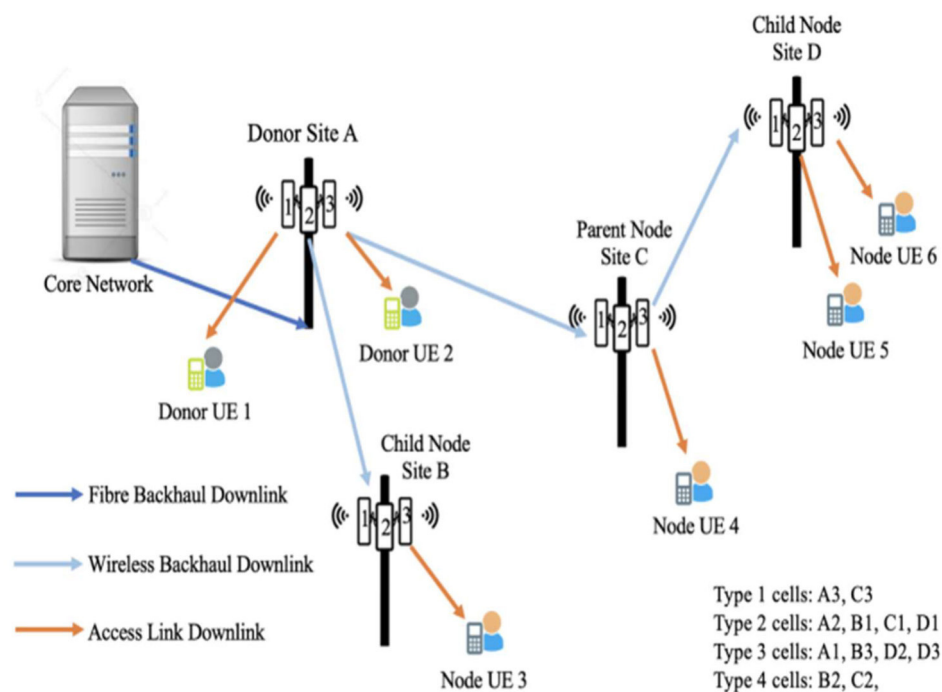


Figura 15: Topología de una red heterogénea. Fuente: (Ai et al., 2021)

2.3.6 Red de acceso para la 5G

La red de acceso 5G, conocida como 5G-NR (Nueva Radio), surge para atender servicios con requisitos contradictorios, como banda ancha mejorada, comunicaciones masivas de máquina y ultra confiables con baja latencia. La arquitectura 5G-NR, según 3GPP TR 38.913 (2018), opera en diversas

bandas de espectro, separando el plano de usuario y control para adaptarse a las necesidades específicas de cada servicio, como asignación de ancho de banda escalable y conexión con múltiples dispositivos. Este enfoque busca ofrecer flexibilidad y adaptabilidad para satisfacer las diversas demandas de servicios en 5G. (Pablo, B., Silva, M., Luis, A., & Zevallos, A. P., 2021)

Según Pablo, B., Silva, M., Luis, A., & Zevallos, A. P., 2021). La red 5G-NR está diseñada para tres servicios clave:

- a) **eMBB (Banda Ancha Móvil Mejorada):** Mejora significativa en velocidad y capacidad para transmisión de video HD, realidad virtual y juegos en la nube.
- b) **uRLLC (Comunicaciones Ultra Confiables y de Baja Latencia):** Conexión extremadamente confiable y baja latencia para aplicaciones críticas en tiempo real.
- c) **mMTC (Comunicaciones Masivas de Tipo Máquina):** Conexión eficiente de una gran cantidad de dispositivos IoT para ciudades inteligentes y redes de sensores.

2.3.7 Modelado de canal

Según (Quintero et al., 2006), la utilidad del modelo canal radica en anticipar el comportamiento del sistema de comunicación, abarcando la estimación de los niveles de cobertura y las tasas de transmisión posibles. Este enfoque cobra especial relevancia al considerar líneas de visión (LOS) Y No línea de visión (NLOS), aspectos críticos en la planificación y diseño de futura redes inalámbricas. En términos generales, los modelos de canal tienen como objetivo prever la pérdida de potencia de señal con características específicas a medida que se propaga en un entorno geográfico determinado. La clasificación de los modelados de canal se da de acuerdo al origen de datos y tamaño de la celda. Según, el origen de datos, en la tesis (Luque Quispe, 2020), lo clasifica y describe de la siguiente manera:

- a) **Modelo estocástico:** denominado así por tratar una serie de variables aleatorias que varían con el tiempo, causando grandes imprecisiones en sus resultados y donde cada una de las variables aleatorias del proceso tiene su

propia función de distribución de probabilidad y pueden o no, estar correlacionadas entre ellas. El enfoque estocástico basado en la geometría caracteriza al canal como una serie de rayos probabilísticos con diferente retardo y dispersión angular representativos de un entorno particular de propagación de múltiples rutas. Las estadísticas espaciales temporales se recopilan en una campaña de medición para una frecuencia determinada en un entorno típico del despliegue deseado.

b) Modelo determinístico: En este modelo los resultados de la simulación no tienen ninguna distribución de probabilidad y son valores que sólo dependen de las condiciones de simulación, los datos a analizar se conocen con certeza. Están basados en la teoría de la propagación de ondas electromagnéticas y aunque no requieren extensas campañas de medidas necesitan conocer en mayor detalle el entorno.

c) Modelo empírico: Está basado en la caracterización estadística de la señal, son fáciles de implementar y son menos sensibles a la geometría del entorno. Sin embargo, estos modelos requieren de extensas campañas de medida que permitan una completa caracterización del canal.

Por otro lado, según (García Rueda, 2016), para la clasificación del modelado de canal por el tamaño celda, lo describe como se detalla a continuación:

Células globales, con un radio superior a los 100 km, suelen brindar cobertura en áreas de difícil acceso.

- **Hipercélulas:** con distancias entre 30 y 100 km, son características del medio rural. Macrocelulas, con radios entre 1.5 km y 30 km, también se encuentran en entornos rurales.
- **Microcelulas:** con radios de 0.1 km a 1.5 km, son empleadas en grandes ciudades. La agrupación de varias de estas células forma la celda de paraguas, diseñada para reducir handovers (traslado de comunicación entre células contiguas).

Por otro lado, las picocélulas tienen una distancia inferior a 100 m y se ubican en lugares con alta concentración de personas como oficinas, centros comerciales y estadios.

- **Las femtocélulas**, con radios de decenas de metros, se utilizan en hogares y áreas interiores de oficinas.

2.4 Definición de términos

5GC: 5G Core Network

BBU: Baseband Unit

Beamforming: Enfocar señal inalámbrica

CPRI: Common Public Radio Interface

Embb: Enhanced mobile broadband

FDD: Frequency Division Duplex

KPI: Key Performance Indicator

Hetnets: Redes heterogéneas

Los: Line of Sight

MIMO: Multiple Input Multiple Output

mMtc: Massive Machine Type Communications

NFV: Funciones de red virtualizadas

NLOS: Non line of sight

OBSAI: Open Base Station Architecture Initiative

SBA: Arquitectura basada en servicios

SNIR: Signal to Noise plus Interference Ratio

IoT: Internet of things

RAN: Redes de Acceso por Radio

RRH: Remote Radio Head

RSRP: Reference Signal Received Power

TDD: Time Division Duplex

uRLLC: Ultra Reliable Low latency

CAPÍTULO III. HIPÓTESIS

3.1 HipoT

La implementación de una Red Heterogénea 5G en la banda de frecuencia de 29.1 GHz, junto con antenas beamforming, mejorará la calidad y la cobertura de la señal electromagnética en una red de acceso ubicada en el Puerto del Callao en comparación con un escenario sin antenas beamforming.

3.2 Variables

- **Variable independiente:** Uso de una Red Heterogénea 5G en la banda de frecuencia de 29.1 GHz con antenas beamforming.
- **Variable dependiente:** Calidad y cobertura de la señal electromagnética en la red de acceso del Puerto del Callao.

3.2.1 *Ubicación de las estaciones base*

La ubicación estratégica de las estaciones base es esencial para garantizar una cobertura confiable y de alta velocidad en todo el puerto. La utilización de una macrocélula como antena principal permite una cobertura amplia, pero es fundamental determinar la distribución óptima de las estaciones base para maximizar la eficiencia del sistema y minimizar la interferencia.

Tabla 6

Ubicación del Transmisor- Macro célula

TRANSMISOR	LONGITUD	LATITUD
TX1	-77.731321	-12.043343

Fuente: Elaboración propia

3.3Operacionalización de las variables

- a) Uso de una Red Heterogénea 5G en la banda de 29.1 GHz con antenas beamforming:
- b) Instalación de estaciones base y equipos compatibles con tecnología 5G en el área del Puerto del Callao, junto con antenas beamforming.
- c) Configuración y activación de la red heterogénea con antenas beamforming para asegurar cobertura y capacidad óptimas.
- d) Calidad y cobertura de la señal electromagnética en la red de acceso del Puerto del Callao.
- e) Medición de parámetros de calidad de señal como potencia, relación señal/ruido y velocidad de transferencia de datos en ambos escenarios (con y sin antenas beamforming).
- f) Análisis comparativo de la cobertura de la señal en diferentes áreas del puerto en ambos escenarios.

CAPITULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de la investigación es realizado desde un enfoque experimental porque se recolectan datos como altura de la antena, potencia del transmisor, y características del escenario en base a mediciones numéricas , cartografía DEM en el software HTZ Communications, el cual ha sido programado configurando parámetros para que nos arroje las pérdidas de propagación (parámetros) en base a un modelado de canal dependiendo de la ubicación del receptor a fin de establecer patrones de comportamiento partiendo de una realidad objetiva y así poder describir, explicar y predecir fenómenos asociados a las pérdidas de propagación.

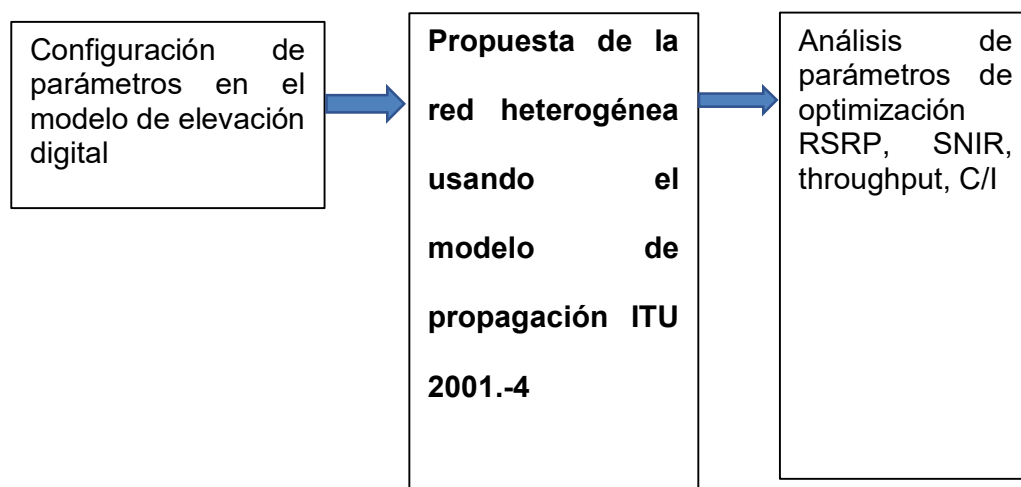


Figura 16: Flujo de metodología de la investigación en el software HTZ Communications

El área de estudio para esta tesis en referencia al 5G será el puerto del Callao ya que conlleva a abordar un tema de relevancia que consiste que con la implementación de 5G se podría lograr una mejora en la eficiencia operativa, la gestión logística, la movilidad entre otros. Abordar el uso vertical del 5G en este entorno puede proporcionar insights valiosos para optimizar procesos y aumentar la productividad en actividades portuarias. El desarrollo tecnológico en el puerto del Callao contribuye al desarrollo de soluciones tecnológicas lo que conlleva a la innovación mediante los desafíos logísticos y mejorando la competitividad en el Puerto del Callao. Mejorando la eficiencia en el puerto del Callao surgiría un impacto positivo en la economía local, regional y nacional generando beneficios económicos y oportunidades de empleo. Con la singularidad de estudiar la implementación de la tecnología 5g en el mencionado puerto nos permite a hacer un análisis más a profundidad de esta determinada área relacionada con la infraestructura 5g, la logística y las operaciones marítimas. La investigación fomentaría la colaboración entre instituciones académicas, empresas y autoridades creando oportunidades para proyectos que tengan que ver con el desarrollo tecnológico 5G en el puerto del Callao. demás, al considerar el software HTZ Communication en tu investigación, se podría alcanzar una gestión efectiva de las interferencias en la red. La aplicación de esta herramienta puede ser crucial para mitigar problemas relacionados con la interferencia de señales en el entorno portuario del Callao, mejorando así la fiabilidad y la estabilidad de la red 5G en ese contexto específico.

Según la página <https://www.nperf.com/>, que muestra mapas de cobertura 3G/4G/5G en Perú de las empresas Movistar Móvil, Claro Móvil, Bitel Móvil, Entel Móvil, se observa una ausencia significativa de cobertura de la tecnología 5G en la banda milimétrica en diversas áreas del país. Esta ausencia de la tecnología 5G, como se muestra en las figuras proporcionadas por nPerf, resalta la necesidad apremiante de investigar y desarrollar la tecnología 5G en la banda milimétrica para mejorar la conectividad y la cobertura en áreas donde las tecnologías actuales son insuficientes.

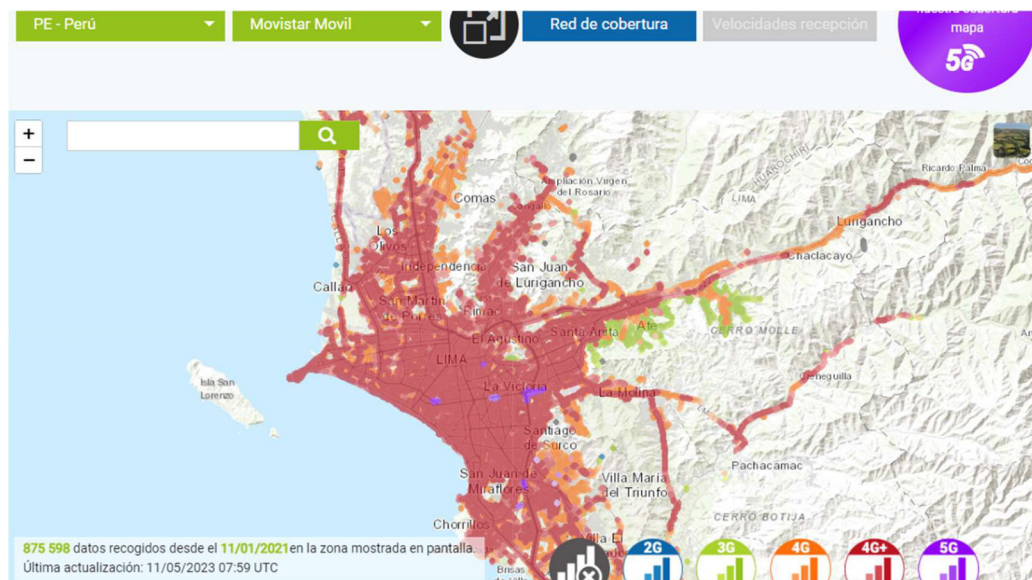


Figura 17: Mapa de cobertura 5G – Movistar móvil. Fuente: (Cobertura 3G / 4G / 5G - Perú - nPerf.com, s. f.)

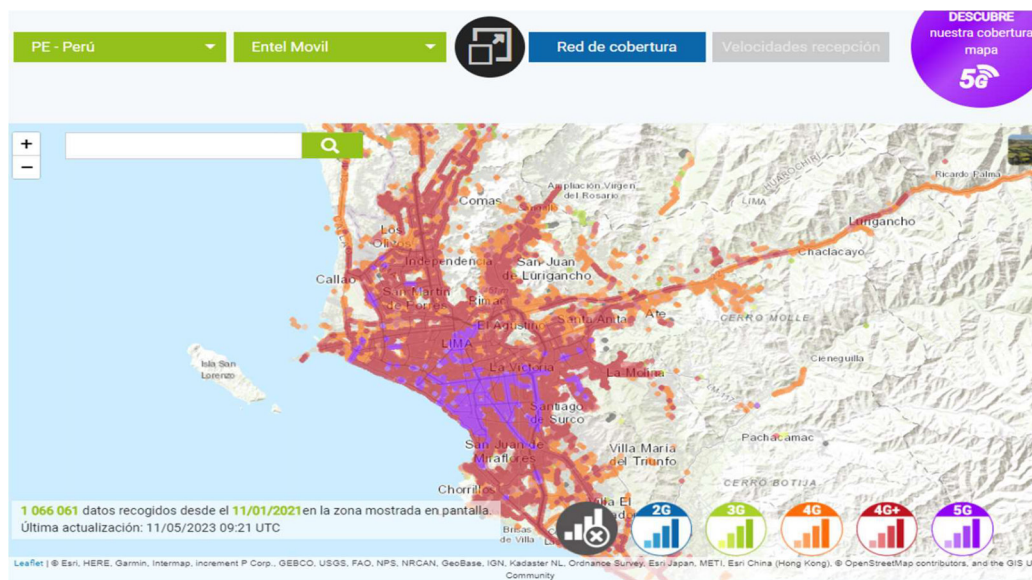


Figura 18: Mapa de cobertura 5G – Entel móvil. Fuente: (Cobertura 3G / 4G / 5G - Perú - nPerf.com, s. f.)

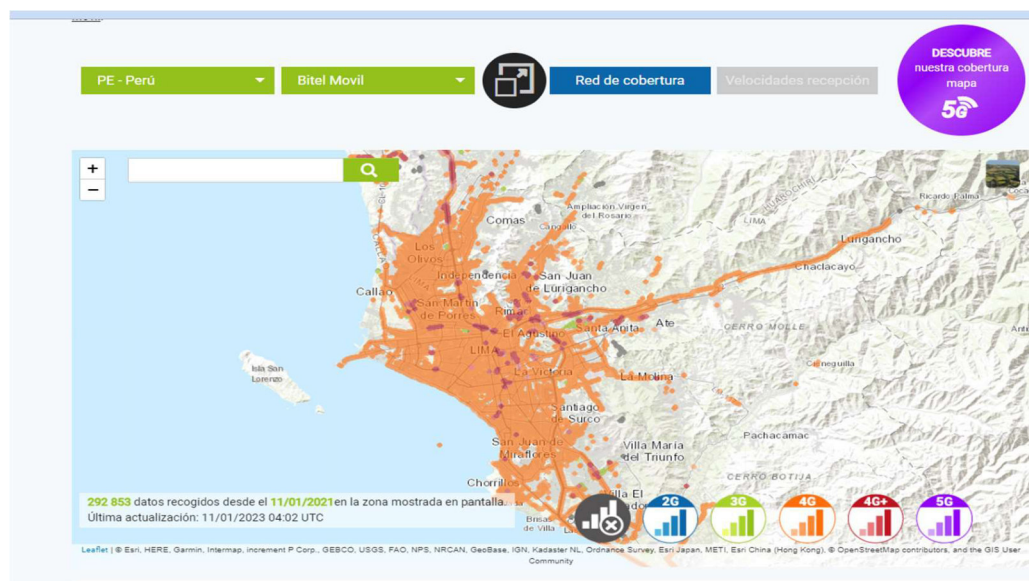


Figura 19: Mapa de cobertura 5G–Bitel móvil. Fuente: (Cobertura 3G / 4G / 5G - Perú - nPerf.com, s. f.)

En la tesis centrada en la implementación del 5G en el puerto del Callao, la extensión del área de estudio abarca aproximadamente 0.44 km cuadrados, incorporando meticulosamente zonas críticas como las de carga y descarga, así como las áreas de almacenamiento. Estas áreas específicas son objeto de un análisis exhaustivo con el propósito de evaluar y comprender de manera integral el impacto y los beneficios potenciales de la implementación del 5G en un entorno portuario.

La delimitación clara de este estudio es esencial, ya que proporciona un marco contextual preciso que permite a los lectores y investigadores comprender la extensión y el alcance exactos de la tesis. Este enfoque detallado garantiza que los resultados y las conclusiones obtenidos estén directamente relacionados con las áreas críticas identificadas en el puerto del Callao, proporcionando así una base sólida para las recomendaciones y hallazgos presentados en el documento.



Figura 20: Área para implementar 5g – Puerto del Callao. Fuente: Google earth

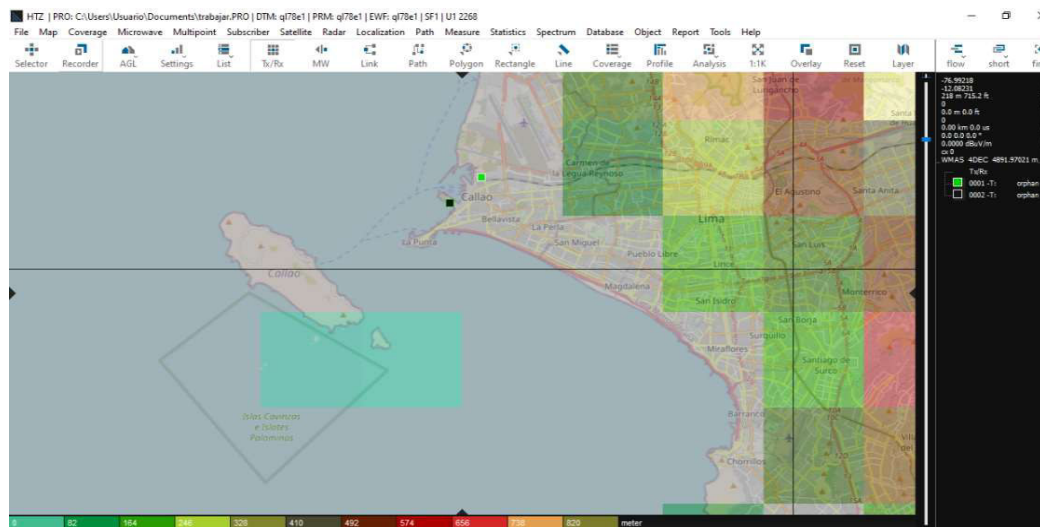


Figura 21: Mapa + capa DEM. Fuente: Google earth

El árbol de estaciones se ubica en muestra los elementos de red que se encuentran sobre el área de trabajo, los objetos activados son representados por un rectángulo coloreado, mientras que los rectángulos vacíos corresponden a los elementos desactivados. Es posible agrupar los sitios de acuerdo con las coordenadas, código del sitio, ID de la red, estado y jerarquía haciendo clic derecho en el título para seleccionar el método de agrupamiento deseado. Haciendo clic derecho con un objeto seleccionado, se desplegará un menú contextual con algunas funciones asociadas como parámetros, cálculo de cobertura, enlace a otros objetos, aislamiento o ubicar el elemento en el mapa.

4.1 Área de estudio

El estudio se llevará a cabo en el Puerto del Callao, ubicado en la costa central de Perú, una importante terminal marítima que conecta el país con el resto del mundo.

4.1.2 Elección de la Ubicación del transmisor de la macrocélula

La selección de la ubicación del Transmisor se basa en la existencia de infraestructura previa en esa área y la decisión estratégica de implementar tecnología 5G. Al aprovechar la infraestructura existente, se busca una transición eficiente y costos reducidos. Además, la elección de la tecnología 5G puede ser innovadora, considerando la disponibilidad de recursos y el potencial de mejora de la conectividad en el área. Esto se fundamenta que en las figuras 14, 15 y 16 de la presente tesis se evidencia que la tecnología 5G aún no está presente, por lo que se sugiere una inversión proactiva para introducir tecnología de vanguardia..

4.1.3 Elección de la Ubicación del Transmisor de la microcélula:

La ubicación del Transmisor de la microcélula, determinó después de un estudio de campo detallado y, a su vez, se optó por implementar tecnología 5G dentro del área del puerto del Callao. Este enfoque estratégico se basa en la proyección de futuras mejoras y en la posibilidad de ofrecer servicios avanzados en la región. En las figura indiquen que la cobertura de red 5G aún no está presente, la elección de la tecnología 5G refleja una visión a largo plazo y un compromiso con la evolución tecnológica. En conjunto, la elección de la ubicación y la implementación de tecnología 5G para ambos transmisores sugieren una estrategia integral que aprovecha la infraestructura existente y anticipa el desarrollo tecnológico futuro para mejorar la conectividad en la región. El área para estudiar será la del puerto del Callao ya que es un puerto marítimo y con la implementación del 5G se garantizaría conectividad de alta velocidad, baja latencia para las operaciones portuarias incluida la gestión del tráfico marítimo, el manejo de contenedores y la seguridad, automatización y robótica, seguridad y vigilancia, redes privadas optimización de procesos logísticos experiencia mejorada para trabajadores y visitantes. El Puerto del Callao, ubicado en la ciudad de Callao en Perú, se encuentra en un entorno urbano. Callao es la provincia y también el principal puerto del país, situado muy cerca de la capital, Lima. Dada su importancia como puerto marítimo y su proximidad a áreas metropolitanas, el entorno se clasificaría como urbano. La presencia de instalaciones portuarias, infraestructuras comerciales y la conexión con áreas urbanas circundantes contribuyen a esta clasificación. En el marco de esta tesis, se plantea la creación de una macrocélula y una microcélula, adoptando diferentes enfoques tecnológicos. Se hallará la cobertura en el transmisor de la macrocélula probando diferentes potencias con una configuración ya establecida para luego compararlo con la configuración de antenas beamforming. Esta variación estratégica permitirá realizar un análisis comparativo exhaustivo, evaluando parámetros cruciales como SNIR, RSRP throughput y C/I.



Figura 22: Topología de un diseño propuesto. Fuente: elaboración propia- Google earth

4.2 Diseño de la investigación

Se seleccionarán diferentes puntos dentro del Puerto del Callao para realizar mediciones de la calidad y cobertura de la señal electromagnética en ambos escenarios (con y sin antenas beamforming). La muestra será representativa de las diversas áreas y condiciones dentro del puerto.

4.3 Procedimiento, técnicas e instrumentos de recolección de información

Antes de la implementación de la Red Heterogénea 5G: se realizarán mediciones de la calidad y cobertura de la señal electromagnética en ambos escenarios utilizando equipos de medición especializados además se

registrarán los datos obtenidos en cada punto de medición. Por otro lado, se instalarán y configurarán los equipos y estaciones base de la Red Heterogénea 5G con antenas beamforming en el área del Puerto del Callao. Después de la implementación de la Red Heterogénea 5G con antenas beamforming se repetirán las mediciones de calidad y cobertura de la señal electromagnética en los mismos puntos de medición, se compararán los resultados obtenidos en ambos escenarios para evaluar el impacto de las antenas beamforming en la mejora de la señal electromagnética en el Puerto del Callao.

4.4 Análisis estadístico

En esta sección se proporciona, una introducción al análisis estadístico realizado para comparar los escenarios beamforming y no beamforming en términos de mediciones específicas.

Se proporciona una descripción general de las mediciones realizadas en cada escenario, incluyendo estadísticas descriptivas.

A continuación, se presenta la hipótesis nula y alternativa para comparar los escenarios “beamforming” y “no beamforming”. En la tabla 7 se muestran diferentes valores obtenidos en los diversos escenarios beamforming y no beamforming, mostrados en el capítulo V de la presente tesis. Luego en la tabla 8, se muestra la prueba F utilizada para evaluar significancia entre los grupos.

Hipótesis nula (H_0): No hay diferencia significativa en la RSRP Y SNIR entre los dos escenarios.

•Hipótesis alternativa (H_1): Hay una diferencia significativa en la RSRP Y SNIR entre los dos escenarios.

Tabla 7

Valores de RSRP Y SNIR en el Escenario Beamforming y No Beamforming

RSRP	SNIR
-81,49	68,48

RSRP	SNIR
-80,49	69,48
-79,4	70,48
-93,49	56,48
-90,49	59,48
-89,49	60,48
-83,49	37,73
-82,49	38,73
-76,49	44,73

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Prueba F Para La Muestra De Dos Varianzas

	RSRP	SNIR
Media	-84,47875	54,69875
Varianza	36,1295839	167,0435268
Observaciones	8	8
Grados de libertad	7	7
F	0,21628844	
P(F<=f) una cola	0,03051923	
Valor crítico para F (una cola)	0,26405823	

Fuente: Elaboración propia

Recordemos que la hipótesis nula en una prueba Fisher se rechaza si se cumple alguna de estas dos condiciones:

- $0,05 > 0,03051923$
- $0,21628844 > 0,26405823$

En el contexto de la prueba de Fisher, la hipótesis nula se rechaza si al menos una de las condiciones establecidas se cumple. En el presente estudio, se observa que solo una de las condiciones de Fisher es satisfecha: específicamente, la condición donde 0.05 es mayor que 0,03051923. Por lo tanto, la decisión de rechazar la hipótesis nula dependerá únicamente de esta

condición, destacando la importancia de analizar cada criterio individualmente para una interpretación precisa de los resultados estadísticos.

CAPÍTULO V RESULTADOS

5.1 Presentación y análisis de resultados

Para conocer los resultados de los KPIS se incorporarán parámetros claves el transmisor. En relación con la macro célula, se utilizaron los parámetros especificados en la tabla correspondiente. Estos parámetros podrían incluir información clave, como la frecuencia de operación, la potencia de transmisión, la altura de la antena, numerología. La configuración del transmisor es esencial para lograr un rendimiento óptimo y una cobertura adecuada en la macro célula dentro de la red de comunicaciones. La elección adecuada de estos parámetros impacta directamente en la calidad y la eficiencia de la transmisión de señales en la macro célula.

Tabla 9

Parámetros de simulación del gnb (Tx1) – Macro célula

PARÁMETRO	VALOR
SEÑAL	FDD
FRECUENCIA	29100 MHZ
TAMAÑO DE LA ANTENA	25 m
MODULACIÓN	256 QAM
Potencia TX	15,20,25,30,35,40
ARRAYS T/R	16/16
LAYERS	16
TIPO DE CONFIGURACIÓN DE ANTENA	AAS
GANANCIA DE ANTENA TX	24 dBi
E.I.R.P.	Varía
FRECUENCIA	29100 MHZ
ANCHO DE BANDA DE TX	50000 Khz

PARÁMETRO	VALOR
ANCHO DE BANDA DE RX	50000 Khz
ÁREA	URBANA
COV THRESHOLD	75 dBu
RX THRESHOLD	71 dBu
% Ref señal	7.576
% PDSCH	92.424
Numerología	120 Khzm 20 a 275 RBs

Fuente: elaboración propia.

Antes de hallar la cobertura en la macro célula en un escenario urbano, sumergimos nuestro transmisor con los parámetros que se muestran en la figura, siendo un punto clave para el diseño de la red heterogénea, teniendo en cuenta que el uso de una antena omnidireccional tal como se muestra en la figura. La elección de la potencia del transmisor se basa en una cuidadosa evaluación para cumplir con los objetivos de la investigación. Como instrumento de medición se usó el software HTZ Communications.

Se realizará un análisis de cobertura específico para antenas de 2 metros en el área de estudio del puerto del Callao, evaluando cómo la frecuencia de 29.1 GHz se propaga en este entorno con alturas de antena específicas considerando el modelo ITU 2001-4. Este enfoque permitirá identificar posibles limitaciones y garantizar una implementación precisa del servicio 5G, adaptada a las características particulares de las antenas utilizadas en el área portuaria.

Coverage parameters

Height of Rx antennas: 2 m [Default]

Distance (km): 15.000 [...]

Min coverage value (dBuV/m): 1 [Storage]

Wanted threshold: 35 [...]

Perform missing coverage ☐

Vector polygon limited ☐

Vector line limited ☐

Vector path limited ☐

[Model...] [Options...] [OK] [Cancel]

Figura 23: Parámetros de cobertura. Fuente: HTZ Communications.

En la metodología, se realizará un análisis de cobertura específico para antenas de 2 metros en el área de estudio del puerto del Callao, utilizando exclusivamente el modelo digital del terreno (DEM). Este enfoque se centrará en evaluar la propagación de la frecuencia de 29.1 GHz en el entorno portuario, considerando únicamente las alturas de antena específicas y aplicando el modelo ITU 2001-4. Al basarse exclusivamente en el modelo DEM, se simplifica el análisis para centrarse en la topografía del terreno y su influencia en la propagación de la señal. Se buscará comprender cómo las alturas específicas de antena y el modelo ITU 2001-4 interactúan con la geografía local para proporcionar una visión más precisa de la cobertura 5G en el área del puerto del Callao.

En la metodología, después de realizar el análisis de cobertura utilizando exclusivamente el modelo digital del terreno (DEM) para antenas de 2 metros en el área del puerto del Callao, se procederá a llevar a cabo un análisis detallado de los Key Performance Indicators (KPI) pertinentes. Estos KPI se

seleccionarán cuidadosamente para evaluar la calidad y eficiencia obtenida de la cobertura 5G obtenida.

Figura 24: *Parámetros de configuración del transmisor.* Fuente: HTZ Communications

En el marco de la tesis, se procede a analizar las mediciones en un punto específico del mapa DEM. El receptor ha sido configurado con parámetros apropiados, conforme se detalla en la figura adjunta. Es importante destacar que se ha implementado la técnica de MIMO adaptativa con switching modes. Este enfoque estratégico se incorpora con el fin de optimizar la calidad de la recepción y maximizar la eficiencia del sistema en distintos escenarios, contribuyendo así a una evaluación más completa y precisa de las medidas en el área de interés.

4G/5G analysis

Parameters

RSRQ required value: -19 dB

SNIR PDSCH required value: -6 dB

ICIC enhancement: 0 dB

Thresh.: -125 -105 dBm RS / 35 dBu ...

Mobile antenna: 2.00 m

KTBF (1): -97 dBm

Rx gain: 24.00 dB

No. arrays (mobile): 250

Max distance calculation...

MIMO adaptive switching modes (AAS):

- ☒ Spatial Multiplexing
- ☒ MU/M-MIMO (Multi-user / Massive MIMO)
- ☒ Tx Div (Transmit Diversity) - MISO
- ☒ Single Antenna Port (SISO or SIMO)

(AAS) BS antenna must be set to AAS

IRF mask (dB)

N	IRF mask (dB)	used
N=0	0	☒
N=1	20	☒
N=2	30	☒
N=3	40	☒
N=4	50	☒
N=5	50	☐
N=6	50	☐
N=7	50	☐
N=8	50	☐
N=9	50	☐
N=10	50	☐
N=11	50	☐
N=12	50	☐
N=13	50	☐
N=14	50	☐
N=15	50	☐

☒ Use mask as filter

☒ IRF from tables (ETSI/ITU/IEEE/ICAO)

☐ CNC-DNRc61 ☐ CNC-DNRc54 ☐ FCC

☐ IRF from Tx/Rx C/I

☐ IRF from NFD / TS-RIF

☒ Global XPD: 0 dB

C/H or V: 3 dB protection except if global XPD=0

☐ Activity factor weighting [IRF-10.log(activity)]

☒ Smart antenna rejection

Rx bandwidth / Tx bandwidth

Buttons: OK, Cancel, Palette..., Station list..., Load..., Save..., Options...

(1) 0 = from station parameter KTBF

Figura 25: *Parámetros del receptor 5G.* Fuente: HTZ Communications

En la Figura 25, se visualizará la configuración específica de los parámetros del receptor, enfocándose particularmente en la altura seleccionada, la cual se estableció en un rango superior al tamaño promedio del ser humano, aproximadamente alrededor de 2 metros. Este detalle gráfico proporcionará una representación clara de cómo se han ajustado los parámetros del receptor en el modelo de propagación de la señal para el área del puerto del Callao. La figura servirá como una referencia visual clave para ilustrar la influencia de estos parámetros en el análisis de cobertura y contribuirá a la comprensión detallada de la metodología implementada.

The screenshot shows a software window titled "Tx/Rx parameters: 1 orphan" with a close button (X) in the top right corner. Below the title bar is a tabbed interface with tabs for "General", "Patterns", "Channels", "Site", and "gNB". The "gNB" tab is selected.

At the top of the "gNB" tab, there are four dropdown menus: "Type (0)" set to "Tx/Rx A (0)", "Signal (103)" set to "5G FDD (103)", "Modulation (10)" set to "256-QAM (10)", and "NFD / TS-RIF" with a dropdown arrow. To the right of these is a gear icon.

The main area is divided into several sections:

- Threshold:** Contains input fields for "Cov. threshold (dBu)" (78), "Rx threshold (dBu)" (53) with an "upd..." button, "RS threshold (dBm)" (0), "KTBF (dBm)" (-89) with a "calc..." button, "Launch delay (us)" (0), and "C/I req N=0/N=1" (9.0 / 1.0).
- Traffic:** Contains input fields for "Mean DL UE (kbps)" (538710.50), "Mean UL UE (kbps)" (591267.62) with a "<" button, "Tx bandwidth (kHz)" (100000.00), and "Rx bandwidth (kHz)" (100000.00).
- Options:** Contains input fields for "Floor offset" (0), "Handover" (0) dB, "Neighbour list" (empty), "RSI" (empty), "PHY_CELL_ID" (0), "PCIMODn" (0), "Activity UL" (100) %, and "Activity DL" (100) %.
- Power channel settings:** Contains input fields for "% SS/PBCH" (18.000), "% xPDSCH" (82.000), and "DL/UL ratio (pc)" (100.00).
- Numerology:** Contains a list of radio bearers (RBs) with radio bearers (RBs) and a selected option (3: 120 kHz - 20 to 275 RBs). Other options include 0: 15 kHz - 20 to 275 RBs, 1: 30 kHz - 20 to 275 RBs, 2: 60 kHz - 20 to 275 RBs, 4: 240 kHz - 20 to 138 RBs, and 5: 480 kHz - 20 to 69 RBs. Below this are input fields for "RB" (66) and "SC" (792).

At the bottom right, there are "Aceptar" and "Cancelar" buttons.

Figura 26: Parámetros de numerología – gnb..Fuente: HTZ Communications

En la fase de diseño, se seleccionó un subportadora de 120 kHz debido a su capacidad para mejorar la eficiencia espectral. Esta elección específica contribuye a una mayor densidad de usuarios y una transmisión de datos más eficiente en el espectro asignado, optimizando así el rendimiento general de la red 5G.

HTZ calcula el RSRP de acuerdo con la cartografía seleccionada. Para el análisis de cobertura se visualiza la paleta de colores. La paleta es la barra inferior de colores que nos facilita la visualización y análisis de resultados según el mapa que se visualiza en el área de trabajo. El valor de los colores y las unidades dependen del nivel de intensidad.

5.1.1 Escenario para transmisor (macrocélula) 15 Watts – antena omnidireccional

En el punto medible perteneciente al puerto del Callao dentro de la cartografía DEM, los parámetros RSRP Y SNIR no se encuentran dentro de los valores óptimos. De esta manera buscamos los valores dentro de la discrepancia, factores como variaciones en la propagación de la señal o limitaciones en la instrumentación podrían haber incluido. Esta divergencia nos insta a recalibrar nuestras perspectivas iniciales y a reinterpretar el impacto de aplicar 15 Watts, entendiendo que la aplicación es un proceso dinámico, aplicaremos otros valores de potencias para los otros casos además la identificación de otras áreas para mejoras o ajustes. A pesar de que los resultados no cumplen con la expectativa, se resumen en lo siguiente:

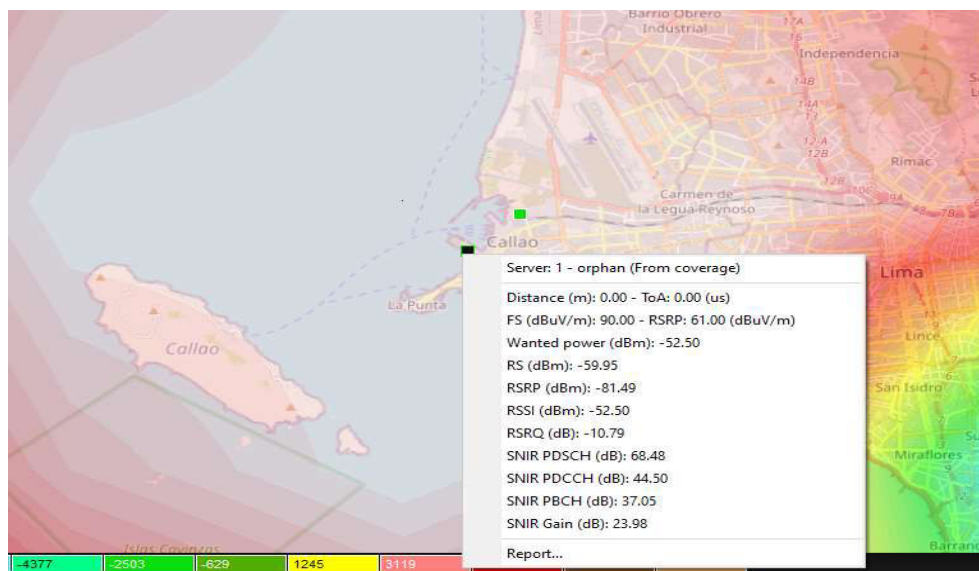


Figura 27: Mapa de cobertura 5G – KPI's encontrados para antena omnidireccional 15 watts. Fuente: HTZ Communications

Tabla 10

Kpi Encontrados Escenario 1 – Macro célula Transmisor 15 Watts

Parámetro	VALOR
RSSI	-52.50

Parámetro	VALOR
RSRP	-81.49
SNIR	68.48

Los KPIs identificados no cumplen con los parámetros óptimos según la tabla 5 de la presente tesis, indicando posibles áreas de mejora en el rendimiento del sistema o proceso. Ajustar y optimizar estos indicadores es esencial para alinear el desempeño con los objetivos establecidos y mejorar la eficiencia general.

5.1.2 Escenario 20 watts transmisor – macrocélula-antena omnidireccional

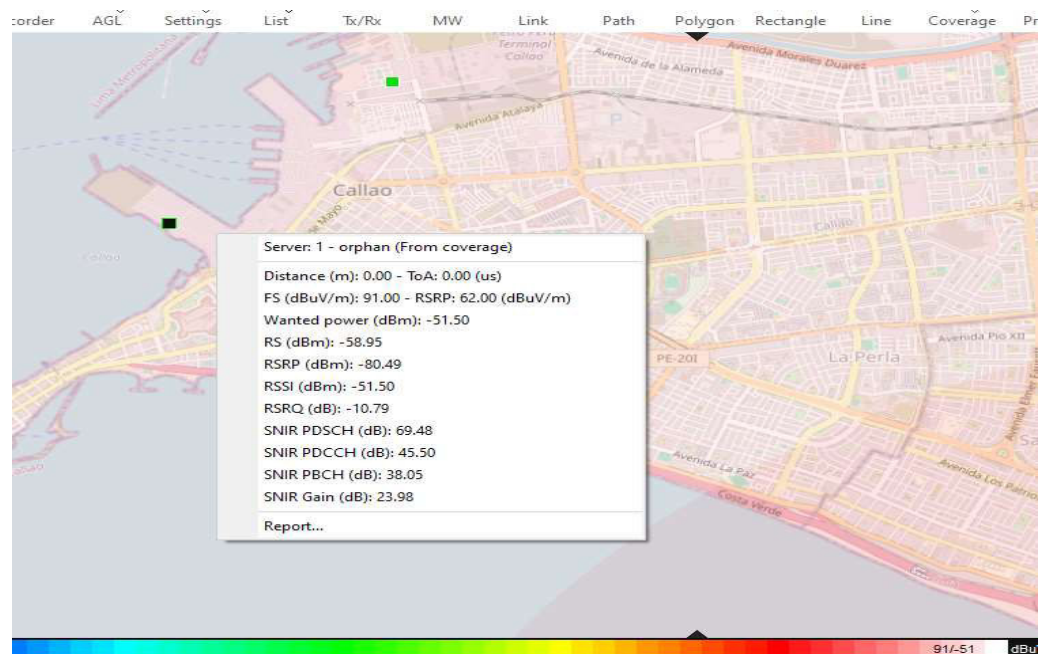


Figura 28: Mapa de cobertura 5G – KPI's encontrados para antena omnidireccional 20 watts. Fuente: HTZ Communications.

Para el caso de la aplicación de 20 watts en el transmisor de la macrocélula se obtiene el mapa de cobertura como en la figura al, observamos resultados similares que el caso anterior. En el presente caso los resultados son no conformes debido a que no se encuentran dentro de los valores óptimos En este contexto, los resultados son discordantes, ya que no se sitúan dentro de los rangos óptimos, resumiéndose con los siguientes valores:

Tabla 11

Kpi Encontrados Escenario 1 - Transmisor 20 Watts

Parámetro	VALOR
RSSI	-51.50
RSRP	-80.49
SNIR	69.48

Fuente: HTZ Communications.

Los indicadores clave de rendimiento (KPIs) hallados no se alinean con los parámetros óptimos establecidos en la tabla 5 de la presente tesis, señalando posibles deficiencias en el rendimiento del sistema o proceso. Identificar estas discrepancias es esencial para iniciar acciones correctivas y mejorar la eficacia operativa.

5.1.4 Escenario 25 watts transmisor – macrocélula-antena

En este escenario, se utiliza un transmisor de 25 watts para la transmisión de señales de comunicación dentro de una macrocélula, que representa la cobertura amplia del puerto. La antena facilita la transmisión y recepción de señales entre el transmisor y los dispositivos receptores en el área del puerto, ya sea en buques o en instalaciones terrestres. Esta configuración es común en redes de telecomunicaciones portuarias, garantizando una cobertura eficiente y confiable para las necesidades de comunicación en el entorno marítimo

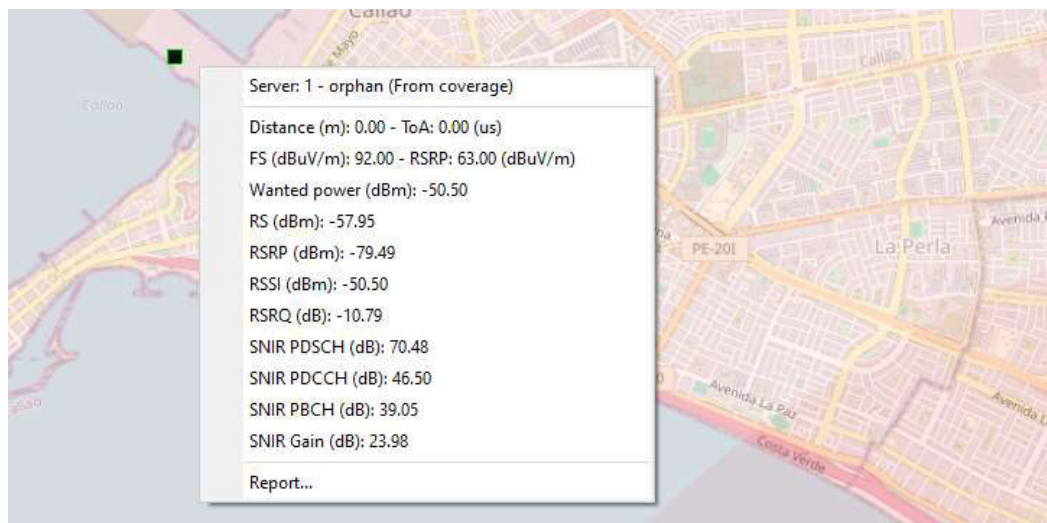


Figura 29: Mapa de cobertura 5G – KPI's encontrados para antena omnidireccional 25 watts. Fuente: Fuente: HTZ Communications

Tabla 12

Kpi Encontrados Escenario 1 - Transmisor 25 Watts

Parámetro	VALOR
RSSI	-50.50
RSRP	-79.49
SNIR	70.48

Fuente: HTZ Communications

Los KPIs identificados en la tabla 12 cumplen con los parámetros óptimos según la tabla 5 de la presente tesis, indicando posibles áreas de mejora en el rendimiento del sistema o proceso. Ajustar y optimizar estos indicadores es esencial para alinear el desempeño con los objetivos establecidos y mejorar la eficiencia general.

5.1.5 Escenario para 15 watts – antena omnidireccional con ganancia 12 dbi

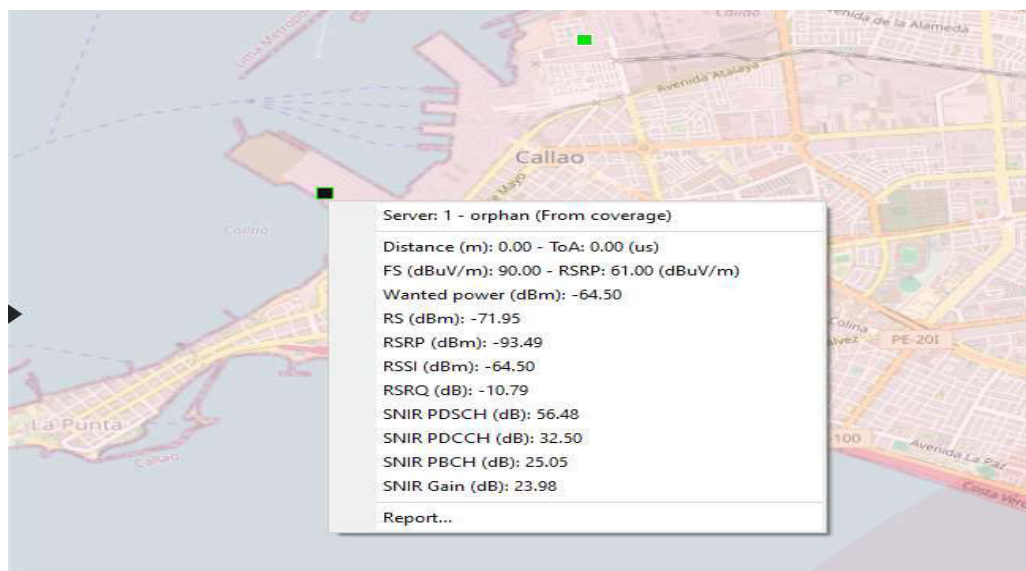


Figura 30:. Mapa de cobertura 5G – KPI's encontrados para antena omnidireccional 15 watts. Fuente: HTZ Communications.

Tabla 13

KPI Encontrados Escenario 1 -Ganancia 12 dbi- Antena Omnidireccional transmisor 15 WATTS.

Parámetro	VALOR
RSSI	-64.50
RSRP	-93.49
SNIR	56.48

Fuente: HTZ Communications.

5.2 Análisis de radiaciones no ionizantes

La determinación de la densidad eléctrica se llevó a cabo mediante la aplicación de la fórmula que incorpora la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP), un parámetro crucial en la evaluación de la propagación de ondas electromagnéticas. La EIRP, que refleja la potencia total radiada por una antena en una dirección específica, fue integrada en la fórmula de densidad eléctrica para obtener una descripción precisa de la distribución espacial de la energía electromagnética.

La formulación elegida incorpora la complejidad inherente de la EIRP, considerando no solo la magnitud de la potencia radiada, sino también su distribución angular. Este enfoque proporciona una representación más completa y matizada de la densidad eléctrica resultante, permitiendo una evaluación más precisa de los patrones de exposición.

La implementación de esta fórmula refinada se alinea con los estándares actuales en la evaluación de riesgos electromagnéticos y destaca la atención a la precisión y la sofisticación metodológica en la caracterización de los campos electromagnéticos en el entorno de interés

$$S = \frac{Gtx.Ptx}{4 * \pi * d^2} = \frac{EIRP}{4 * \pi * d^2} = \frac{4000 \text{ Watts}}{4 * \pi * d^2}$$

Se analizará para dos casos

a) Según los niveles de referencia para exposición ocupacional mencionada en la tabla 3 de la presente tesis

$$\frac{4000 \text{ Watts}}{4 * \pi * d^2} \leq 50 \frac{W}{m^2}$$

$$2.525 \text{ m} \leq d$$

b) Según los niveles de referencia para exposición poblacional mencionada en la tabla 4 de la presente tesis

$$\frac{4000 \text{ Watts}}{4 * \pi * d^2} \leq 10 \frac{W}{m^2}$$

$$5.643 \text{ m} \leq d$$

Una distancia mayor a 2.525 metros indica que, a partir de esa distancia, los niveles de radiación no ionizante generados por una fuente están por debajo de los límites establecidos para proteger la salud de los trabajadores ocupacionalmente expuestos.

Una distancia mayor a 5.643 metros indica que, a partir de esa distancia, los niveles de radiación no ionizante generados por una fuente, como una antena,

están por debajo de los límites establecidos por las pautas de la ICNIRP para proteger la salud de la población general.

CAPITULO VI. DISCUSIÓN

En mi tesis, investigué la cobertura de una antena omnidireccional con una potencia específica e identifiqué niveles óptimos en varios lugares del mapa. Sin embargo, mediante el uso de antenas con beamforming y la configuración adecuada de parámetros, logré alcanzar niveles óptimos especialmente en las ubicaciones estratégicas para la implementación de la tecnología 5G para esta ocasión el Puerto del Callao.

Además, según (CABRERA, 2021) sugiere que podrían mejorar los niveles óptimos de señal mediante la creación de microcélulas, picocélulas y femtocélulas en lugar de depender únicamente de antenas omnidireccionales.

Tabla 14

Parámetros de Simulación de la (Tx1) – Microcélula

PARÁMETRO	VALOR	
SEÑAL	FDD	
FRECUENCIA	29100 MHZ	
TAMAÑO DE LA ANTENA	25 m	
MODULACIÓN	256 QAM	
TX	0.5 W	
ARRAYS T/R	16/16	
LAYERS		8
TIPO DE CONFIGURACIÓN DE ANTENA		
GANANCIA DE ANTENA TX	12 dBi	
E.I.R.P.	197.1742	
FRECUENCIA	29100 MHZ	
ANCHO DE BANDA DE TX	50000 Khz	
ANCHO DE BANDA DE RX	50000 Khz	
ÁREA	URBANA	
COV THRESHOLD	75 dBu	

PARÁMETRO	VALOR
RX THRESHOLD	71 dBu
% Ref señal	7.576
% PDSCH	92.424
Numerología	120 Khzm 20 a 275 RBs

Fuente: elaboración propia.

Tras la correcta ubicación de nuestras microcélulas, realizaremos un análisis de interferencia. Para ello, seleccionamos el informe de cobertura e interferencia, enfocándonos en comprender los criterios de protección contra interferencias, aspecto fundamental para el desarrollo efectivo de nuestro proyecto

Se calcularán los mapas de SNIR (Relación Señal a Interferencia más Ruido). Luego, procederemos con el análisis de throughput, seleccionando el número de capas y permitiendo que el software realice el cálculo, tomando en cuenta las pérdidas por implementación y aplicando el teorema de Shannon para obtener una evaluación integral.

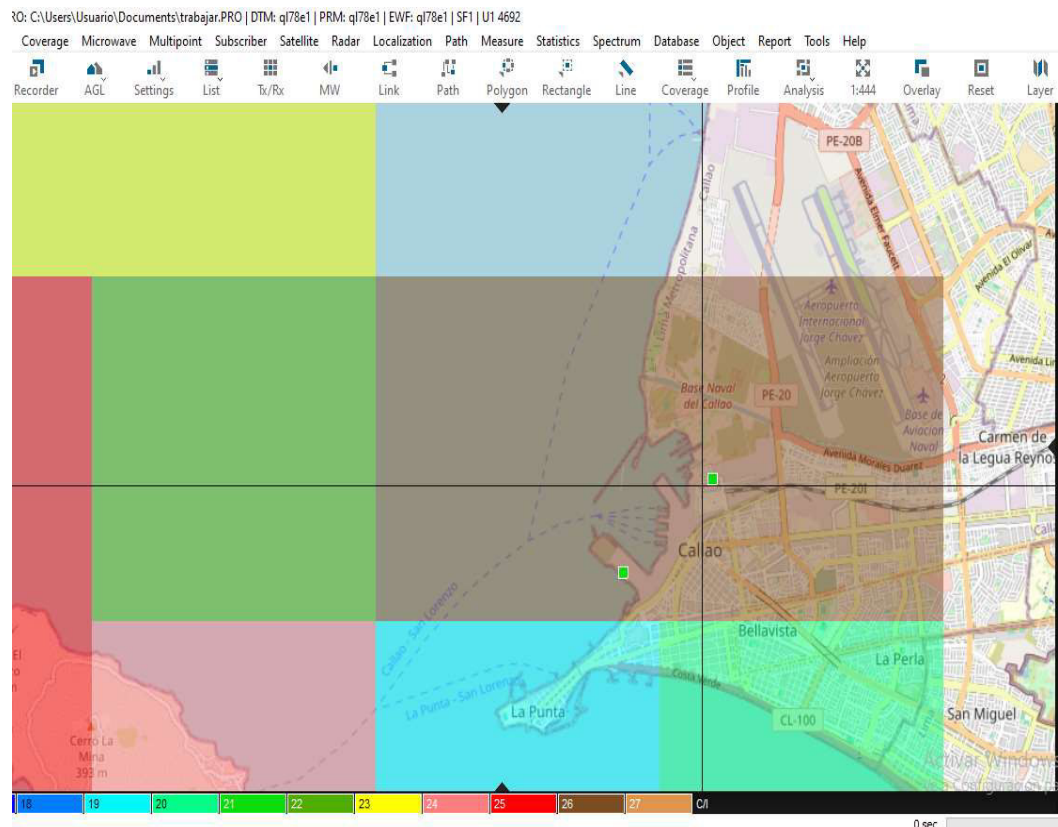


Figura 31: Análisis de C/I.Fuente: HTZ Communications.**Tabla 15**

Análisis del Criterio de Protección

Wanted Freq (MHz)	Polar r	Interfer er	#	Unwanted Cx	C/I req. (dB)	Pc interf.
29100	V		2	1	6	34.815
29100	V		1	1	5	27.672

Fuente: HTZ Communications.

Después de analizar la tabla 15 de la presente tesis se concluye que el porcentaje de interferencia al evaluar la cobertura de la microcélula y la macrocélula se sitúa dentro de los rangos óptimos según el criterio de protección establecido por la NTIA (≤ 9 db). Este resultado sugiere que, en términos de interferencia, ambas células cumplen con los estándares deseados o definidos, lo que contribuye a la eficiencia y calidad del servicio. Mantener la interferencia en estos rangos óptimos es crucial para garantizar un rendimiento adecuado en el sistema de comunicación, minimizando posibles interferencias negativas entre las células.

Attenuated and truncated form of the Shannon bound

Implementation losses

	DL	UL
Attenuation factor (a)	0.600	0.550
Max bits/Hz	8.00	6.00
Layers	auto	16

Throughput (bps/Hz) = a.S(SNIR).Layer(s)
 $S(SNIR) = \log_2(1+SNIR)$ bps/Hz
a = implementation losses

Modulation	Bits/Hertz	Modulation	Bits/Hertz
QPSK	2	64 QAM	6
8 QAM	3	128 QAM	7
16 QAM	4	256 QAM	8
32 QAM	5	1024 QAM	10

Figura 32: Cálculo de atenuación Shannon-Bound. Fuente: HTZ Communications.

Al aplicar una potencia de 35 vatios al transmisor principal, y manteniendo los valores RSRP y SNIR, dentro del rango óptimo además aplicando la configuración como se muestra en la figura, se obtiene un throughput de 2957 Mbps como se muestra en la otra figura. Cabe resaltar que la configuración de la antena de la macrocélula es como en la figura, resultando la eficiencia espectral de 30 bits/segundo/Hertz, cumpliendo más de 6 veces los criterios de **LTE-A(Release-10)**

Se desplegaron microcélulas con el propósito de evaluar el criterio de protección, considerando la implementación de microcélulas en nuestra propuesta de red heterogénea. Esta adición permite mejorar el realismo del entorno, respaldada por el uso de software para la planificación y gestión de la red. Esto se podría mejorar utilizando una cartografía precisa para calcular las pérdidas con mayor exactitud, por ejemplo, pérdidas por clutter, resultando:

Por otro lado, al hacer un análisis de interferencia con los criterios de protección para la creación de una macrocélula en el puerto del Callao y la macrocélula donde se halló la cobertura, resulta con los siguientes datos técnicos de la tabla, encontrándose dentro de los límites de aceptación lo que conlleva a afirmar que en caso haya pérdida de la señal se puede crear una microcélula con una antena de recepción de 2 metros.

Esta estrategia no solo refuerza la robustez de nuestra propuesta de red heterogénea, sino que también sugiere la capacidad de respuesta y adaptabilidad del sistema ante posibles escenarios de pérdida de señal, reforzando así la eficacia general de la red en términos de calidad de servicio y continuidad operativa.

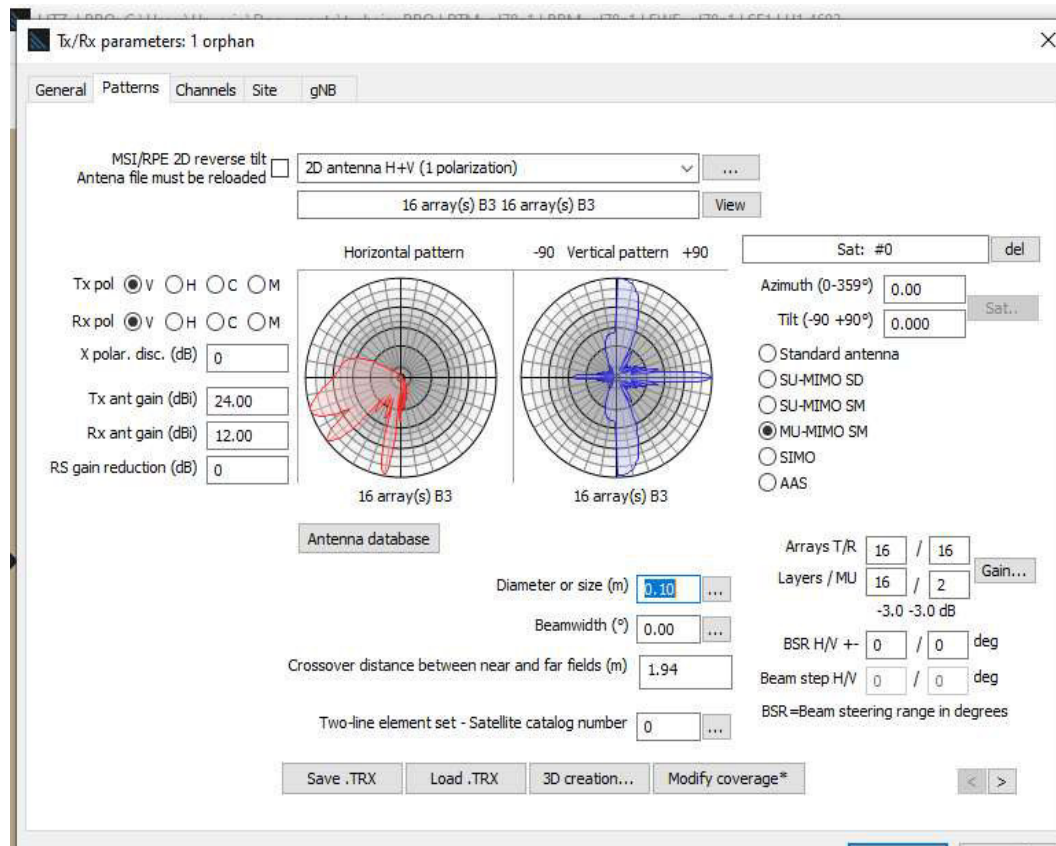


Figura 33. *Parámetros de transmisor – capas.* Fuente: HTZ Communications.

En la metodología de mi tesis, la implementación de sistemas MIMO se aborda considerando detalladamente la configuración específica de 16 transmisores y 16 receptores, como se indica en la figura 33 de la presente tesis. Esta elección específica de configuración es fundamental para evaluar el rendimiento y la eficiencia de los sistemas MIMO en el contexto de mi investigación. Además, se contempla un número específico de capas (layers) en los parámetros de antena, lo que añade una dimensión adicional a la complejidad del sistema.

Por otro lado, se destaca que en el software utilizado se tiene la capacidad de seleccionar las antenas activas en la configuración del sistema MIMO. La elección específica de antenas activas es un componente esencial en la investigación, y aunque en este momento no se precisa la razón precisa para

esta elección, se contempla explorar y justificar detalladamente durante el proceso experimental. Esta flexibilidad en el software proporciona la oportunidad de analizar cómo la inclusión de antenas activas dentro de la configuración MIMO afecta los resultados y el rendimiento del sistema. La elección de antenas activas puede tener implicaciones en la amplificación de señales, la dirección de transmisión y otros aspectos críticos del sistema. La metodología se enfocará en aprovechar esta capacidad del software para realizar experimentos específicos y evaluaciones que arrojen luz sobre los beneficios y desafíos asociados con la selección de antenas activas en sistemas MIMO. Estos experimentos proporcionarán una comprensión más profunda de cómo las decisiones de diseño impactan en el funcionamiento y la eficiencia del sistema MIMO, contribuyendo al avance del estudio en este campo.

En el contexto de la metodología de la tesis, se destaca el análisis del throughput 5G utilizando el software HTZ Communications como un componente esencial de la investigación. El throughput, que representa la cantidad de datos transferidos con éxito a través de la red, es un indicador crítico del rendimiento y la eficiencia del sistema 5G. Al realizar este análisis con el software HTZ Communications, se busca comprender cómo el sistema 5G maneja el flujo de datos bajo diferentes condiciones de red y escenarios de uso. Este enfoque permitirá identificar áreas de optimización para garantizar un despliegue efectivo de la tecnología 5G en diversos entornos y aplicaciones. Es esencial subrayar que en el análisis del rendimiento de la red 5G, también se consideran elementos como el RSRP (Potencia de Señal de Referencia del Recorrido) y el SNIR (Relación Señal a Interferencia más Ruido). Estos parámetros juegan un papel fundamental para comprender y mejorar la eficiencia de la red. Proporcionan una evaluación holística de la calidad de la señal y la eficacia de la comunicación en el sistema 5G, lo cual complementa el análisis del throughput. Su estudio detallado permite una optimización más precisa de la red, garantizando un rendimiento óptimo y una experiencia de usuario satisfactoria en entornos 5G.

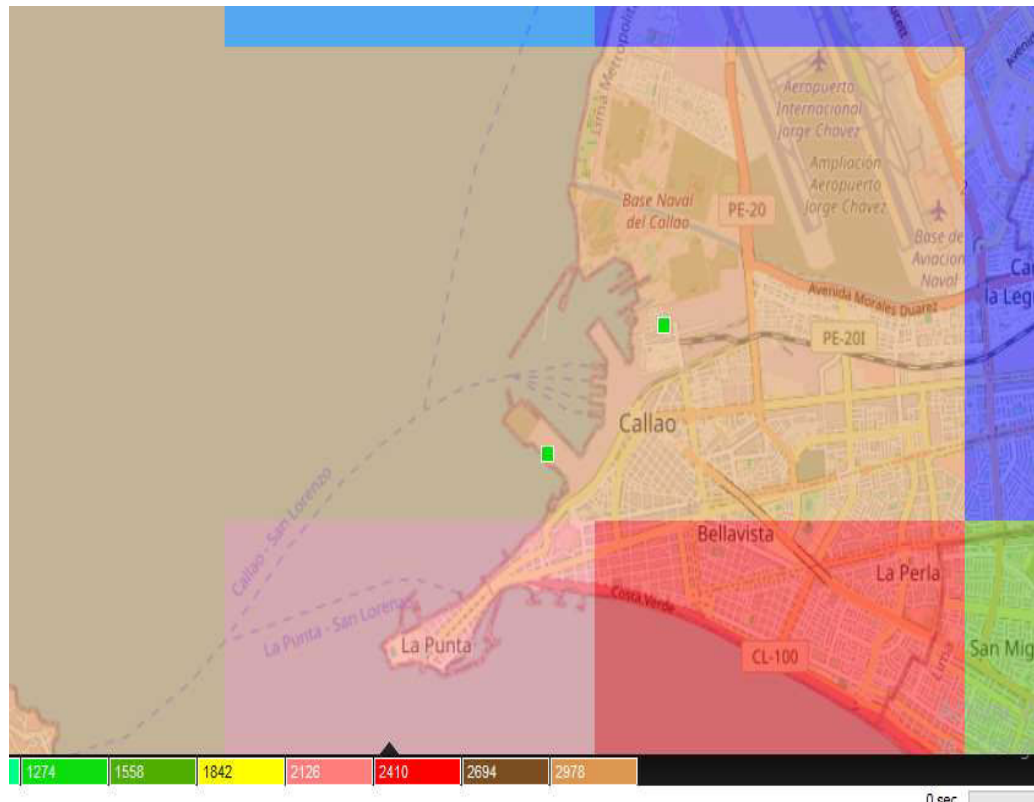


Figura 34. Análisis de throughput. Fuente: HTZ Communications.

La figura 34 de la presente tesis en su representación, destaca un área específica coloreada en tono marrón, denotando un impresionante valor de throughput de 2978 Mbps. Este resultado se obtuvo tras una meticulosa evaluación utilizando los mapas de throughput, los cuales se basan en el teorema de Shannon. Este teorema, reconocido en el ámbito de las telecomunicaciones, establece el límite teórico máximo de la tasa de transmisión de información en un canal de comunicación. Por ende, el valor de 2978 Mbps revela la capacidad óptima de transmisión de datos, conforme a los principios fundamentales establecidos por Shannon, dentro del contexto analizado. Tal evidencia no solo subraya la eficiencia del sistema, sino que también proporciona una perspectiva esencial para la optimización y mejora continua de la infraestructura de comunicaciones.

6.1 Análisis de eficiencia espectral

5g-tools.com/spectral-efficiency-5g-nr-calculator/

SPECTRAL EFFICIENCY 5G NR CALCULATOR

Spectral Efficiency 5G NR (bits/second/Hz): **30**

INPUT DATA

5G NR Throughput, Mbps
2980

Information:
You can get 5G NR Throughput from our [5G NR Throughput calculator](#)

BW(i) - band Bandwidth, MHz (3GPP 38.104), should be selected with Frequency Range and $\mu(i)$ configuration:

☐ BW:5MHz FR1 μ :15kHz
 ☐ BW:10MHz FR1 μ :15kHz
 ☐ BW:15MHz FR1 μ :15kHz
 ☐ BW:20MHz FR1 μ :15kHz
☐ BW:25MHz FR1 μ :15kHz
 ☐ BW:30MHz FR1 μ :15kHz
 ☐ BW:40MHz FR1 μ :15kHz
 ☐ BW:50MHz FR1 μ :15kHz
☐ BW:5MHz FR1 μ :30kHz
 ☐ BW:10MHz FR1 μ :30kHz
 ☐ BW:15MHz FR1 μ :30kHz
 ☐ BW:20MHz FR1 μ :30kHz
☐ BW:25MHz FR1 μ :30kHz
 ☐ BW:30MHz FR1 μ :30kHz
 ☐ BW:40MHz FR1 μ :30kHz
 ☐ BW:50MHz FR1 μ :30kHz
☐ BW:60MHz FR1 μ :30kHz
 ☐ BW:70MHz FR1 μ :30kHz
 ☐ BW:80MHz FR1 μ :30kHz
 ☐ BW:90MHz FR1 μ :30kHz
☐ BW:100MHz FR1 μ :30kHz
 ☐ BW:10MHz FR1 μ :60kHz
 ☐ BW:15MHz FR1 μ :60kHz
 ☐ BW:20MHz FR1 μ :60kHz
☐ BW:25MHz FR1 μ :60kHz
 ☐ BW:30MHz FR1 μ :60kHz
 ☐ BW:40MHz FR1 μ :60kHz
 ☐ BW:50MHz FR1 μ :60kHz
☐ BW:60MHz FR1 μ :60kHz
 ☐ BW:70MHz FR1 μ :60kHz
 ☐ BW:80MHz FR1 μ :60kHz
 ☐ BW:90MHz FR1 μ :60kHz
☐ BW:100MHz FR1 μ :60kHz
 ☐ BW:50MHz FR2 μ :60kHz
 ☐ BW:100MHz FR2 μ :60kHz
 ☐ BW:200MHz FR2 μ :60kHz
☐ BW:50MHz FR2 μ :120kHz
☒ BW:100MHz FR2 μ :120kHz
 ☐ BW:200MHz FR2 μ :120kHz
☐ BW:400MHz FR2 μ :120kHz

RESULT

Calculated 5G NR Throughput, Mbps
2980

Channel (Band) Bandwidth, Mhz
100MHz

Spectral Efficiency 5G NR (bits/second/Hz)
30

Figura 35: Cálculo de la eficiencia espectral. Fuente: www.5gtools.com.

Según los resultados obtenidos en el análisis realizado mediante la página de cálculo www.5gtools.com., se determinó que, al elegir el ancho de banda y la subportadora específica, se logró una eficiencia espectral de 30 bits. Una eficiencia espectral de 30 bits por segundo por Hertz (bit/s/Hz) indica una capacidad de transmisión de datos relativamente alta. Sin embargo, la suficiencia de este valor depende del contexto y de las aplicaciones específicas que se están considerando en una red 5G. En general, una alta eficiencia espectral es positiva, ya que significa que se puede transmitir más información en un ancho de banda determinado tal como se muestra en la tabla N°1 de la presente tesis. Esto es beneficioso para admitir aplicaciones que requieren velocidades de datos elevadas, como transmisión de video de alta definición, realidad virtual, juegos en línea, entre otros. Sin embargo, la

adecuación de 30 bit/s/Hz dependerá de la carga de la red, el número de dispositivos conectados, la densidad de usuarios y las expectativas de rendimiento para aplicaciones específicas. En algunos casos, podrían necesitarse eficiencias espectrales aún mayores para satisfacer las demandas específicas de una red 5G en evolución. En resumen, aunque 20 bit/s/Hz es un buen indicador, la evaluación completa de la suficiencia dependerá de varios factores y requisitos específicos de la red y las aplicaciones.

6.2 Análisis económico

Según (CABRERA, 2021), analiza los siguientes cinco escenarios de Tasa de bits por usuarios para la red 5G tanto en Smallcells como Microcells, donde se obtiene los siguientes resultados de costo total de implementación para cada casuística, como se detalla en la Tabla 16 de la presente tesis

El análisis económico es fundamental en este estudio debido a la relación entre los costos de despliegue de celdas y el bit rate. En una red heterogénea, donde las características y demandas varían entre distintas áreas geográficas, el análisis económico se vuelve aún más relevante y facilita la determinación de los costos aproximados para los datos obtenidos. Es crucial para evaluar cuántas celdas son necesarias en cada área, considerando factores como la densidad de población, el tráfico de datos y la infraestructura existente. Este análisis proporciona una base sólida para tomar decisiones informadas sobre el despliegue de celdas, optimizando así la eficiencia y la rentabilidad de la red heterogénea. Cabe destacar que el costo aproximado se encontró en una tesis previa, lo que valida aún más su utilidad y relevancia para este estudio. Los costos obtenidos a través de este análisis pueden servir como una valiosa referencia para futuros estudios y proyectos relacionados con el despliegue de las redes heterogéneas. Al integrar los costos estimados con la planificación utilizando software HTZ Communications, se pueden optimizar aún más los recursos, tomando decisiones más precisas sobre la ubicación y configuración de las celdas.

Tabla 16

Costo de Implementación de Radio Bases 5G en función de la Tasa de Bits y Tamaño de Celda

Bit rate (Mb/s)	Número de BS Smallcells 5G	Costo final small cells 5G (USD)	Número de BS Microcells 5G	Costo final microcells 5G (USD)
200	270	\$6848128.41	540	\$8459688.41
400	324	\$8217754.09	605	\$9477984.24
600	378	\$9587379.77	650	\$10182958.27
800	432	\$10957005.4	695	\$10887932.30
1000	490	\$12428084.8	710	\$11122923.65

Fuente: (CABRERA, 2021)

Considerando una relación lineal para un total de 2978 Mbps, la estimación de celdas se obtiene al dividir el bit rate del sistema entre los valores: 200 Mbps, 400 Mbps, 600 Mbps, 800 Mbps y 1000 Mbps. Esta estimación se tomó como referencia la tabla 16 de la presente tesis..

Destacó que mediante esta división se calculó el número de small cells o microcélulas necesarias para cada escenario. Los costos estimados para la implementación son los siguientes:

- Para un bit rate de 200 Mbps:
- 15 small cells: \$380,451.578 - 15 microcells: \$234,991.345
- Para un bit rate de 400 Mbps:
- 7 small cells: \$177,544.07 - 7 microcells: \$109,662.628
- Para un bit rate de 600 Mbps:
- 5 small cells: \$126,817.193 - 5 microcells: \$783,330.4462

- Para un bit rate de 800 Mbps:
- 4 small cells: \$101,453.754 - 4 microcells: \$67,002.6603
- Para un bit rate de 1000 Mbps: - 3 small cells: \$76,090.3151 - 3 microcells: \$46,998.2687.

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES

1. La propuesta se sustenta en un conocimiento sólido de los principios y características fundamentales de la tecnología 5G. Esto incluye comprender las capacidades de alta velocidad, baja latencia y mayor capacidad de conexión que 5G ofrece.
2. El software modela las pérdidas de propagación para diversas frecuencias, incluyendo la de 29.1 GHz, proporcionando una evaluación precisa de las condiciones de propagación en entornos portuarios y fortaleciendo nuestro análisis
3. "En nuestro análisis se ha beneficiado significativamente del uso de Modelos Digitales de Elevación (DEM) sin embargo el uso de otros tipos de cartografía nos daría resultados más precisos. Esta limitación no ha mermado la calidad de nuestro estudio; por el contrario, hemos logrado realizar un análisis preciso y valioso de los parámetros relevantes para la optimización de la red, aprovechando la información os datos DEM. Este enfoque alternativo ha permitido obtener resultados significativos y valiosos para la mejora de la red de comunicaciones inalámbricas en nuestro entorno de estudio."
4. Al explorar todas las funcionalidades del software, podríamos manejar de manera más eficiente nuestro espectro radioeléctrico, con mejoras notables en el throughput, la interferencia y el RSRP.
5. Es importante destacar que, a pesar de no haber usar todas las funcionalidades del software, se logró un nivel de optimización con resultados significativos en nuestra propuesta de red heterogénea.
6. La comprensión de frecuencias libres y el estado de la banda estudiada es crucial, como resalta nuestro trabajo. Este conocimiento no solo orienta decisiones de implementación en redes 5G, sino que también asegura una gestión eficiente del espectro, destacando la importancia de la planificación estratégica en entornos portuarios

7. La aplicación de Athens Beamforming junto con la configuración precisa de los parámetros de transmisor y criterios de separación de antenas ha mejorado significativamente la direccionalidad de la señal en la banda de 29.1 GHz. Esta optimización respalda de manera sólida los criterios de interferencia, destacando la eficacia de esta combinación en entornos portuarios para el despliegue exitoso de redes heterogéneas 5G.
8. La realización de análisis de radiaciones no ionizantes es esencial en despliegues de redes heterogéneas 5G, como evidenciamos en nuestro estudio en el puerto del Callao. Esta evaluación no solo garantiza la seguridad, sino que también destaca la necesidad de abordar de manera integral los aspectos ambientales y de salud pública en la implementación de tecnologías avanzadas
9. En la tesis presentada, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de la eficiencia espectral, abordando aspectos relevantes para la evaluación y optimización del rendimiento de la red propuesta. Este análisis se determinó que, al elegir el ancho de banda y subportadora específica se puede lograr posibles mejoras para maximizar la eficiencia espectral de la red.
10. En la investigación presentada, se realizó un análisis económico sobre el despliegue de celdas los. Los resultados de este análisis proporcionaron información importante para tomar decisiones sobre la implementación y gestión de la red propuesta.
11. Se logró plenamente el objetivo principal con la topología propuesta en la metodología. La implementación exitosa respalda la eficacia de nuestro enfoque en la mejora de las redes heterogéneas 5G, destacando su aplicabilidad en entornos como el puerto del Callao
12. Los objetivos específicos se alcanzaron mediante un estudio detallado de parámetros, ajustándolos hasta encontrar el óptimo a través del análisis del software. Este enfoque demostró ser efectivo para optimizar las redes heterogéneas 5G en el entorno portuario del Callao.

CAPÍTULO VIII RECOMENDACIONES

- En este contexto, resaltamos la importancia del software HTZ Communications, fundamental para el modelado de pérdidas de propagación y el análisis detallado de frecuencias, especialmente en nuestro caso específico con la frecuencia de 29.1 GHz. Recomendamos su continua utilización para mantener la precisión y fiabilidad en la planificación y optimización de redes heterogéneas 5G en entornos portuarios.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdulrazak, L. F. (2018). *Literature Review. Coexistence of IMT-Advanced Systems for Spectrum Sharing with FSS Receivers in C-Band and Extended C-Band*, 9–41. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70588-0_2
- Advanced Antenna Systems for 5G - 5G Americas. (n.d.). Retrieved September 27, 2023, from <https://www.5gamericas.org/advanced-antenna-systems-for-5g/>
- Ai, N., Wu, B., Li, B., & Zhao, Z. (2021). 5G heterogeneous network selection and resource allocation optimization based on cuckoo search algorithm. *Computer Communications*, 168, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.12.026>
- Anzola, M. F. (2020, 3 agosto). *Del 1G al 5G: la evolución de las redes móviles tras el cambio de generación* | DPL News. DPL News. <https://dplnews.com/del-1g-al-5g-la-evolucion-de-las-redes-moviles-tras-el-cambio-de-generacion/>
- Alexis, B. U. (2017). *Uso del espectro radioeléctrico en redes móviles 5G*. <https://repositorio.unisucre.edu.co/handle/001/942>
- Band N257 | 5G-NR Frequency Band - Everything RF. (s. f.). <https://www.everythingrf.com/tech-resources/5g-nr-frequency-bands/5G-NR-Band-n257>
- Boiarynov, S. (2023). Zyxel Networks. Obtenido de <https://support.zyxel.eu/hc/es/articles/360005188999-Calidad-de-la-se%C3%B1al-LTE-5G-Par%C3%A1metros-de-calidad-de-la-se%C3%B1al-LTE-y-5G>
- CABRERA, R. F. (2021). *ANÁLISIS Y ESTUDIO DE UN FRONTHAULING ÓPTICO PARA REDES 5G BASADO EN MICRO-CELDA COMPARANDO SU RENDIMIENTO Y COSTO CON LA RED TRADICIONAL 4G BASADO EN CPRI. QUITO.*
- Lei, W., Soong, A. C. K., Jianghua, L., Yong, W., Classon, B., Xiao, W., Mazzaresse,

- D., Yang, Z., & Saboorian, T. (2019). 5G system design: An end to end perspective. *5G System Design: An End to End Perspective*, 1–393. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22236-9/COVER>
- Luque Quispe, J. M. (2020). *Simulación y evaluación de los modelos de pérdidas de propagación de gran escala en entornos urbano-densos para la red de comunicaciones móviles de quinta generación (5G) para las bandas de 28 y 73GHz*. Repositorio de Tesis - UNMSM. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/15994>
- López-Aguilera, E., & Garcia-Villegas, E. (2022). Joint access-backhaul mechanisms in 5G cell-less architectures. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*. <https://www.tdx.cat/handle/10803/674348>
- Lutnaes, C. (2020). *Beamforming in 5G mm-wave radionetworks: Importance of frequency multiplexing for users in urban macro environments*. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-406129>
- Miguel Aliende García Director Gerson Villalba Arana Ponente Arturo Mediano Heredia, A. (2020). *ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES Mathematical beamforming of radiation patterns of 5G antennas*.
- Mobilizing 5G NR Millimeter Wave: Network Coverage Simulation Studies for Global Cities*. (2017).
- More, J., & Argandoña, D. (2019). *Estado del espectro radioeléctrico en el Perú y recomendaciones para promover su uso en nuevas tecnologías*. Documento de Trabajo No 43. Repositorio Institucional OSIPTEL. <https://repositorio.osiptel.gob.pe/xmlui/handle/20.500.12630/390>
- Modelo de propagación terrenal de gran alcance polivalente en la gama de frecuencias de 30 MHz a 50 GHz*. (n.d.). Retrieved December 14, 2023, from <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.2001-4-202109-S/es>
- International commission on non-ionizing radiation protection icnirp guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 KHZ TO 300 GHZ)*. (2020). <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>
- Quintero, A. G., Santamaría, C. G., & Reyes, R. C. H. (2006). Modelos de canal inalámbricos y su aplicación al diseño de redes WiMAX. *Sistemas & Telemática*, 4(8), 13–33. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=411534375001>
- Redacción. (2021, 21 noviembre). *GSMA anuncia la creación de una iniciativa de aceleración de ondas milimétricas 5G*. *Marketing Insider Review*. <https://marketinginsiderreview.com/gsma-aceleracion-ondas-milimetricas-5g/>

- Robitzsch, S., Centenaro, M., di Pietro, N., Cordeiro, L., Gomes, A. S., Sanders, P., & Ishaq, A. (n.d.). *Prospects on the Adoption of a Microservice-Based Architecture in 5g Systems and Beyond*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.4485374>
- Sousa, M., Alves, A., Vieira, P., Queluz, M. P., & Rodrigues, A. (2021). *Analysis and Optimization of 5G Coverage Predictions Using a Beamforming Antenna Model and Real Drive Test Measurements*. *IEEE Access*, 9, 101787–101808. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3097633>
- Stuhlfauth, R. (2020). *5G EMF MEASUREMENT ASPECTS*. *5G EMF MEASUREMENT ASPECTS*.
- Uso del espectro radioeléctrico en redes móviles 5G. (n.d.). Retrieved January 4, 2024, from <https://repositorio.unisucre.edu.co/handle/001/942>
- 5G | ShareTechnote. (n.d.). Retrieved November 1, 2023, from https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_FrameStructure.html
- 5G Use Cases - 5G Americas. (n.d.). Retrieved December 2, 2023, from <https://www.5gamericas.org/5g-use-cases/>
- ¿Qué es la industria 4.0? | Definición, tecnologías, beneficios | SAP. (s. f.). SAP. <https://www.sap.com/latinamerica/products/scm/industry-4-0/what-is-industry-4-0.html>
- Vicente, A. B. G. (2021, 4 marzo). *Análisis y estudio de un fronthauling óptico para redes 5G basado en micro-celdas comparando su rendimiento y costo con la red tradicional 4G basado en CPRI*. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/18676>.

ANEXOS

Anexo 1. Análisis de Interferencia

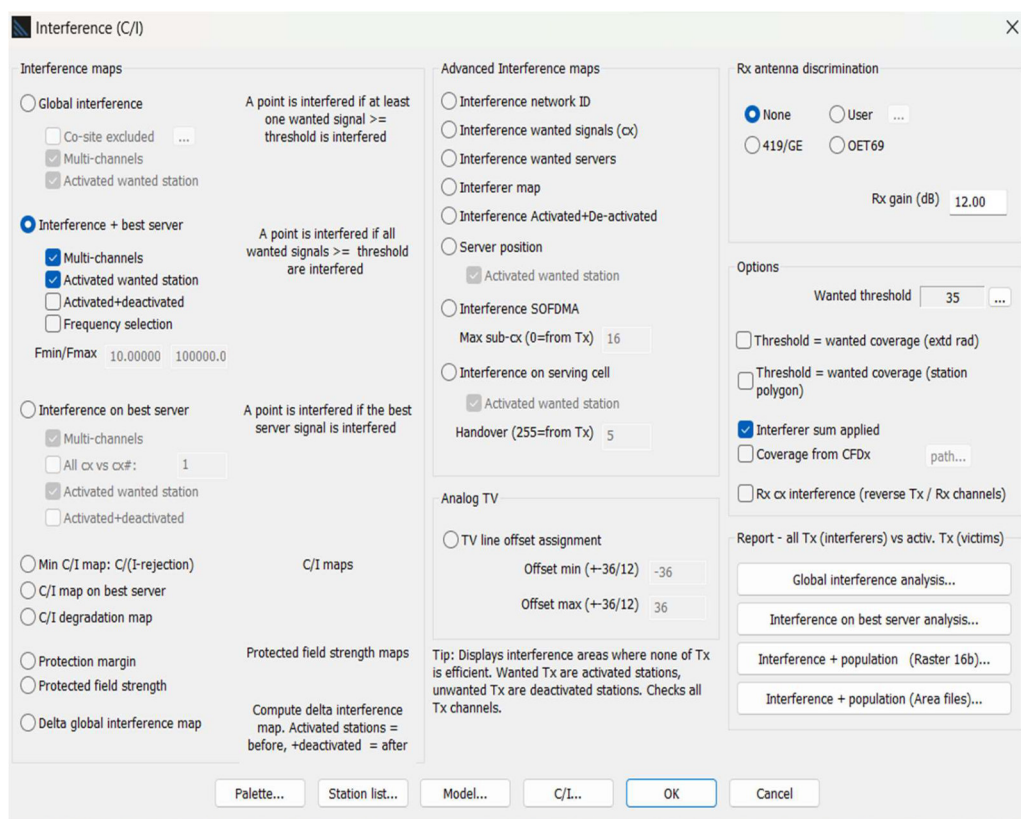


Figura 36: Análisis de Interferencia. Fuente: Software HTZ Communications

Anexo 2. Reporte de cobertura de interferencia- software HTZ Communications

Coverage interference report (C/I)

Multiple C/I (dB) mask - Priority 4

☒ Compare Tx/Rx bandwidths

N=0	1	☒ used	N=8	-30	☐ used
N=1	9	☒ used	N=9	-30	☐ used
N=2	0	☒ used	N=10	-30	☐ used
N=3	0	☒ used	N=11	-30	☐ used
N=4	0	☒ used	N=12	-30	☐ used
N=5	-30	☐ used	N=13	-30	☐ used
N=6	-30	☐ used	N=14	-30	☐ used
N=7	-30	☐ used	N=15	-30	☐ used

Pilot channel:

N=0 19 N=1 -45 N=2 -127

☒ Use mask as filter - All priorities

C/I from Tx/Rx - Priority 3

☐ C/I from Tx/Rx C/I

C/I tables - Priority 2

☒ C/I from ITU-R 478 2033 412 655 1368 1009 560, FCC OET 69, ICAO, IEEE 802.11/802.16, ETSI 101-980 301-598

☐ Tropo ☒ Steady

☒ Rice fading (DVB) ☐ Rayleigh fading (DVB)

☒ FM ITU ☐ FM UK ☐ FM ITU+ISO

For Wiesbaden, tropo=1% and steady=50%

NFD matrix - Priority 1

☐ C/I from NFD/TS-RIF Required C/I (dB) 1

XPD

☒ Global XPD 0 dB

C/H or V: 3 dB protection except if global XPD=0

Options

☐ Activity factor weighting [C/Ireq+10log(activity)]

☐ Channel weighting [C/Ireq+10log((nbcx-cx)/nbcx)]

☒ Smart antenna rejection

More options...

☒ Unwanted = activated

☐ Unwanted = de-activated and activated

☐ Unwanted = de-activated

☐ Save maps (player)

☐ Isolate conflict(s)

Wanted threshold 35 ...

Tx bandwidth / Tx bandwidth

Load Save

OK Cancel

Figura 37: Reporte de cobertura de interferencia. Fuente: Software HTZ Communications

Anexo 3. Interfaz de trabajo - software HTZ Communications

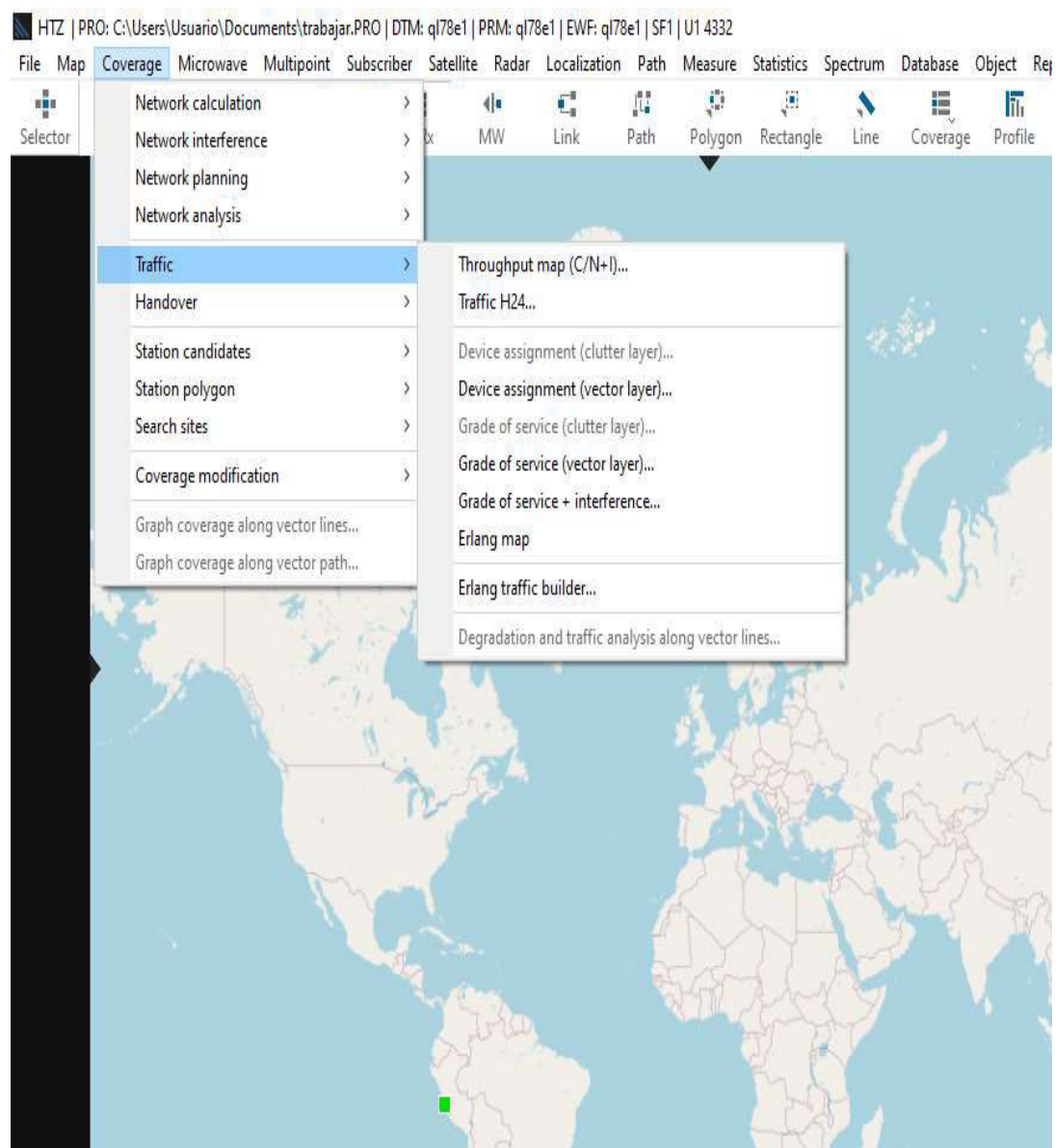


Figura 38: Interfaz de trabajo. Fuente: Software HTZ Communications

Anexo 4. Elección del modelo de propagación

Propagation models

Deterministic model from about 30 MHz to 1 THz

☐ Propagation losses =

☐ Near field calculation

☐ Free space loss

☒ + Min [Diffraction, Tropo, Ducting, Reflections, Absorption] attenuation

☒ + Attenuation by atmospheric gases and rain

☐ + Other attenuations (option)

☐ 20.LOG[(4.PI.D) / wavelength]

☐ ISO

Diffraction geometry

☐ Deygout 94

☐ Deygout 66

☐ Deygout 91

☐ Bullington

☐ Delta Bullington

☐ ITU-R 526, round mask

☐ ITU-R 526, cylinders

☐ Visibility / Indoor

☒ No diffraction loss

☐ Lateral diffraction (LTD)

☐ Power correction (angle)

☐ VHF correction

☐ More methods...

Absorption / Penetration

☐ Linear attenuations...

Subpath attenuation

☐ Fresnel integrals

☐ Standard

☐ MD 91 method

☐ Coarse integration

☐ Fine

☐ Area

☐ Delta Bullington

☐ Deygout 66

☒ No subpath loss

☐ Free ellipsoid

☐ More methods...

☐ Fourth-power law

FZ 1.00

Ducting

☐ Ducting ...

3D reflections

☐ Multipath ...

Reflection dist. limit (m) 1000

Elevation filter > (m) 0

Reflectivity 0.001-0.2 0.500

refraction calculator...

Troposcattering

☐ ITU-R 617-3

NBS 101

☐ equatorial

☐ desert

☐ subtropical

☐ temperate

☐ subtropical sea

☒ continental

☐ temperate sea

Surface refractivity M0 320.00

☐ ITU-R 617-5...

Tropo only

Gases / Fog / Clouds / Sand

☒ Gas ITU-R 676 (1-1000 GHz)

☐ Gas ITU-R 1820 (47-48 GHz)

Vapour 7.50 hPa 1013

Water 0.320 g/m3 T 15.00 C°

☐ Scintillation (< 20 GHz)...

☐ Fog ITU-R 840 (> 10 GHz)

☐ Duststorm (<115 GHz)...

Rain / Snow

☐ Rain ITU 838/530

Rain map...

☐ Rain Crane global

Rain rate (mm/h) 30.00

☒ R-837 (dynamic)

Time (0.001 to 1%) 0.010000

Isotherm 0°C 3.00 km

Slope model coefficients

A factor 1.0 B (dB) 0.0

Attenuation (dB/km) 0.0000

Tunnel...

Diffraction correct (dB) 0.00

2D reflections

☐ Ground reflections - minima/maxima

☐ Ground reflections - reflection point

☐ Ground reflections - min/max flat earth

☐ 2-Ray model - max(Ls,L2-ray)

☒ No ground reflections

Propagation methods

ITU / FCC (empirical and half determ.)

☐ ITU-R 525/526-15

☐ ITU-R 525/526-11...

☐ ITU-R 1546-6 (30-4000 MHz)...

☐ ITU-R 1812-7 (30-6000 MHz)...

☐ ITU-R 452-17 (0.1-50 GHz)...

☐ ITU-R 452-14 (0.1-50 GHz)...

☐ ITU-R 1147-4 (150-1700 kHz)...

☐ ITU-R 368 (10 kHz-30 MHz)...

☐ ITU-R 1009-1 (LoS)

☐ ITU-R 528-5 (100-30000 MHz)

☐ ITU-R 528-3 (125-15500 MHz)...

☐ ITU-R 1225 (DMT 2000)

☒ ITU-R 2001-4 (30 MHz - 50 GHz)

☐ ITM NTIA (20 MHz-20 GHz)...

3GPP / COST (empirical)

☐ Durkin

☐ 3GPP - LTE urban (0.9 - 2 GHz)

☐ SUL method (2.5-2.7 GHz)...

☐ Okumura-Hata (150-1500 MHz)

☐ Hata - Cost 231 (150-2000 MHz)

☐ Hata Seamcat (30-3000 MHz)

☐ Cost 231 open...

☐ Walfisch-Ikegami (800-2000 MHz)

☐ OHD TSB 88-B (30-1500 MHz)

☐ Modified Hata by ACMA

☐ M.2412 UMi-UMa (0.5-100 GHz)...

Specific / External

☐ BR method (uV)

☐ Wojnar method (1-1000 MHz)

☐ CCIR - MF (550-1700 kHz)

☐ Egli (V/UHF)

☐ ITU-R P.529-3

☐ ITU-R 370 (30-1000 MHz)...

☐ Ext. model (DLL) Select...

☒ Composite output

☐ Use Tx/Rx effective heights

☒ Flat earth profile sent to DLL

☐ Reverse profile

Global parameters

Earth radius km land 3500

Earth radius km sea 8500

RMS wave height (m) 0.00

Variability

Location 50.0 pc

Time 50 pc

☐ Variability (P2P unwanted signal)

Time (0 to 50 pc) 0=random 50.0000

Indoor... Clutter... Conductivity... ITU zones...

OH - clutter definition... Save... Load... Close

Info

Generic propagation model valid from about 30 MHz to 1 THz: A map-based deterministic propagation model to fulfill all V/U/S/B/F requirements at the same time

Diffraction component = non line of sight path (NLoS)

Deygout 1966 is limited to 3 obstacles (ITU-R 676-11) Maximum of 0.0

Figura 39:. Elección del modelo de propagación. Fuente: Software HTZ Communications

Anexo 5. Matriz de consistencia

PROBLEMAS	Objetivos	Justificación	Hipótesis	Variables	Metodología
Problema General •¿Cómo proponemos el uso de una red heterogénea 5G en la banda 29.1 Ghz para optimizar la señal electromagnética de una red de acceso en el puerto del Callao?	Objetivo General OG.: Proponer un diseño de una red heterogénea 5G para optimizar la señal electromagnética de una red de	Importancia y justificación del proyecto La importancia y justificación del proyecto para implementar una red heterogénea 5G en la banda de 29.1 GHz con el fin de optimizar la señal	La implementación de una Red Heterogénea 5G en la banda de frecuencia de 29.1 GHz, junto con antenas beamforming, mejorará la calidad y la cobertura de la	-Variable independiente: Uso de una Red Heterogénea 5G en la banda de frecuencia de 29.1 GHz con antenas beamforming. -Variable dependiente: Calidad y	En la metodología, se realizará un análisis de cobertura específico para antenas de 2 metros en el área de estudio del puerto del Callao, utilizando exclusivamente el modelo digital del terreno (DEM). Este enfoque se centrará en
Problemas específicos					

PROBLEMAS	Objetivos	Justificación	Hipótesis	Variables	Metodología
• ¿Cómo se determina la propuesta de simulación en una red heterogénea 5G en la banda 29.1 Ghz para optimizar la cobertura en una señal electromagnética de una red de acceso en el Callao? • ¿Cómo elaboramos la propuesta de simulación de una red heterogénea 5G para reducir las señales de interferencia	acceso en el puerto del Callao Objetivos específicos: OE1. Determinar la propuesta de simulación en una red heterogénea 5G para optimizar la cobertura en una señal electromagnética	electromagnética en el puerto del Callao son múltiples y abarcan aspectos estratégicos, económicos, operativos y tecnológicos. La implementación de esta red 5G no solo aborda las necesidades inmediatas de conectividad en el puerto del Callao,	señal electromagnética en una red de acceso ubicada en el Puerto del Callao en comparación con un escenario sin antenas beamforming.	cobertura de la señal electromagnética en la red de acceso del Puerto del Callao.	evaluar la propagación de la frecuencia de 29.1 GHz en el entorno portuario, considerando únicamente las alturas de antena específicas y aplicando el modelo ITU 2001-4. Al basarse exclusivamente en el modelo DEM, se simplifica el análisis para centrarse en la

PROBLEMAS	Objetivos	Justificación	Hipótesis	Variables	Metodología
en una señal electromagnética de una red de acceso en el puerto del Callao? • ¿Cómo elaboramos la propuesta de simulación en una red heterogénea 5G para ampliar las capacidades señal electromagnética de una red de acceso en el puerto del Callao.	en el puerto del Callao. OE2. Determinar la propuesta de simulación en una red heterogénea 5G para reducir las señales de interferencia en una señal electromagnética de una red de acceso en el	sino que también sienta las bases para un desarrollo sostenible, competitivo y tecnológicamente avanzado en el ámbito portuario. La justificación del proyecto radica en su capacidad para impulsar una transformación integral con beneficios a corto y largo plazo.			topografía del terreno y su influencia en la propagación de la señal. Se buscará comprender cómo las alturas específicas de antena y el modelo ITU 2001-4 interactúan con la geografía local para proporcionar una visión más precisa de la cobertura 5G en el área del puerto del Callao.

PROBLEMAS	Objetivos	Justificación	Hipótesis	Variables	Metodología
	puerto del Callao. OE3. Determinar la propuesta de simulación en una red heterogénea 5G para ampliar las capacidades señal electromagnética de una red de acceso en el				En la metodología, después de realizar el análisis de cobertura utilizando exclusivamente el modelo digital del terreno (DEM) para antenas de 2 metros en el área del puerto del Callao, se procederá a llevar a cabo un análisis detallado de los Key Performance

PROBLEMAS	Objetivos	Justificación	Hipótesis	Variables	Metodología
	puerto del Callao.				Indicators (KPI) pertinentes.

Anexo 6: CUMPLIMIENTO DE NORMAS Y ESTRUCTURA DE TESIS

Esta tesis ha sido preparada en conformidad con la estructura general establecida por la directiva del año 2023 para la obtención del título profesional de la facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos

A.1 Estructura General de Tesis

La estructura de esta tesis sigue las directrices de la facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos asegurando la inclusión de las secciones fundamentales:

- Introducción:** Contextualiza el tema, define los objetivos y justifica la investigación.
- Revisión de la Literatura:** Analiza estudios y teorías relevantes.
- Hipótesis o Variables:** Presenta las hipótesis planteadas y las variables estudiadas.
- **Materiales y Métodos:** Detalla el diseño del estudio, los materiales utilizados y los métodos aplicados.
- **Resultados:** Presenta los hallazgos de la investigación de manera clara y organizada.
- **Discusión:** Interpreta los resultados, discute sus implicaciones y relaciona los hallazgos con la literatura existente.
- Conclusiones y Recomendaciones:** Resume los principales hallazgos, plantea conclusiones y ofrece recomendaciones para futuras investigaciones o aplicaciones prácticas